

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la*  
*Recherche Scientifique*  
**UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-**  
**OUZOU**

**Faculté du génie de la construction**

**Département génie mécanique**



# Mémoire



**De Fin d'étude Master**  
**Option : Construction Mécanique**

## Thème

**Étude et conception d'une enveloppe antidéflagrante pour un  
moteur électrique asynchrone triphasé 22 KW**

*Mémoire soutenu publiquement le 25-09-2025*

**Proposé par :**

Mr. BENACER Mohand Ouamar

**Réalisé par :**

Mr. FEDOUL Nassim

**Encadré par:**

Mr. BEHTANI Amar

Mr. SELMANI Cherif

**Devant le jury composé de :**

**Président de jury : Mr HAMOUR Mohand**

**Examineur : M<sup>elle</sup> AIMEN Kahina**

**Promotion 2024/2025**

## *Remerciement*

*Nous remercions et nous rendons grâce tout d'abord à " DIEU », le miséricordieux de nous avoir donné la santé, la foi, la volonté et la patience pour mener à terme la réalisation de notre mémoire de fin d'étude.*

*Nous remercions vivement le président et les membres de jury pour nous avoir honorés et acceptés d'examiner notre mémoire, leur présence, leurs remarques éclairées et l'intérêt qu'ils portent à ce travail constituent un privilège et un encouragement précieux dans notre parcours académique.*

*Comme nous tenons à adresser toutes autres reconnaissances et notre gratitude à :*

*\*Mr. BEHTANI AMAR notre promoteur, pour son encadrement rigoureux, ses orientations pertinentes, et son suivi constant tout au long de ce travail.*

*Sa disponibilité, son exigence scientifique et ses précieux conseils, ont grandement enrichi la qualité de ce mémoire, et ont permis de progresser aussi bien sur le plan académique que personnel.*

*\*Mr. BENACER MOHAND OUAMAR notre Co promoteur pour son accompagnement attentif, ses suggestions constructives et son aide précieuse à chaque étape de ce projet. Sa patience, sa pédagogie et son soutien indéfectible ont constitué un appui essentiel pour mener à bien cette recherche.*

*On tient aussi à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble du personnel de l'usine ENEL, pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité et leur précieuse collaboration. Leur accompagnement, leurs explications techniques et leur soutien pratique ont constitué une aide inestimable pour la réalisation de ce travail.*

## *Dédicace*

*Pour que ma réussite soit complète je la partage avec toutes les personnes que j'aime et qui m'aiment.*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents en témoignage pour leur accompagnement constant et leur soutien indéfectible.*

*A mon frère, et ma sœur, dont la présence et l'encouragement ont toujours constitué pour moi une force dans mon parcours.*

*Une pensée particulière, va aussi à mes amis, qui, par leur compréhension et leur appui ont contribué à rendre ce cheminement plus léger et plus motivant.*

*Enfin je dédie ce mémoire à mon binôme, collègue de travail et partenaire de recherche, pour sa collaboration, son implication et l'esprit d'équipe qui ont marqué cette expérience commune.*

*Nassim*

## *Dédicace*

*Tout d'abord je remercie dieu qui m'a orienté et donné du courage de mener à terme mes études.*

*Je dédie mon travail à mes chers parents en signe de profonde reconnaissance pour leurs sacrifices, leur appui permanent et leur confiance tout au long de mon parcours.*

*A mes frères, et ma sœur, pour leur soutien, leur affection, leur présence réconfortante et leur source de motivation et d'encouragement.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes amis pour leur soutien et leur compréhension durant cette étape importante.*

*Enfin je dédie ce travail à mon collègue et binôme, avec qui j'ai partagé les efforts, les responsabilités et la persévérance nécessaire à la réalisation de ce projet.*

*Cherif*

## Table des matières

<b>Introduction générales .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : présentation de l'entreprise .....</b>	<b>1</b>
I. Historique.....	2
II. Objectif .....	3
III. Présentation de l'unité moteur.....	3
IV. Performance et application : .....	4
V. Gamme de fabrication .....	4
VI. Caractéristique .....	5
<b>Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones.....</b>	<b>7</b>
I. Introduction .....	8
II. Définition du moteur asynchrone.....	8
III. Principe de fonctionnement des moteurs électrique .....	8
III.1. Constitution de champs tournant.....	8
III.2. Interaction entre stator et rotor .....	9
III.3. Notion de glissement .....	9
III.4. Moteur synchrone : .....	10
III.5. Moteur asynchrone : .....	10
IV. Constitution et structure.....	10
IV.1. Partie statorique (stator) .....	10
IV.2. Partie rotorique (rotor) .....	12
V. Caractéristiques électromécaniques .....	16
V.1. Le couple .....	16
V.2. Rendement.....	16
V.3. Constitution du champ tournant .....	16
V.4. Courant de démarrage et variation de charge .....	17
V.4.a. Démarrage des moteurs asynchrones.....	17
V.4.b. Variation de charge dans un moteur asynchrone .....	17
VI. Types des moteurs asynchrones.....	17
VI.1. Moteur asynchrone monophasé.....	17

VI.2.	Moteur asynchrone triphasé .....	18
VI.3.	Comparaison avec le moteur synchrone .....	18
VII.	Avantages et inconvénients .....	18
VII.1.	Avantages .....	18
VII.2.	Inconvénient .....	19
VIII.	Conclusion .....	19
	<b>Chapitre 3 : Phénomène de déflagration .....</b>	<b>20</b>
I.	Introduction .....	21
II.	Définition d'atmosphère explosive .....	21
III.	Principe physico-chimique de la déflagration .....	21
III.1.	Mécanismes de base de la combustion .....	21
III.1.a.	Réaction exothermique .....	21
III.1.b.	Condition nécessaire à la combustion .....	22
III.1.c.	Mécanisme réactionnel simplifié .....	23
III.2.	Propagation de la flamme .....	23
III.2.a.	Vitesse de propagation .....	23
III.2.b.	Phénomène de transfert thermique .....	23
III.2.c.	Diffusion de masse .....	24
III.3.	Paramètres influents .....	24
III.3.a.	Température initiale .....	24
III.3.b.	Pression initiale .....	24
III.3.c.	Concentration de mélange .....	24
IV.	Typologie de déflagration .....	25
IV.1.	Déflagration lente et rapide .....	25
IV.1.a.	Déflagration lente .....	25
IV.1.b.	Déflagration rapide .....	25
IV.2.	Déflagration confinée et non confinée .....	25
IV.2.a.	Déflagration confinée .....	25
IV.2.b.	Déflagration non confinée .....	26
IV.3.	Transition de la déflagration vers la détonation .....	26
IV.3.a.	Phases habituelles de la transition .....	26
IV.3.b.	Conditions propices à la DDT .....	26
IV.3.c.	Comparaison déflagration vers détonation .....	27

V.	Conséquences mécaniques de la déflagration .....	27
V.1.	Surcharge de pression dans un volume confiné.....	27
V.2.	Effets sur les structures et matériaux.....	27
V.3.	Risques pour la sécurité des équipements et des personnes .....	28
VI.	Cas particulier : déflagration dans une enveloppe antidéflagrante .....	28
VI.1.	Fonctionnement et rôle de l'enveloppe antidéflagrante.....	28
VI.1.a.	Principe général.....	28
VI.1.b.	Rôle de l'enveloppe.....	29
VI.2.	Comportement de la flamme et des gaz de combustion dans un volume clos	29
VI.2.a.	Propagation de la flamme.....	29
VI.2.b.	Comportement des gaz .....	29
VI.3.	Risque en cas de conception inadéquate.....	29
•	Rupture mécanique de l'enveloppe.....	29
VII.	Conclusion .....	29
<b>Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles .....</b>		<b>31</b>
I.	Introduction .....	32
II.	Cadre réglementaire ATEX.....	32
II.1.	Genèse des directives européennes .....	32
II.2.	Objectifs et principes .....	32
II.3.	Obligation des employeurs et fabricant .....	33
II.3.a.	Employeurs (directive 1999/92/CE).....	33
II.3.b.	Fabricants (Directive 2014/34/UE) .....	33
II.4.	Articulation avec d'autres norme (IECEx, ISO, NFPA,).....	33
III.	Classification des zones ATEX .....	34
III.1.	Critères de classification .....	34
III.2.	Zone gaz (0,1,2) et poussières (20 ,21,22) .....	34
III.2.a.	Zone pour gaz .....	34
III.2.b.	Zone pour poussière .....	35
III.3.	Méthodologie de zonage (analyse de risque) .....	35
IV.	Choix et conception des équipements ATEX.....	36
IV.1.	Groupes et catégories des équipements.....	36

IV.1.a.	Groupe d'appareil I .....	36
IV.1.b.	Groupe d'appareil II .....	36
IV.2.	Mode de protection .....	37
IV.3.	Classe de température .....	37
IV.4.	Marquage ATEX et signification.....	38
IV.5.	Evaluation de conformité et certification .....	39
IV.5.a.	Procédures selon la catégorie d'équipement .....	40
IV.5.b.	Contenu de la documentation technique ATEX.....	40
V.	Limite et enjeux actuels de la réglementation .....	40
V.1.	Problèmes d'interprétation ou d'application sur le terrain .....	40
V.2.	Contraintes économiques et technologiques .....	41
V.3.	Evaluation attendues du cadre réglementaire .....	42
V.4.	Perspectives de digitalisation.....	42
VI.	Conclusion .....	43
	<b>Chapitre 5 : Etude théorique et simulation SolidWorks .....</b>	<b>44</b>
I.	Introduction .....	45
II.	Présentation du contexte .....	45
III.	Description de moteur, objectif d'étude et de son application.....	46
III.1.	Caractéristiques du moteur .....	46
III.2.	Environnement d'installation .....	47
III.2.a.	Type de zone .....	47
III.2.b.	Gaz concerné.....	47
III.2.c.	Contrainte environnementale .....	47
IV.	Conception .....	48
IV.1.	Matériaux .....	48
IV.2.	Chemin de gaz (flame paths).....	48
IV.3.	Calcul et vérification normative.....	49
V.	Calcul de vérification .....	49
V.1.	Calcul la pression d'explosion interne présumée.....	49
V.2.	Vérification de la résistance mécanique de l'enveloppe .....	49
V.3.	Calcul de la contrainte équivalente de Von Mises .....	50
V.4.	Résultat du dimensionnement analytique.....	50

V.4.a.	Épaisseur minimale des parois .....	50
V.4.b.	Contrainte des parois.....	51
VI.	Conception de l'enveloppe antidéflagrante sur SolidWorks .....	51
VI.1.	Carcasse .....	51
VI.2.	Flasque .....	52
VI.3.	Plaque de séparation.....	53
VI.4.	Enveloppe .....	53
VII.	Simulation numérique sur SolidWorks .....	54
VII.1.	Objectif.....	54
VII.2.	Méthodologie .....	55
VII.3.	Résultats de la simulation .....	55
VII.4.	Discussion de différents résultats entre calcul numérique et simulation 56	
VIII.	Conclusion .....	56
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>57</b>

## Liste des figures

Figure I-1:l'électro-industrie AZAZGA .....	2
Figure III-1: les moteurs fabriqués par électro-industrie .....	4
Figure II-1: moteur asynchrone.....	8
Figure III-1: champ tournant.....	9
Figure IV-1: constitution et structure.....	10
Figure IV-2: stator de la machine asynchrone .....	11
Figure IV-3: bobinage d'un moteur asynchrone.....	11
Figure IV-4représente le circuit magnétique .....	12
Figure IV-5: représente le rotor à cage.....	13
Figure IV-6: représente le rotor bobiné .....	13
Figure IV-7:enveloppe.....	14
Figure IV-8: carcasse .....	14
Figure IV-9: palier .....	15
Figure IV-10: ventilateur .....	15
Figure IV-11: boîte à borne .....	15
Figure IV-1: représente un exemplaire d'étiquette ATEX .....	39
Figure VI-1: représente la carcasse de ce moteur.....	52
Figure VI-2: représente le flasque .....	52
Figure VI-3: représente la plaque de séparation de ce moteur .....	53
Figure VI-4: représente l'enveloppe de ce moteur .....	54
Figure VII-1: représente les résultats de simulation.....	55

## Liste des Tableaux

Tableau V-1: représente les moteurs triphasés à une seule vitesse .....	5
Tableau V-2: représente les moteurs triphasés à deux vitesses.....	5
Tableau V-3: représente les moteurs monophasés à condensateur .....	5
Tableau IV-1: représente la différence entre déflagration et détonation .....	27
Tableau IV-1: représente l'estimation de niveau de risque de chaque zone .....	34
Tableau IV-2:représente une synthèse selon IEC 60079-10 .....	35
Tableau V-1:les modes de protection des équipements de groupe II.....	37
Tableau V-2: représente les températures de surface et la température d'inflammation .....	38
Tableau V-3: représente la signification des éléments de cette exemple de marquage.....	39
Tableau V-4:représente la procédure selon la catégorie .....	40
Tableau III-1:représente les caractéristiques techniques de ce moteur .....	46

# **Introduction générales**

## **Introduction générale**

La sécurité dans les environnements industriels constitue un enjeu majeur, particulièrement dans les secteurs où des atmosphères explosives peuvent être présentes, comme la pétrochimie, la chimie, l'agroalimentaire ou encore l'énergie. La maîtrise du risque d'explosion est primordiale, car une déflagration peut entraîner des conséquences graves sur les installations, l'environnement et la sécurité des personnes. Dans ce contexte, l'utilisation d'équipements certifiés et conformes aux normes internationales est devenue indispensable.

Les moteurs asynchrones, largement utilisés pour leur robustesse et leur fiabilité, sont souvent installés dans de tels environnements à risque. Cependant, leur fonctionnement peut générer des sources d'inflammation (étincelles, échauffements, arcs électriques), susceptibles de provoquer une explosion en présence d'un mélange inflammable. Pour réduire ce danger, les moteurs destinés aux zones à atmosphère explosive doivent être conçus avec une enveloppe antidéflagrante, capable de contenir une éventuelle explosion interne et d'empêcher sa propagation à l'extérieur.

Ce mémoire s'inscrit dans ce cadre et comporte quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente l'entreprise
- Le deuxième chapitre présente les généralités sur les moteurs asynchrones, leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques principales.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude du phénomène de déflagration, ses mécanismes et ses conséquences dans un environnement confiné.
- Le quatrième chapitre traite des directives européennes ATEX et de la norme internationale IEC 60079-1, qui fixent les exigences de conception et de sécurité des enveloppes antidéflagrantes.
- Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la conception et la validation numérique de l'enveloppe antidéflagrante d'un moteur asynchrone, à travers un dimensionnement analytique complété par une simulation par éléments finis sur SolidWorks.

Ainsi, ce travail vise à assurer la conformité normative et la sécurité mécanique de l'enveloppe étudiée, tout en proposant une approche méthodologique rigoureuse combinant théorie et simulation numérique.

**CHAPITRE 1 : présentation de  
l'entreprise**

# Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise

---

## I. Historique

L'entreprise est issue de la réorganisation de secteur opérée en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (entreprise nationale des industries électrotechniques) en un certain nombre d'entreprise publique économique, société par action (EPE / SPA), parmi lesquelles figure ELECTRO-INDUSTRIE.

L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit en main avec des partenaires Allemands, en l'occurrence, SIEMENS pour le produit et FRITZ WENER pour l'engineering et la construction, l'infrastructure est réalisée par les entreprises Algériennes. Et en 2018 elle s'est associée avec Sonelgaz et la société indienne (Vijai Electricals Ltd), pour la fabrication des transformateurs de grande puissance.

Le complexe du matériel électrique industriel MEI qui se situe sur la route national N12 d'AZAZGA ; TIZI OUZOU est la plus grande unité de l'ENEL, le MEI occupe une surface totale de 45 hectares dont 6 hectares bâtis, elle est entrée en production en 1985



Figure I-1: l'électro-industrie AZAZGA

### II. Objectif

L'électro-industriel est composé de deux unités, toute située sur un même site :

- Unité de fabrication de transformateur de distribution MT / MB
- Unité de fabrication des moteurs électrique et prestation technique

Les produits fabriqués par EI sont conformés aux recommandation CEI et aux norme allemandes DIN/ VDE

La protection actuelle d'EI est écoulée sur le marché algérien et génère un chiffre d'affaires de 1.8 millions de dinars Algérie [1]

Ces ventes de moteurs représentent environ 30 % de sa capacité de production

### III. Présentation de l'unité moteur

L'unité moteur s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones à différentes puissances et à différentes hauteurs d'axes de construction fermée, en alliage d'aluminium et en fonte.

Parmi les moteurs électriques fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA, on cite le moteur asynchrone triphasé à une ou à deux vitesses, et monophasé à deux condensateur démarrage et permanent.

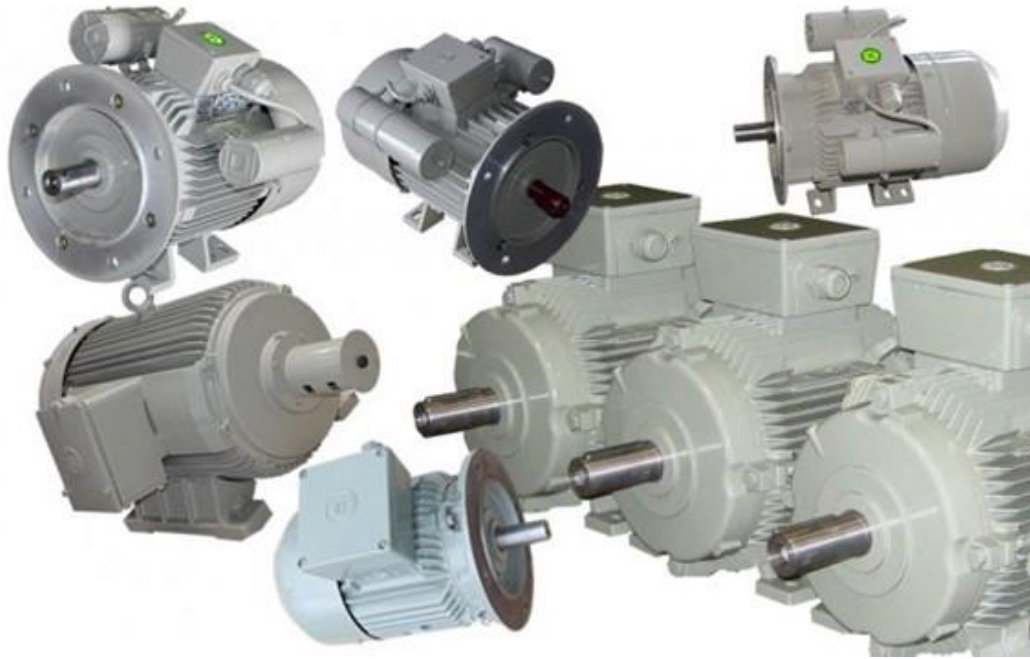


Figure III-1: les moteurs fabriqués par électro-industrie

### IV. Performance et application :

Les moteurs électriques sont alimentés et pilotés par des variateurs électroniques de puissance permettant d'obtenir les performances suivantes :

- Variation de vitesse de rotation.
- Démarrage progressif.
- Freinage

Et de répondre aux applications suivantes :

- Charges mécaniques à couple variable : Pompes, ventilateurs, compresseurs, broyeurs, extrudeuses, calandres, etc.....
- Charges mécaniques à couple constant : Mécanisme de manutention (treuils, élévateur, convoyeurs, etc...), machines outil à force de coupe constante (rectifieuses, raboteuses, cisailles, etc.) et laminoirs ou broyeurs à rouleaux.

### V. Gamme de fabrication

Les moteurs électriques, basse tensions, fabriqués par électro-industrie d'AZAZGA sont de type asynchrone triphasé à une ou deux vitesses, et monophasé à condensateurs. De construction fermée, à carcasse ventilée, alliage d'Aluminium et de fonte. Les rotors sont en court-circuit, à

## Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise

cage d'écureuil, en Aluminium pur (petit ou moyens moteurs) et en barre de cuivre (grands moteurs), ces gammes sont données sur les tableaux suivants :

Gamme	Aluminium	Fonte	
Hauteur d'axe (mm)	71 à 132	160 à 250	280 à 400
Puissance (kw)	0.25 à 9	11 à 55	75 à 400
Vitesse (Tr/mn)	1000 1500	3000	

Tableau V-1: représente les moteurs triphasés à une seule vitesse

Puissance (kw)	0.35/0.65 à 3/4,5	0.48/0.68 à 5,7/7.8	0.48/0.6 à 3,7 /4,4
Vitesse (tr /mn)	750 1000	1000 1500	1500 3000

Tableau V-2: représente les moteurs triphasés à deux vitesses

Hauteur d'axe (mm)	71 à 100
Puissance (kw)	0.25 à 2.2
Vitesse (Tr/mn)	1500 à 3000

Tableau V-3: représente les moteurs monophasés à condensateur

### VI. Caractéristique

Les caractéristiques ci-dessous sont relatives aux moteurs standards. Des caractéristiques différentes peuvent être fournies sur demande.

- Tensions nominales à 50 Hz 200 V-380V-660 V (Tolérance + 0,5%).
- Type de service SI contenu (Température ambiante 40 °c et altitude 1000 m)
- Classe d'isolation : F (tropicalisée).

## **Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise**

---

- Refroidissement et ventilation ventilateur externe monté sur l'arbre, protégé par un capot.
- Forme de construction : B3-B5-B35.
- Equilibrage Dynamique des rotors avec clavettes.
- Degré de protection : IP54-IP55.
- Paliers des moteurs de HA 71 à 250 mm sont graissés à vie.
- Paliers des moteurs de HA 280 à 400 mm sont mini d'un dispositif de graissage.
- Peinture standard : Gris pierre RAL 7030

## **Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones**

## Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones

---

### I. Introduction

Une machine tournante est un dispositif électromécanique dont le principe de fonctionnement repose sur un mouvement de rotation continu autour d'un axe. Ce mouvement permet de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique ou de transférer de l'énergie sous forme de puissance mécanique rotative. Les machines tournantes sont présentes dans de nombreux secteurs industriels (production d'énergie, transport, traitement des fluides, etc.) et jouent un rôle essentiel dans les systèmes de conversion et de transmission d'énergie.

### II. Définition du moteur asynchrone

Un moteur asynchrone, ou moteur à induction, est une machine électrique tournante alimentée en courant alternatif, dans lequel la vitesse de rotation du rotor est toujours inférieure à celle du champ magnétique tournant créé par le stator, d'où vient le terme asynchrone. [2]



Figure II-1: moteur asynchrone

### III. Principe de fonctionnement des moteurs électrique

Il fonctionne selon le principe de l'induction électromagnétique

#### III.1. Constitution de champs tournant

Un moteur asynchrone (appelé aussi moteur à induction) comporte un circuit magnétique à deux armatures cylindriques concentriques, séparées par un entrefer de faible épaisseur. Ces armatures sont constituées de tôles magnétiques perpendiculaires à l'axe de rotation, afin de diminuer les pertes par courants de Foucault. Pour le stator, soumis à la pulsation d'alimentation, l'épaisseur des tôles doit être faible (de l'ordre de 1 mm ou moins) et l'isolement

## Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones

soigné. Cet impératif est moins sévère pour le rotor, soumis à une pulsation très faible comme on le verra, Ce champ tournant induit des courants dans le rotor via le principe de l'induction électromagnétique.

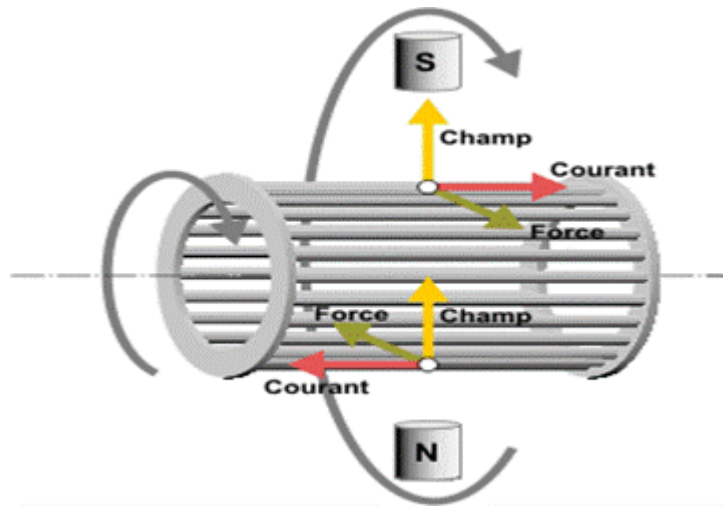


Figure III-1: champ tournant

### III.2. Interaction entre stator et rotor

Le stator est la partie fixe de la machine. Il crée un champ magnétique tournant qui traverse l'entrefer et coupe les conducteurs du rotor, qui constitue la partie mobile. Par induction, un courant est généré dans les conducteurs rotoriques. Ce courant produit à son tour un champ magnétique qui interagit avec celui du stator, créant ainsi un couple électromagnétique

### III.3. Notion de glissement

Le glissement  $g$  exprime la différence entre la vitesse du rotor  $N$  et la vitesse du champ tournant  $N_s$  :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

Où :  $N = (1 - g)N_s$

Avec :

$g$  : c'est le glissement

$N_s$  : vitesse synchrone du champ tournant [tr/min]

$N$  : vitesse de rotation du rotor [tr/min]

- À vide, le glissement est très faible (1-3 %),
- En charge, il augmente selon l'effort demandé.

## Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones

Un glissement nul signifie que le rotor tourne à la vitesse du champ. Dans ce cas le moteur est synchrone. [3]

### III.4. Moteur synchrone :

Le rotor tourne exactement à la vitesse de champ tournant, il nécessite une excitation indépendante

### III.5. Moteur asynchrone :

Le rotor tourne à une vitesse inférieure à  $N_s$ , il repose sur l'induction du courant rotorique

Le moteur synchrone est plus efficace mais plus complexe, tandis que l'asynchrone est plus robuste et moins coûteux.

## IV. Constitution et structure

Les moteurs asynchrones sont constitués d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer d'épaisseur constante.

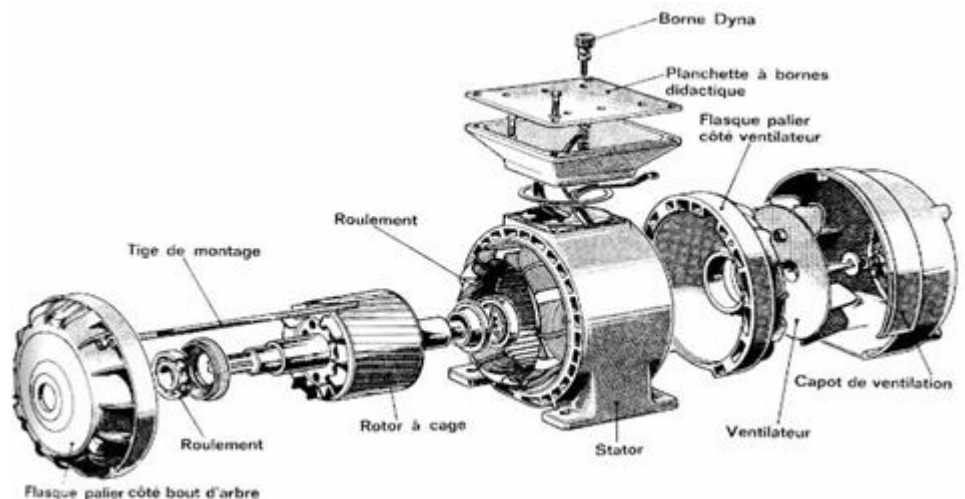


Figure IV-1: constitution et structure

### IV.1. Partie statorique (stator)

Le **stator** c'est la partie fixe du moteur, il est constitué d'un enroulement bobiné réparti à l'intérieur d'une carcasse cylindrique faisant office de bâti, et logé à l'intérieur d'un circuit magnétique supporté par cette carcasse. Ce circuit magnétique est formé d'un empilage de tôles, en forme de couronnes circulaires, dans lesquelles sont découpées les encoches parallèles à l'axe de la machine. [4]

## Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones

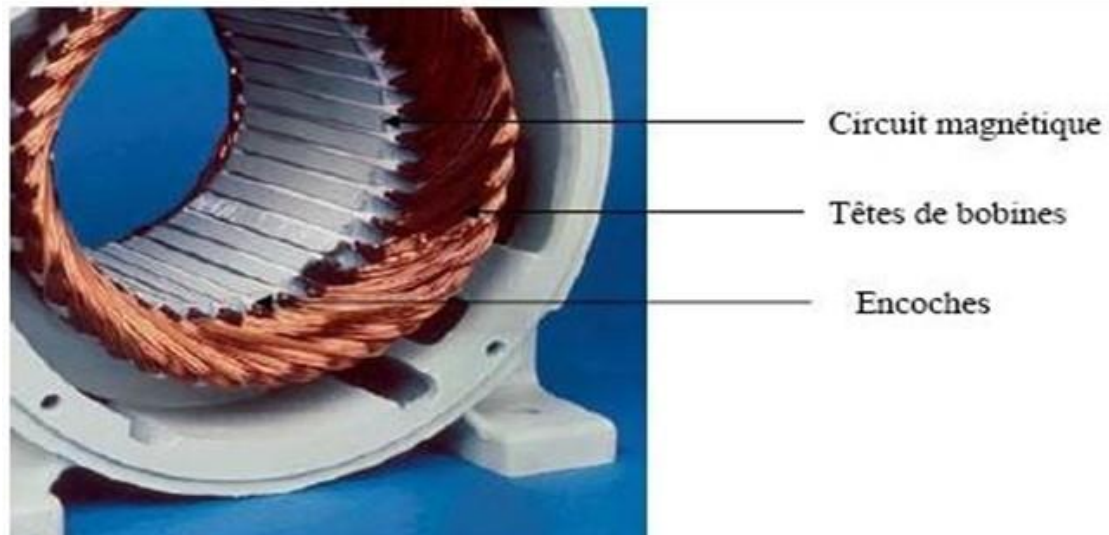


Figure IV-2: stator de la machine asynchrone

**Bobinage :** Le bobinage statorique est constitué de fils de cuivre isolés disposés dans les encoches du stator. Alimenté en courant alternatif, il génère le champ magnétique tournant nécessaire au fonctionnement du moteur. Selon les besoins d'alimentation et d'application, il peut être raccordé en étoile ou en triangle



Figure IV-3: bobinage d'un moteur asynchrone

## Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones

**Circuit magnétique** : sur le plan électromagnétique, un moteur comporte un circuit magnétique, constitué d'un matériau ferromagnétique à forte perméabilité d'enroulements et éventuellement diamants permanent. Le matériau ferromagnétique est nécessaire pour que le flux produit soit assez élevé et pour qu'il soit canalisé afin de pouvoir utiliser correctement ses effets. Les parties ferromagnétiques soumises à un flux constant ou lentement variable peuvent être massives alors que les parties soumises à un flux à variation rapide sont obligatoirement feuilletées pour limiter les pertes par courants de Foucault. [5]

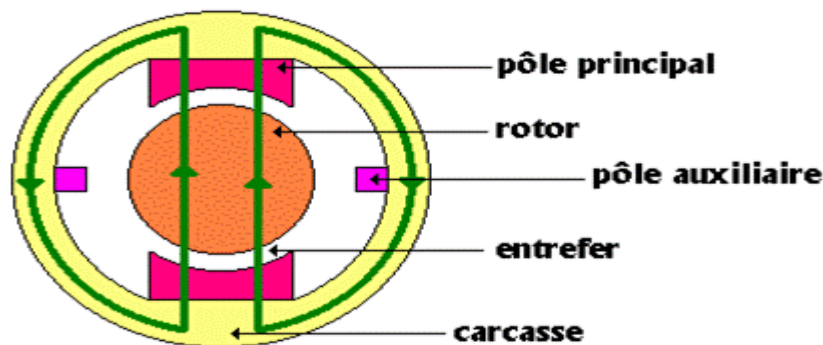


Figure IV-4 représente le circuit magnétique

### IV.2. Partie rotorique (rotor)

Le **rotor** est la partie mobile du moteur. Dans un moteur asynchrone, le rotor est généralement de deux types : "cage d'écureuil" (une structure en court-circuit) ou bobiné.

- **Rotor à cage d'écureuil** : le circuit électrique du rotor peut être simplement constitué de barres en cuivre ou en aluminium logées dans des encoches régulièrement espacées à la périphérie de l'entrefer. Ces barres sont reliées entre elles à chacune des extrémités du rotor par un anneau de court-circuit, le rotor à cage peut être considéré comme un enroulement polyphasé.

## Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones

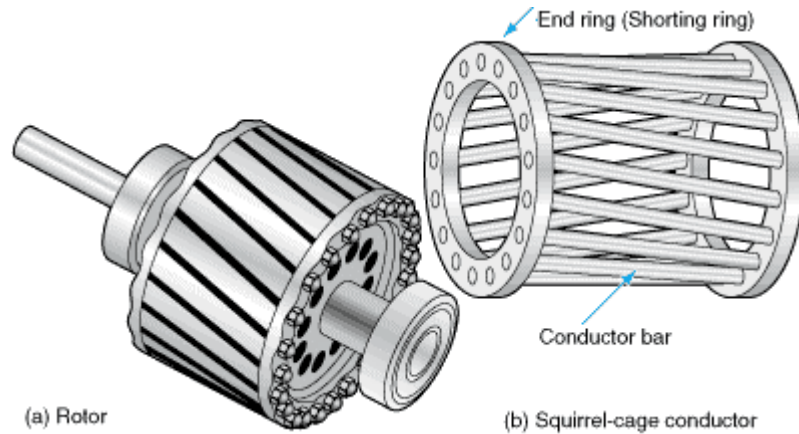


Figure IV-5: représente le rotor à cage

- **Rotor bobiné :** le bobinage du rotor est un enroulement polyphasé semblable à celui du stator, connecté en étoile afin d'empêcher toute circulation de courant entre les phases rotorique. Il est relié des bagues fixées sur l'arbre de la machine. Comme indique sur la figure des balais frottant sur ces bagues relie électriquement l'enroulement rotorique à des résistances situées à l'extérieur de la machine



Figure IV-6: représente le rotor bobiné

**L'enveloppe** c'est elle qui protège les composants internes du moteur et permet la dissipation thermique. Sa constitution :

## Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones

---

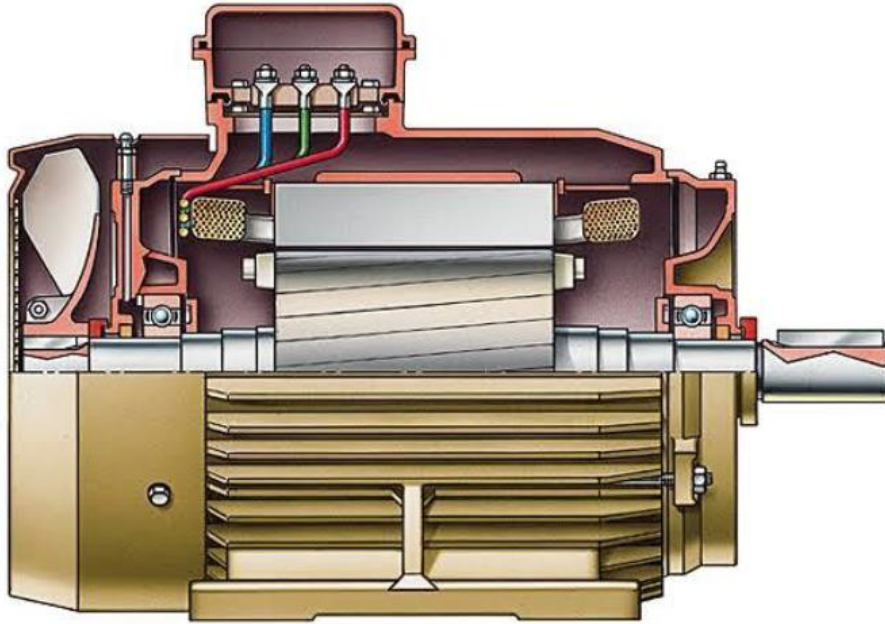


Figure IV-7:enveloppe

- **Carter (carcasse)** : est fabriqué en fonte ou aluminium qui protège les composants internes.



Figure IV-8: carcasse

- **Paliers** : assurent la rotation de l'arbre avec peu de frottement, ce sont généralement des roulements à billes ou à rouleaux

## Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones

---



Figure IV-9: palier

- **Ventilateur** : elle est fixée sur l'arbre du moteur, à l'arrière du rotor, et permet le refroidissement de la machine en forçant l'air à circuler autour du stator et du rotor.



Figure IV-10: ventilateur

- **Boite à bornes** : qui permet le raccordement de câblage électrique.



Figure IV-11: boite à borne

## Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones

### V. Caractéristiques électromécaniques

#### V.1. Le couple

La loi fondamentale utilisée pour exprimer le couple total de la machine est :

$$C = \frac{pq_1}{w} \left( \frac{gR_i U_1^2}{R_e^2 + (gX_e)^2} + \frac{gR_i U_1^2}{R_i^2 + (gX_i)^2} \right)$$

Où :

C : Couple électromagnétique développé par le moteur (en N·m).

p : Nombre de paires de pôles du moteur.

q<sub>1</sub> : Nombre de phases du stator.

w : Vitesse angulaire synchronisme, exprimée en rad/s :

$$w = \frac{2\pi f}{p}$$

Avec *f* la fréquence du réseau.

g : Glissement ( $g = \frac{N_s - N}{N_s}$ ), exprimé en décimal.

R<sub>i</sub> : Résistance du rotor ramenée au stator.

R<sub>e</sub> : Résistance du stator.

X<sub>i</sub> : Réactance du rotor ramenée au stator.

X<sub>e</sub> : Réactance du stator.

U<sub>1</sub> : Tension efficace d'alimentation du stator (phase statorique). [6]

#### V.2. Rendement

Le rendement du moteur asynchrone est égale quotient de la puissance mécanique produite  $p_{mec}$  par puissance électronique absorbée *p* :

$$\eta = \frac{p_{mec}}{p} \times 100\%$$

[6]

#### V.3. Constitution du champ tournant

Le champ tournant est un phénomène fondamental du fonctionnement des moteurs asynchrones triphasés. Il résulte de l'alimentation du stator par un courant alternatif triphasé. Chaque phase génère un champ magnétique alternatif déphasé de 120°, et la superposition des trois

## **Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones**

---

champs produit un champ magnétique résultant qui tourne à une vitesse constante appelée vitesse de synchronisme. [8]

La vitesse de ce champ est donnée par la relation :

$$N_s = \frac{60 \times f}{p}$$

D'où :

- $N_s$  : vitesse de synchronisme (tr/min).
- $f$  : fréquence du réseau (Hz).
- $p$  : nombre de paires de pôles du moteur.

### **V.4. Courant de démarrage et variation de charge**

#### **V.4.a. Démarrage des moteurs asynchrones**

Quel que soit le type de moteur il est nécessaire au démarrage de limiter le courant d'appel et de conserver un couple de démarrage suffisamment important.

Les procédés sont évidemment différents pour les moteurs à rotor en court-circuit ou pour les moteurs rotor bobine

#### **V.4.b. Variation de charge dans un moteur asynchrone**

Les variations de charge dans un moteur asynchrone se traduisent par des modifications du glissement, du courant absorbé, du couple développé et des pertes énergétiques. Le moteur ajuste son fonctionnement pour maintenir la rotation malgré l'évolution de la charge mécanique appliquée à son arbre.

## **VI. Types des moteurs asynchrones**

### **VI.1. Moteur asynchrone monophasé**

Le moteur asynchrone monophasé se compose essentiellement d'un stator comportant un bobinage monophasé et d'un rotor à cage. Le moteur asynchrone monophasé ne possède pas de couple de démarrage. Afin de lui permettre de démarrer de manière autonome, il est nécessaire de l'équiper d'éléments complémentaires. [6]

## Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones

---

### VI.2. Moteur asynchrone triphasé

Un moteur asynchrone triphasé est une machine électrique alimentée par un courant alternatif triphasé. Son stator génère un champ magnétique tournant, qui induit des courants dans le rotor par induction électromagnétique. Le rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ, ce décalage est appelé glissement.

### VI.3. Comparaison avec le moteur synchrone

Le moteur synchrone et le moteur asynchrone sont deux types de machines tournantes largement utilisées dans l'industrie. Le moteur synchrone est une machine à champ tournant dont la vitesse de rotation est strictement égale à celle du champ magnétique statorique. En revanche, le moteur asynchrone tourne à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ magnétique tournant produit par le stator.

## VII. Avantages et inconvénients

### VII.1. Avantages

Les moteurs asynchrones possèdent de nombreux avantages qui justifient leur large utilisation dans les applications industrielles :

- **Robustesse** : Grâce à une construction simple (absence de balais ou de collecteurs dans les moteurs à rotor en cage), les moteurs asynchrones sont très fiables et résistants aux environnements hostiles (chaleur, poussière, humidité).
- **Simplicité de conception** : Le moteur ne nécessite pas de dispositif d'excitation ni de régulateur complexe pour fonctionner. Le rotor en cage est constitué de barres conductrices (généralement en aluminium ou cuivre), court-circuitées aux extrémités.
- **Faible coût** : La production en grande série, la simplicité mécanique, et l'absence de dispositifs de commande compliqués permettent de maintenir un coût d'achat et d'entretien faible.
- **Entretien réduit** : Les moteurs asynchrones n'ont pas de pièces d'usure rapide comme les balais ou les anneaux collecteurs (sauf pour les moteurs à rotor bobiné).
- **Compatibilité avec les variateurs de fréquence (VFD)** : Permettent un contrôle flexible de la vitesse, ce qui améliore les performances énergétiques et mécaniques.

## Chapitre 2 : Généralités sur les moteurs asynchrones

- **Large disponibilité** : Ce sont des moteurs standards, disponibles dans toutes les gammes de puissance, tension, fréquence, formes constructives et degrés de protection (IP).[9]

### **VII.2. Inconvénient**

Malgré leurs avantages, les moteurs asynchrones présentent certaines limites, notamment dans les applications à forte exigence de performance :

- **Démarrage à fort courant** : Le courant de démarrage peut atteindre 6 à 8 fois le courant nominal, ce qui nécessite parfois des dispositifs de démarrage progressif.
- **Couple à basse vitesse faible** : En l'absence de variateur de fréquence, le couple diminue fortement à bas régime, ce qui rend difficile leur utilisation directe dans des applications nécessitant un fort couple à faible vitesse.
- **Contrôle de vitesse limité sans électronique de puissance** : Contrairement aux moteurs synchrones ou à courant continu, la variation de vitesse requiert l'ajout d'un variateur de fréquence, ce qui augmente la complexité de commande.
- **Facteur de puissance parfois faible à faible charge** : Le moteur absorbe une puissance réactive importante à vide ou sous faible charge, ce qui peut réduire le rendement global de l'installation. [9]

### **VIII. Conclusion**

Le moteur asynchrone est largement utilisé dans l'industrie grâce à ses nombreux avantages (cout, fiabilité et simplicité) reste incontournable dans les applications industrielles. Malgré ses limites de régulation sans électronique de puissance, il s'impose comme un choix rationnel dans la majorité des systèmes électromécaniques. Sa compatibilité avec les variateurs modernes le rend encore plus attractif dans le contexte actuel de maîtrise énergétique.

# **Chapitre 3 : Phénomène de déflagration**

### I. Introduction

Dans les environnements industriels où sont présentes des atmosphères explosibles, la maîtrise des phénomènes de combustion est cruciale pour garantir la sécurité des installations et du personnel. Parmi ces phénomènes, la déflagration constitue l'un des scénarios les plus courants, pouvant entraîner des surpressions importantes et des dommages matériels

### II. Définition d'atmosphère explosive

Une atmosphère explosive désigne un mélange de substances combustibles sous forme de gaz, vapeurs, brouillards ou particules, dispersées dans l'air, où une fois enflammée, l'inflammation se propage rapidement à travers le mélange non consommé.

D'après la directive européenne 1999/92/CE (ATEX 137), on définit une atmosphère explosive comme suit :

« Un mélange, dans des conditions d'atmosphère, de matières combustibles sous forme de gaz, de vapeurs, d'aérosols ou de particules avec l'air, où la combustion se propage à travers l'ensemble du mélange non enflammé après une première inflammation. »

- Pour qu'une atmosphère explosive puisse mener à une explosion, trois facteurs doivent être présents (ceci est connu sous le nom de triangle du feu) :
- Un combustible (gaz, vapeur, particules ou brouillard inflammable),
- Un agent oxydant (habituellement l'oxygène présent dans l'air),
- Un déclencheur d'inflammation (étincelle, feu, surface brûlante, arc électrique, etc.).

Quand ces facteurs coexistent, l'ignition du mélange peut entraîner une déflagration massive, susceptible d'entraîner des dommages matériels significatifs ou même des pertes en vies humaines. [10]

### III. Principe physico-chimique de la déflagration

#### III.1. Mécanismes de base de la combustion

##### III.1.a. Réaction exothermique

La combustion est une réaction chimique exothermique rapide qui se produit entre un combustible et un comburant, produisant :

De la chaleur (énergie thermique),

De l'énergie lumineuse (lumière),

## Chapitre 3 : Phénomène de déflagration

---

Des produits de la combustion tels que les gaz, les suies, etc.

**Exemple standard** : combustion d'un hydrocarbure (méthane CH<sub>4</sub>)



Avec :  $\Delta H > 0$  : réaction exothermique

Cette énergie favorise la diffusion de la flamme dans le mélange.

### III.1.b. Condition nécessaire à la combustion

Trois éléments doivent être réunis, formant le triangle du feu :

#### ➤ Combustible

Substance capable de brûler (gaz, liquide ou solide). Exemples :

Gaz : méthane, propane, hydrogène

Liquide : essence, alcool

Solide : bois, charbon

#### ➤ Comburant

Agent oxydant, le plus souvent :

Oxygène (O<sub>2</sub>) de l'air

Parfois d'autres oxydants (peroxydes, chlore, etc. dans certains milieux chimiques)

#### ➤ Énergie d'activation

Une source d'énergie initiale nécessaire pour amorcer la réaction :

Étincelle

Flamme

Chaleur (surface chaude)

Compression (auto-inflammation)

Sans l'un de ces trois éléments, la combustion ne peut pas démarrer ni se maintenir.

## Chapitre 3 : Phénomène de déflagration

---

### III.1.c. Mécanisme réactionnel simplifié

La combustion se déroule en plusieurs étapes microscopiques :

- Initiation : production de radicaux libres par décomposition thermique (ex. :  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}$ )
- Propagation : réactions en chaîne entre radicaux et molécules stables
- Ramification : création de nouveaux radicaux (ex :  $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}$ )
- Terminaison : combinaison de radicaux pour former des produits stables [11]

### III.2. Propagation de la flamme

Dans un mélange gaz-comburant, une flamme se manifeste lors de la combustion : c'est une région de réaction chimique exothermique qui se diffuse à travers le mélange. Cette diffusion s'appuie sur des transferts de chaleur, le mouvement de masse et la vitesse des réactions chimiques.

#### III.2.a. Vitesse de propagation

La vitesse de propagation de la flamme  $S_{LS\_LSL}$  (appelée aussi vitesse de flamme laminaire) est la vitesse à laquelle la flamme avance dans le mélange gazeux au repos.

#### Caractéristiques :

Typiquement subsonique, dépend de :

- La nature du combustible et du comburant
- La température et pression initiales
- Le rapport de mélange stœchiométrique
- Le degré de turbulence (en écoulement turbulent, la vitesse de flamme peut être fortement augmentée)

#### III.2.b. Phénomène de transfert thermique

- La propagation de la flamme se fait par le biais du transfert thermique vers la zone qui n'est pas encore brûlée.
- Le gaz enflammé, chaud, transmet la chaleur par conduction thermique au gaz non chauffé qui se trouve en amont.
- Quand la température locale atteint l'énergie d'activation, une réaction chimique débute et le périmètre de la flamme se propage.
- C'est ce processus qui autorise la flamme à se maintenir d'elle-même.

## Chapitre 3 : Phénomène de déflagration

---

### III.2.c. Diffusion de masse

La diffusion de la flamme s'effectue par le transfert de chaleur vers la zone non enflammée. Le gaz enflammé et chaud diffuse la chaleur par conduction thermique au gaz non réchauffé situé en amont. Lorsque la température sur place atteint l'énergie d'activation, une réaction chimique commence et la zone de la flamme se diffuse. C'est ce mécanisme qui permet à la flamme de persister par elle-même.

### III.3. Paramètres influents

Lors d'une déflagration, la dynamique de la flamme est fortement influencée par des facteurs géométriques et physico-chimiques. Ces facteurs déterminent la vitesse de propagation, la pression maximale qu'on atteint et les effets mécaniques engendrés par la combustion

#### III.3.a. Température initiale

Une hausse de la température accélère la vitesse des réactions chimiques.

Elle diminue l'énergie nécessaire pour l'activation.

► Impact direct : accroissement de la vitesse de la flamme.

Par exemple, une hausse de la température de 300 K à 500 K peut multiplier par deux ou trois fois la vitesse de propagation pour certains mélanges.

#### III.3.b. Pression initiale

Un accroissement de la densité moléculaire réactive est observé lorsque la pression est augmentée. Cela favorise une combustion plus rapide et plus énergique.

#### Conséquences :

- Augmentation de la vitesse de la flamme.
- Pression de déflagration maximale supérieure.
- Dangers amplifiés pour la solidité mécanique des confinements.

#### III.3.c. Concentration de mélange

Le mélange est stœchiométrique (rapport idéal air/combustible), lorsque la vitesse de combustion atteint son maximum. Hors de cet intervalle, la combustion s'avère incomplète, voire impossible.

### IV. Typologie de déflagration

Le mot « déflagration » fait référence à une combustion qui se propage rapidement, à une vitesse inférieure à celle du son dans le milieu, par un processus essentiellement thermique (conduction et convection). Toutefois, cette diffusion peut se manifester de diverses manières, entraînant des conséquences très variables en fonction du contexte et des conditions initiales.

#### IV.1. Déflagration lente et rapide

##### IV.1.a. Déflagration lente

- Propagation laminaire : front de flamme stable, régulier.
- Vitesse typique : quelques cm/s à quelques m/s.
- Combustion peu turbulente, généralement observée dans des mélanges pauvres ou peu réactifs.
- Surpression générée : faible ( $\approx 0,1-0,5$  bar).
- Peu d'impact mécanique

##### IV.1.b. Déflagration rapide

- Front de flamme turbulent, instable, souvent plissé par des obstacles ou l'environnement.
- Vitesse : jusqu'à plusieurs centaines de m/s, mais toujours subsonique.
- Surpression pouvant atteindre 8 à 10 bar dans un volume confiné.
- Génère des efforts mécaniques significatifs (ondes de pression, vibrations).
- Elle peut évoluer vers un phénomène plus violent si certaines conditions sont réunies

#### IV.2. Déflagration confinée et non confinée

##### IV.2.a. Déflagration confinée

- Le mélange réactif est retenu dans un espace fermé (boîtier, tuyauterie, enveloppe antidéflagrante).
- Il n'est pas possible de relâcher rapidement la pression des gaz brûlés, conduisant ainsi à une accumulation.

##### Risques liés :

- Si la pression dépasse la limite autorisée de confinement, il y aura une rupture mécanique.
- Projection d'éclaboussures, de flammes expulsées par des joints ou des ouvertures.

Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans les zones ATEX.

## **Chapitre 3 : Phénomène de déflagration**

---

### **IV.2.b. Déflagration non confinée**

Les mélanges combustibles dans l'atmosphère ouverte, tels que dans les halls industriels spacieux, brûlent librement où l'air circule sans entrave. Les gaz de combustion s'élèvent et se dissipent facilement sans pression anormale. Cependant, les structures et les obstacles peuvent causer des turbulences qui alimentent les flammes, accélérant potentiellement la déflagration. Dans de tels environnements confinés, même une légère surpression peut devenir problématique. Il importe donc d'évaluer tous les risques d'inflammation là où des substances inflammables sont présentes.

### **IV.3. Transition de la déflagration vers la détonation**

Le passage de la déflagration à la détonation (DDT) est un phénomène craint et périlleux. Elle représente une accélération graduelle du front de flamme qui finit par provoquer une onde de choc supersonique, accompagnée d'une combustion instantanée à très haute pression.

#### **IV.3.a. Phases habituelles de la transition**

- Allumage → combustion lente et laminaire.
- Accroissement de la turbulence → accélération de la flamme (généralement causée par la géométrie ou les obstructions).
- Formation de « coups transitoires » (surpressions temporaires locales).
- Passage à une onde de choc accompagnée d'un front de flamme couplé → détonation.

#### **IV.3.b. Conditions propices à la DDT**

- Un long tube confiné (un rapport longueur/diamètre élevé),
- Existence d'obstacles tels que des grilles, des coudes ou des échangeurs.
- Mélange stœchiométrique ou en excès,
- Allumage anticipé, offrant une longue phase d'accélération

## Chapitre 3 : Phénomène de déflagration

### IV.3.c. Comparaison déflagration vers détonation

Propriétés	Déflagration	Détonation
Vitesse de flamme	Subsonique	Supersonique
Mode de propagation	Conduction + convection	Onde de choc couplée
Pression générée	Jusqu'à 100 bar	Jusqu'à 20-100 bar
Durée d'action	Millisecondes	Microsecondes
Risque mécanique	Élevé	Extrême

Tableau IV-1: représente la différence entre déflagration et détonation

La ddt est rare mais peut être déclenchée dans certaines installations mal conçues ou mal protégées. Elle est donc un point clé dans l'évaluation des risque ATEX [12]

## V. Conséquences mécaniques de la déflagration

Bien que la déflagration soit définie comme étant subsonique, peut provoquer une surpression significative dans les espaces confinés. Cette surpression engendre des tensions mécaniques violentes sur les structures alentour. Il est crucial de comprendre ces conséquences pour la conception des protections antidéflagrantes et l'évitement des dangers industriels.

### V.1. Surcharge de pression dans un volume confiné

Lors ce qu'une déflagration se produit dans un volume fermé ou faiblement ventilé, les gaz de la combustion ne peuvent pas s'échapper immédiatement, ce qui engendre une augmentation rapide de la pression

#### Caractéristiques principales :

- Pression de pic typique :
  - **Déflagration lente** : 0,5 à 2 bar.
  - **Déflagration rapide** : jusqu'à 8–10 bar.
- Temps de montée en pression : quelques millisecondes.
- Le volume, la vitesse de propagation de la flamme, et la configuration géométrique conditionnent l'ampleur de la surcharge.

### V.2. Effets sur les structures et matériaux

- Si le matériau n'est pas conçu pour supporter la pression, il subira soit une déformation plastique, soit une rupture fragile des parois.

## **Chapitre 3 : Phénomène de déflagration**

---

- Défaillance des joints, brides ou soudures due au changement de pression.
- Usure mécanique accélérée si les détonations sont fréquentes.
- Propagation de fissures dans des matériaux hétérogènes ou vieillissants.
- Existence d'entraves internes (amplification de la flamme).

### **V.3. Risques pour la sécurité des équipements et des personnes**

#### ➤ **Pour les équipements**

- Dommages internes irréversibles (câblage, composants moteurs, capteurs...),
- Altération des systèmes de confinement,
- Risque d'effet domino si les explosions se propagent (via conduits ou câbles communs),
- Défaillance des systèmes de sécurité instrumentés

#### ➤ **Pour les personnes**

- Risque de traumatismes auditifs ou corporels dus à l'onde de pression,
- Brûlures en cas de propagation de flamme à travers les joints ou orifices non étanches,
- Projections de débris si rupture du confinement,
- Risque accru en cas de présence de poussières combustibles ou d'atmosphères secondaires inflammables. [13]

## **VI. Cas particulier : déflagration dans une enveloppe antidéflagrante**

Dans les zones ATEX, où un mélange explosif est susceptible de se produire, le danger d'une détonation interne dans des appareils électriques ou électroniques n'est pas à prendre à la légère. L'une des mesures de sécurité les plus efficaces consiste à déployer un boîtier antidéflagrant (protection de type Ex d), prévu pour contenir une explosion sans qu'elle ne s'étende à l'extérieur.

### **VI.1. Fonctionnement et rôle de l'enveloppe antidéflagrante**

#### **VI.1.a. Principe général**

L'enveloppe antidéflagrante est conçue pour :

- Contenir l'explosion interne en résistant à la pression maximale de déflagration
- Empêcher la transmission de l'explosion vers l'extérieure, via des interstices de sécurité (joints, filetages).
- Refroidir les gaz chauds à travers ces interstices.

## **Chapitre 3 : Phénomène de déflagration**

---

### **VI.1.b. Rôle de l'enveloppe**

- Elle autorise l'emploi de composants standards à l'intérieur, même s'ils risquent de générer des arcs, des étincelles ou des surchauffes.
- L'enveloppe sert de tampon physique et thermique entre la zone explosive et l'élément déclencheur de l'inflammation.

### **VI.2. Comportement de la flamme et des gaz de combustion dans un volume clos**

Lors d'une déflagration interne, plusieurs phénomènes physiques et thermodynamiques se produisent :

#### **VI.2.a. Propagation de la flamme**

La flamme produit une onde de pression (souvent <10 bar dans les cas typiques), une élévation brutale de température (> 2000 °C) et une libération de gaz chauds

#### **VI.2.b. Comportement des gaz**

Sous l'effet de la combustion, les gaz produits se dilatent brutalement, entraînant une élévation rapide de la pression à l'intérieur de l'enveloppe.

Le confinement mécanique de cette dernière contraint alors les gaz chauds à s'échapper uniquement par des voies de dégagement prédéfinies, telles que les filetages ou les surfaces de contact étroites.

Ces chemins de fuite, dimensionnés avec une grande précision, permettent un refroidissement efficace des gaz par conduction thermique au contact des parois métalliques. Ce processus réduit la température des gaz en dessous du seuil d'auto-inflammation, empêchant ainsi la propagation de la flamme vers l'extérieur.

### **VI.3. Risque en cas de conception inadéquate**

- Rupture mécanique de l'enveloppe
- Transmission de la flamme vers l'extérieur
- Dommages aux composants internes [14]

## **VII. Conclusion**

Le phénomène de déflagration, bien que moins violent qu'une détonation, représente un risque majeur dans les atmosphères explosibles. Sa compréhension est essentielle pour concevoir des systèmes de protection efficaces, notamment dans les environnements industriels soumis à la directive ATEX. L'étude de ses mécanismes, vitesse de propagation, génération de

### **Chapitre 3 : Phénomène de déflagration**

---

pression, comportement des gaz, permet de mieux anticiper ses effets et de mettre en place des dispositifs adaptés, tels que les enveloppes antidéflagrantes.

**Chapitre 4 : Analyse et application de  
la réglementation ATEX dans la  
conception d'équipements pour  
atmosphères explosibles**

## **Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles**

---

### **I. Introduction**

Les atmosphères explosibles représentent un risque majeur dans de nombreux environnements industriels. Pour prévenir les explosions et garantir la sécurité, la réglementation ATEX encadre strictement la conception et l'utilisation des équipements dans ces zones. Ce chapitre vise à analyser les principes de cette réglementation et à évaluer son application concrète dans la conception d'équipements adaptés, tout en ouvrant la réflexion sur les améliorations possibles en matière de protection et de modélisation. (Voir un extrait de la norme IEC 60079-1 dans l'annexe A)

### **II. Cadre réglementaire ATEX**

#### **II.1. Genèse des directives européennes**

La réglementation concernant les atmosphères explosives, communément appelée « ATEX », est basée sur deux directives européennes essentielles :

- ❖ **La directive 1999/92/CE du 16 décembre 1999**, « concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphère explosive »
- ❖ **La directive 94/9/CE du 23 mars 1994**, « concernant le rapprochement des législations des Etats membres pour les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés dans les atmosphères explosives »

#### **II.2. Objectifs et principes**

Selon ses directives, les intéressés ont procédé à l'évaluation des risques spécifiques créés par les atmosphères explosives. Ils doivent prendre les mesures technique et organisationnelles appropriées sur la base des principes suivants :

- Empêcher la formation d'atmosphère explosives
- Si la nature de l'activité ne permet pas d'empêcher la formation d'atmosphère explosive, éviter leur inflammation
- Atténuer les effets nuisibles d'une explosion pour la santé et la sécurité des travailleurs

## **Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles**

---

Les directives ATEX poursuit des objectifs clairs :

- Prévenir les risques d'explosion dans les lieux de travail
- Protéger les travailleurs et les installations
- Harmoniser les exigences de mise sur le marché des équipements

### **II.3. Obligation des employeurs et fabricant**

#### **II.3.a. Employeurs (directive 1999/92/CE)**

- Identifier les zones ATEX
- Classifier ces zones et les signaler
- Tenir à jour un document de protection contre les explosions
- Utiliser des équipements certifiés conformes à la zone d'utilisation
- Former et informer les travailleurs
- Mettre en œuvre des mesures de prévention et de protection adaptées.

#### **II.3.b. Fabricants (Directive 2014/34/UE)**

- Concevoir des équipements sûrs et adaptés aux conditions d'utilisation en zones ATEX
- Procéder à une évaluation de conformité (auto-certification ou via un organisme notifié selon la catégorie)
- Fournir une documentation technique complète
- Marquer les produits avec les mentions CE, ATEX, groupe, catégorie, et mode de protection

### **II.4. Articulation avec d'autres norme (IECEX, ISO, NFPA,)**

Le cadre ATEX est également en phase avec d'autres systèmes de normalisation internationale, ce qui renforce la consistance des exigences techniques et facilite les transactions commerciales :

- **IECEX** : Système de certification volontaire mis en place par la Commission Électrotechnique Internationale (IEC). Très utilisé hors Europe, notamment en Australie, au Moyen-Orient et en Asie. Bien que distinct d'ATEX, il est techniquement équivalent sur de nombreux points (notamment via les normes IEC 60079)

## Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles

- **ISO** : Certaines normes ISO traitent des atmosphères explosibles, en particulier les poussières combustibles. Elles sont parfois complémentaires aux normes IEC.
- **NFPA** : organisation américaine National Fire Protection Association édicte des normes de sécurité, dont la **NFPA 70 (NEC)** et la **NFPA 499** relatives aux zones dangereuses. Les classifications (Division 1 & 2) y diffèrent de la logique européenne (zones 0/1/2).

### III. Classification des zones ATEX

#### III.1. Critères de classification

Les zones ATEX sont classées en fonction de :

- La fréquence d'apparition d'une atmosphère explosible
- La durée pendant laquelle cette atmosphère peut persister

Ces critères visent à estimer le niveau de risque dans chaque partie d'une installation

Niveau de risque	Présence d'atmosphère explosible	Fréquence/durée	Type de zone
Elevé	Continue	$\geq 1000\text{h/an}$	Zone 0/ zone 20
Modéré	Occasionnelle	10-1000h/an	Zone 1/ zone 21
Faible	Rare	$\leq 10\text{h/an}$	Zone 2/ zone 22

*Tableau III-1: représente l'estimation de niveau de risque de chaque zone*

#### III.2. Zone gaz (0,1,2) et poussières (20,21,22)

##### III.2.a. Zone pour gaz

- **Zone 0** : Présence continue ou fréquente d'un mélange explosif (ex : intérieur d'un réservoir de gaz)
- **Zone 1** : Présence probable en fonctionnement normal (ex : à proximité d'une vanne de gaz)
- **Zone 2** : Présence improbable en fonctionnement normal, ou brève (ex : environnement général d'une station de pompage)

## Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles

### III.2.b. Zone pour poussière

- **Zone 20** : emplacement où une atmosphère explosible sous forme de nuage de poussières combustible, est présente dans l'air en permanence pendant de longue durée ou fréquemment
- **Zone 21** : emplacement où une atmosphère explosible sous forme de nuage de poussières combustible, est susceptible de se présenter occasionnellement en fonctionnement normal
- **Zone 22** : emplacement où une atmosphère explosible sous forme de nuage de poussières combustible, n'est pas susceptible de se présenter en fonctionnement normal.

### III.3. Méthodologie de zonage (analyse de risque)

La méthodologie d'évaluation des zones ATEX basée sur les étapes suivantes :

- Identification des sources de dégagement
- Caractérisation des substances inflammables
- Evaluation de la ventilation
- Estimation de la fréquence et la durée d'émission
- Délimitation des zones
- Vérification de la compatibilité des équipements installés dans chaque zone

Le tableau ci-dessous représente une synthèse selon IEC 60079-10-1 (gaz) & 10-2 (poussières)

<b>Paramètre analysé</b>	<b>Influence sur la classification</b>
<b>Type de produit</b>	Gaz, vapeur, brouillard, poussière
<b>Quantité libérée</b>	Proportion de volume potentiellement explosive
<b>Fréquence de libération</b>	Critère principal de zonage
<b>Durée de présence</b>	Classification des zones
<b>Ventilation (naturelle/ forcée)</b>	Réduire ou étend la zone
<b>Mode de fonctionnement</b>	Normal/ anormal/ accidentel

*Tableau III-2: représente une synthèse selon IEC 60079-10*

## **Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles**

---

### **IV. Choix et conception des équipements ATEX**

Le choix des dispositifs électriques et mécaniques dans les zones ATEX est soumis à des normes rigoureuses établies par les directives de l'Union européenne 2014/34/UE (ATEX 2014) et les standards IEC 60079-x. Ces critères prennent en considération le degré de risque, la zone de classification, la nature de l'atmosphère explosive (gaz ou poussière) ainsi que les systèmes de protection appropriés.

#### **IV.1. Groupes et catégories des équipements**

Les équipements destinés à être utilisés en atmosphère explosive sont classés par :

- Leur groupe : en fonction du secteur d'activité (mines ou industrie de surface)
- Leur catégorie : en fonction du niveau de protection requis, lié à la zone ATEX où l'équipement sera utilisé

##### **IV.1.a. Groupe d'appareil I**

La catégorie d'appareils M1 sont destinés aux travaux souterrains des mines et aux parties de leur installations de surface mis en danger par le grisou ou des poussières combustibles

La catégorie d'appareils M2 sont destinés aux travaux souterrains des mines et aux parties de leur installations de surface susceptibles d'être mis en danger par le grisou ou des poussières combustibles

##### **IV.1.b. Groupe d'appareil II**

La catégorie d'appareils 1 : sont destinés à un environnement dans lequel des atmosphères explosives dues à des mélanges d'air avec des gaz, vapeur, brouillard ou poussière sont présentes constamment, ou pour une longue période ou fréquemment

La catégorie d'appareils 2 : sont destinés à un environnement dans lequel des atmosphères explosives dues à des mélanges d'air avec gaz, vapeur, brouillard ou poussière se manifesteront probablement

La catégorie d'appareils 3 : sont destinés à un environnement dans lequel des atmosphères explosives dues à des mélanges d'air avec gaz, vapeur, brouillard ou poussière ont une faible probabilité de se manifester et ne subsisteront que pour une courte durée

## **Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles**

---

### **IV.2. Mode de protection**

Pour les équipements du Groupe II, plusieurs modes de protection sont définis par la norme **IEC 60079**, chacun visant à empêcher l'inflammation d'une atmosphère explosive

Mode	Désignation	Principe
Ex d	Antidéflagrante	L'explosion est confinée à l'intérieur de l'enveloppe sans se propager à l'extérieur
Ex e	Sécurité augmentée	Empêche la création d'arc ou de température élevées
Ex i	Sécurité intrinsèque	L'Energie des circuits est limitée en dessous du seuil d'inflammation
Ex p	Pressurisation	L'intérieur est maintenu sous une légère surpression pour empêcher la pénétration de gaz dangereux
Ex n	Protection simplifier	Destinée aux zone 2, avec exigences réduites

*Tableau IV-1: les modes de protection des équipements de groupe II*

Dans le cas des moteurs électriques en zones ATEX, le mode Ex d (antidéflagrant) est le plus utilisé. Il suppose une conception robuste de l'enveloppe, capable de résister à une explosion interne sans fuite d'étincelle ou de flamme.

### **IV.3. Classe de température**

Différentes substances peuvent brûler à différentes températures. Plus la température élevée la combustion est basse, plus la substance est dangereuse. Par conséquent, chaque équipement utilisé dans un environnement explosif est classé en fonction de la température de surface maximale qu'il génère. La température de surface maximale de l'équipement doit toujours être bien inférieure à la température d'inflammation des gaz présents.

## Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles

---

Classe de température	Température de surface maximale de l'équipement (C)	Température d'inflammation des substance inflammables (C)
T1	450	450
T2	300	300 450
T2	280	280 300
T2	260	260
T2	230	230
T2	215	215 230
T3	200	200 215
T3	180	180 200
T3	165	165 180
T3	160	160 165
T4	135	135 160
T4	120	120 135
T5	100	100 120
T6	85	85 100

Tableau IV-2: représente les températures de surface et la température d'inflammation

### IV.4. Marquage ATEX et signification

Chaque équipement certifié ATEX porte un marquage codifié qui fournit des informations précises sur :

- Son domaine d'application (groupe et catégorie)
- La nature du risque (gaz ou poussière)
- Le mode de protection utilisé
- Le niveau de température
- Le groupe de gaz

## Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles

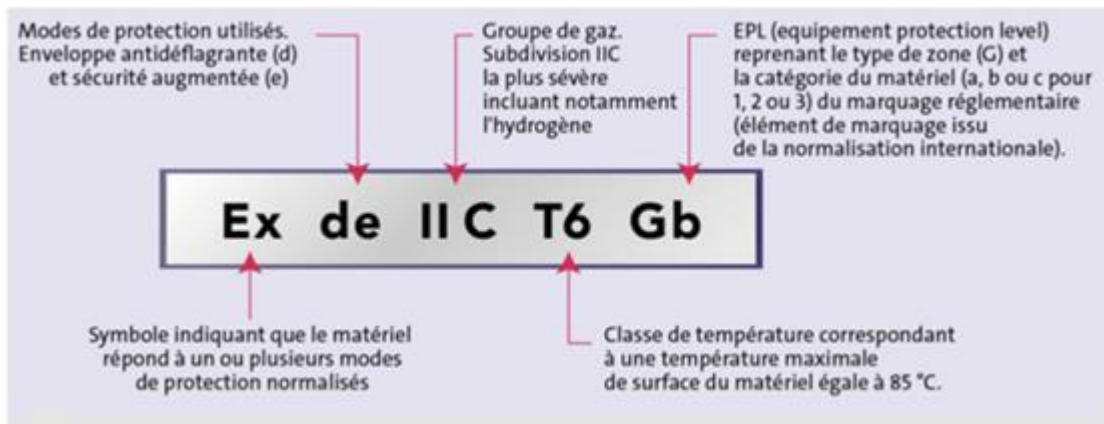


Figure IV-1: représente un exemplaire d'étiquette ATEX

### Exemple de marquage :

II 2 G Ex d IIB T4 Gb

Éléments	Signification
II	Groupe II (industrie de surface)
2	Catégorie 2- Zone 1
G	Atmosphère gazeuse
Ex d	Mode antidéflagrant
IIB	Groupe de gaz (éthylène, méthanol)
T4	Classe de température (max 135 C°)
Gb	Niveau de protection élevé pour gaz

Tableau IV-3: représente la signification des éléments de cette exemple de marquage

### IV.5. Evaluation de conformité et certification

La commercialisation d'un équipement destiné à une atmosphère explosive requiert une évaluation de conformité conformément aux exigences de la **directive 2014/34/UE**. Cette démarche vise à garantir que l'équipement offre un niveau de sécurité adapté aux risques présents dans les zones classées.

## **Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles**

---

### **IV.5.a. Procédures selon la catégorie d'équipement**

<b>Catégorie</b>	<b>Procédure applicable</b>
<b>Cat 1 et 2</b>	Intervention obligatoire d'un organisme notifié pour l'examen CE de type, le contrôle de production ou l'assurance qualité
<b>Cat 3</b>	Possibilité de certification en interne par le fabricant, sous réserve de constituer un dossier technique complet

*Tableau IV-4: représente te la procédure selon la catégorie*

### **IV.5.b. Contenu de la documentation technique ATEX**

Le dossier technique à élaborer doit inclure les éléments suivants :

- Une description détaillée de l'équipement, de sa conception et de son principe de fonctionnement.
- L'analyse des risques et les mesures de prévention mises en œuvre.
- Les plans, schémas techniques, ainsi que le mode de protection ATEX utilisé (Ex d, Ex e, etc.).
- Les résultats d'essais et de vérifications réalisés selon les normes harmonisées (ex. : IEC 60079).
- La déclaration UE de conformité, attestant que l'équipement respecte l'ensemble des exigences applicables.
- Le manuel utilisateur ATEX, avec instructions de sécurité, conditions d'utilisation et maintenance.
- Le marquage CE accompagné du marquage ATEX, apposé sur l'équipement.

## **V. Limite et enjeux actuels de la réglementation**

### **V.1. Problèmes d'interprétation ou d'application sur le terrain**

Malgré un cadre réglementaire bien établi, l'application des directives ATEX (en particulier la 2014/34/UE) pose encore des difficultés pratiques :

## **Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles**

---

- **Variabilité des interprétations** : Certains termes restent ambigus (ex. « fréquence de présence d'une atmosphère explosive »), ce qui peut conduire à des classifications de zones différentes selon les entreprises ou pays.
- **Méconnaissance sur le terrain** : Les opérateurs ou sous-traitants manquent parfois de formation ATEX, ce qui entraîne des erreurs dans l'installation, la maintenance ou l'utilisation des équipements certifiés.
- **Documentation incomplète ou mal utilisée** : Les notices et certificats ne sont pas toujours exploités correctement lors de la mise en service, ce qui nuit à la sécurité réelle des installations.
- **Incohérences entre normes nationales et européennes** : La cohabitation avec d'autres référentiels (IECEX, NFPA, ISO) peut entraîner des confusions lors de projets internationaux.

### **V.2. Contraintes économiques et technologiques**

L'adoption de la réglementation ATEX implique des investissements importants, qui peuvent être un frein à l'innovation ou à la modernisation d'équipements :

- **Coûts élevés de certification** : Les essais, la conception renforcée (Ex d, Ex e...), la documentation technique et l'intervention des organismes notifiés représentent un coût significatif, en particulier pour les PME.
- **Temps de mise sur le marché allongé** : La phase de conception, tests et validation est plus longue, ce qui limite la réactivité des fabricants.
- **Technologies limitées ou retardées** : Certaines innovations (ex. électronique de puissance, capteurs sans fil, moteurs à haut rendement) ne sont pas toujours faciles à rendre compatibles avec les exigences ATEX sans compromis sur les performances.
- **Obsolescence réglementaire** : La directive actuelle peine à intégrer certains matériaux ou technologies émergentes, nécessitant des procédures dérogatoires ou de longues validations.

## **Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles**

---

### **V.3. Evaluation attendues du cadre réglementaire**

Face à ces limites, des évolutions réglementaires sont en cours de réflexion ou attendues dans les prochaines années :

- **Harmonisation renforcée** entre les normes ATEX et IECEx, pour faciliter les échanges internationaux et réduire les surcoûts liés à la double certification.
- **Clarification de certains termes techniques** dans les directives pour éviter les erreurs d'interprétation (fréquence d'exposition, groupes de gaz...).
- **Intégration des risques émergents** : comme les batteries lithium-ion, les composants électroniques miniaturisés ou les équipements connectés.
- **Simplification des procédures pour les équipements de Catégorie 3**, avec une standardisation plus poussée des essais ou des guides techniques mieux vulgarisés.

### **V.4. Perspectives de digitalisation**

La digitalisation ouvre de nouvelles perspectives pour améliorer la conformité et la sécurité ATEX, tout en réduisant les coûts :

- Jumeaux numériques : permettent de modéliser le comportement d'un équipement en zone ATEX avant sa fabrication réelle. Ils facilitent :
  - L'analyse de risques anticipée,
  - La validation virtuelle de conceptions antidéflagrantes,
  - La traçabilité numérique des équipements.
- Intégration de capteurs certifiés ATEX capables de transmettre des données de température, vibration ou pression.
- Surveillance en temps réel de l'état de fonctionnement, permettant une maintenance prédictive dans le respect des conditions ATEX.
- Plateformes de gestion documentaire numérique : centralisation des certificats, plans, notices, historique de maintenance, facilitant les audits de conformité.

## **Chapitre 4 : Analyse et application de la réglementation ATEX dans la conception d'équipements pour atmosphères explosibles**

---

### **VI. Conclusion**

La réglementation ATEX encadre de manière rigoureuse la conception, l'utilisation et la certification des équipements en atmosphères explosives. Elle garantit un haut niveau de sécurité tout en imposant des exigences techniques et documentaires strictes. Malgré certaines limites pratiques et économiques, ce cadre reste essentiel pour prévenir les risques industriels et doit continuer d'évoluer face aux défis technologiques et à la digitalisation croissante des installations.

# **Chapitre 5 : Etude théorique et simulation SolidWorks**

### I. Introduction

Dans les installations industrielles situées en atmosphères explosibles, l'utilisation des moteurs électrique standards représente un risque d'inflammation. Ce risque devient critique en présence de gaz inflammables. Pour garantir la sécurité, les équipements doivent être conçus selon des modes de protection rigoureux, dont le plus répandu est le mode antidéflagrant « Ex d »

Ce chapitre présente l'étude théorique suivi d'une modélisation par élément finis avec le logiciel SolidWorks Simulation, portant sur une enveloppe antidéflagrante pour un moteur asynchrone triphasé utilisé en atmosphère explosive de type gaz méthane en zone 1.

### II. Présentation du contexte

Le moteur asynchrone triphasé de 22KW est fréquemment utilisé dans les procédés industriels pour l'entraînement de pompes, ventilateurs, convoyeurs, etc. Cependant, dans les environnements contenant des gaz inflammables, une simple étincelle électrique peut causer une explosion

La directive ATEX 2014/34/UE impose alors que ses moteurs soient conçus pour fonctionner en toute sécurité.

Le moteur étudié est destiné à la zone 1, ce qui nécessite un niveau de protection élevé (niveau de protection Gb) et donc l'utilisation de cette enveloppe sera certifiée Ex d

#### ❖ Définition de mode de protection « d »

Le mode de protection « d », selon la norme IEC 60079-1, consiste à contenir l'explosion interne d'un mélange explosif sans qu'elle ne se propage à l'environnement extérieur. Cela repose sur deux principes fondamentaux :

Confinement à la surpression générée par la déflagration dans une enveloppe mécaniquement résistante

Refroidissement de la flamme via des chemins de fuites étroits et longs, empêchant la transmission de l'inflammation à l'extérieur

## Chapitre 5 : Etude théorique et simulation SolidWorks

Les enveloppes doivent être conçus pour résister à une pression d'essai sans rupture, ni déformation permanente, ni fuite de flamme. Le choix des matériaux, les épaisseurs de paroi et les filetages sont donc des paramètres critiques.

### III. Description de moteur, objectif d'étude et de son application

#### III.1. Caractéristiques du moteur

Le moteur étudié est un moteur asynchrone triphasé d'une puissance de 22 kW, conçu pour une tension d'alimentation de 400 V à 50 Hz. Il s'agit d'un moteur à cage d'écureuil, à refroidissement externe par ventilateur (type IC411) et montage horizontal (IM B3), largement utilisé dans les applications industrielles (pompes, compresseurs, convoyeurs). Les principales caractéristiques techniques sont les suivantes :

Paramètres	Spécification
Type	Moteur asynchrone triphasé
Puissance	22KW
Tension	400V/50Hz
Vitesse de rotation	1500 tr/min
Classe d'isolation	F
Rendement	
Refroidissement	IC411 autoventilé
Indice de protection	IP55
Température max en service	135 (T4)
Type de protection	Ex d I T4 Gb (méthane)

Tableau III-1:représente les caractéristiques techniques de ce moteur

Ce moteur est équipé d'une enveloppe antidéflagrante « d », permettant son installation en zone ATEX gaz, avec un haut niveau de protection (niveau de protection Gb)

### III.2. Environnement d'installation

#### III.2.a. Type de zone

Le moteur étudié est destiné à être exploité dans une **zone d'extraction pétrolière située dans le Sud algérien**, classée **zone 1 ATEX** selon la directive 1999/92/CE (ATEX 137) et la norme EN 60079-1. Dans ce type de zone, la présence d'une atmosphère explosive (mélange air/gaz) est **occasionnelle en fonctionnement normal**, en raison des dégagements d'hydrocarbures ou de gaz associés à l'exploitation pétrolière.

#### III.2.b. Gaz concerné

L'environnement de l'enveloppe dans cette région expose le moteur à des risques liés à :

Au méthane (CH<sub>4</sub>), principal composant du gaz naturel, classé groupe IIA

Le dimensionnement de l'enveloppe antidéflagrante tiendra compte prioritairement du méthane, car c'est le gaz le plus fréquemment rencontré sur les sites d'exploitation pétrolière algériens. Sa pression maximale de déflagration et ses caractéristiques (MESG, température d'auto-inflammation) imposent le respect strict des exigences de la norme IEC 60079-1.

#### III.2.c. Contrainte environnementale

En zone saharienne, les contraintes spécifiques sont :

- Températures ambiantes élevées, pouvant dépasser 50 °C en été
- Importantes variations thermiques, pouvant engendrer dilatations et contraintes mécaniques
- Atmosphère très sèche et poussiéreuse, favorisant l'encrassement des ouvertures et des joints
- Possible présence de sable abrasif, nécessitant un indice de protection IP élevé (IP55)

### IV. Conception

#### IV.1. Matériaux

Le choix des matériaux doit garantir :

- Une résistance mécanique suffisante pour supporter la pression d'explosion (1.0 MPa avec un coefficient d'essai de 1,5),
- Une bonne tenue à la corrosion, notamment en présence d'hydrocarbures, d'humidité et de poussières abrasives,
- Une stabilité dimensionnelle aux températures élevées (jusqu'à 50 °C ambiant).

La fonte grise (EN-GJL-250) est souvent utilisée pour les enveloppes antidéflagrantes des moteurs de moyenne puissance, en raison de sa bonne résistance mécanique et de son aptitude au moulage.

#### IV.2. Chemin de gaz (flame paths)

Les chemins de gaz, ou *flame paths*, sont les interstices à travers lesquels les gaz chauds issus d'une explosion interne pourraient tenter de s'échapper. Leur dimensionnement est crucial :

- La longueur de ces chemins est suffisante pour refroidir les gaz chauds par contact avec les parois
- Le jeu (distance entre deux surfaces mobiles ou fixes) est limité pour éviter la propagation de la flamme vers l'extérieur

Pour notre gaz (méthane), la norme IEC 60079-1 fixe typiquement :

- **Longueur de chemin**  $\geq 12,5$  mm
- **Jeu maximal**  $\leq 0,2$  mm

### IV.3. Calcul et vérification normative

La conception d'une enveloppe antidéflagrante ne peut se limiter à des hypothèses théoriques ; elle doit être validée par des calculs et vérifications conformes aux exigences de la norme IEC 60079-1, pour garantir la sécurité en cas de déflagration interne.

## V. Calcul de vérification

### V.1. Calcul la pression d'explosion interne présumée

Pour le méthane, considéré comme le gaz explosif le plus représentatif d'une exploitation pétrolière, la pression maximale de déflagration dans une enceinte confinée est classiquement estimée à 1 1,0MPa.

En tenant compte du coefficient imposé par la norme IEC 60079-1, la pression d'essai à laquelle l'enveloppe doit résister est donc :

$$P_{\text{essai}} = 1,5 \times 1,0 \text{MPa} = 1,5 \text{MPa}$$

Cette valeur servira de référence pour le calcul de l'épaisseur minimale et la vérification des contraintes.

### V.2. Vérification de la résistance mécanique de l'enveloppe

L'enveloppe, considérée comme un cylindre épais soumis à une pression interne, doit être vérifiée pour :

- L'épaisseur des parois,
- Les contraintes maximales (contrainte circonférentielle, équivalente de Von Mises),
- Les déplacements et la déformation,
- Le respect des essais d'éclatement imposés par la norme.

La pression d'éclatement théorique d'un cylindre épais peut se calculer avec la formule de Lamé :

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot R_0^2 + R_i^2}{R_0^2 + R_i^2}$$

Où

- $\sigma_\theta$  = contrainte circonférentielle
- P = pression interne
- Ri = rayon intérieur
- Ro = rayon extérieur à déterminer

La résistance à l'éclatement est ensuite validée par un essai réel à la pression d'essai de 1,5 MPa.

### V.3. Calcul de la contrainte équivalente de Von Mises

La contrainte de Von Mises est utilisée pour vérifier la résistance globale de la paroi, en tenant compte :

- De la contrainte circonférentielle
- De la contrainte longitudinale
- De la contrainte radiale

$$\sigma_{vom} = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_z^2 - \sigma_\theta \sigma_z}$$

Cette valeur doit rester inférieure à la limite élastique du matériau, divisé d'un coefficient de sécurité.

### V.4. Résultat du dimensionnement analytique

#### V.4.a. Epaisseur minimale des parois

L'épaisseur minimale des parois a été déterminée selon la formule de Lamé appliquée au cylindre épais. Pour Ri=309,95mm, P=1,5 MPa et  $\sigma_{adm}=165.6$ MPa, on obtient une épaisseur minimale théorique de 1.3 mm

Bien que l'épaisseur minimale théorique des parois, calculée à 1.3mm selon les équations de Lamé, permettrait de résister à la pression d'explosion interne. Toutefois, dans un souci de sécurité, de conformité aux essais normatifs et de robustesse mécanique, une épaisseur de 10 mm a été retenue. Ce choix prend en compte les contraintes d'usage, la durabilité de

l'enveloppe en zone ATEX et l'environnement d'exploitation spécifique au sud algérien. Cette surépaisseur permet également d'absorber les éventuels défauts de fabrication et les contraintes supplémentaires non modélisées

### V.4.b. Contrainte des parois

Les contraintes principales agissant dans la paroi de l'enveloppe antidéflagrante ont été déterminées en considérant le cylindre comme un réservoir mince soumis à une pression interne.

Les calculs détaillés figurent à l'Annexe A, et permettent d'obtenir les valeurs suivantes pour une épaisseur normative de 10 mm :

- **Contrainte circonférentielle** :  $\sigma_{\theta}=23,2$  MPa
- **Contrainte longitudinale** :  $\sigma_L=11,6$  MPa
- **Contrainte équivalente de Von Mises** :  $\sigma_{vom}=20,1$  MPa

Ces valeurs sont nettement inférieures à la contrainte admissible retenue pour la fonte GJL-250 ( $\sigma_{adm}=165.6$  MPa).

L'épaisseur de 10 mm, imposée par la norme **IEC 60079-1**, garantit donc la sécurité mécanique et réglementaire de l'enveloppe, indépendamment du calcul théorique qui donnerait une valeur minimale de 1.3 mm.

❖ Les détails de calcul sont démontrés en Annexe B

## VI. Conception de l'enveloppe antidéflagrante sur SolidWorks

### VI.1. Carcasse

La carcasse constitue le corps principal de l'enveloppe antidéflagrante. Elle supporte le stator du moteur, assure la dissipation thermique et forme la barrière de confinement autour de la zone où une explosion interne peut se produire

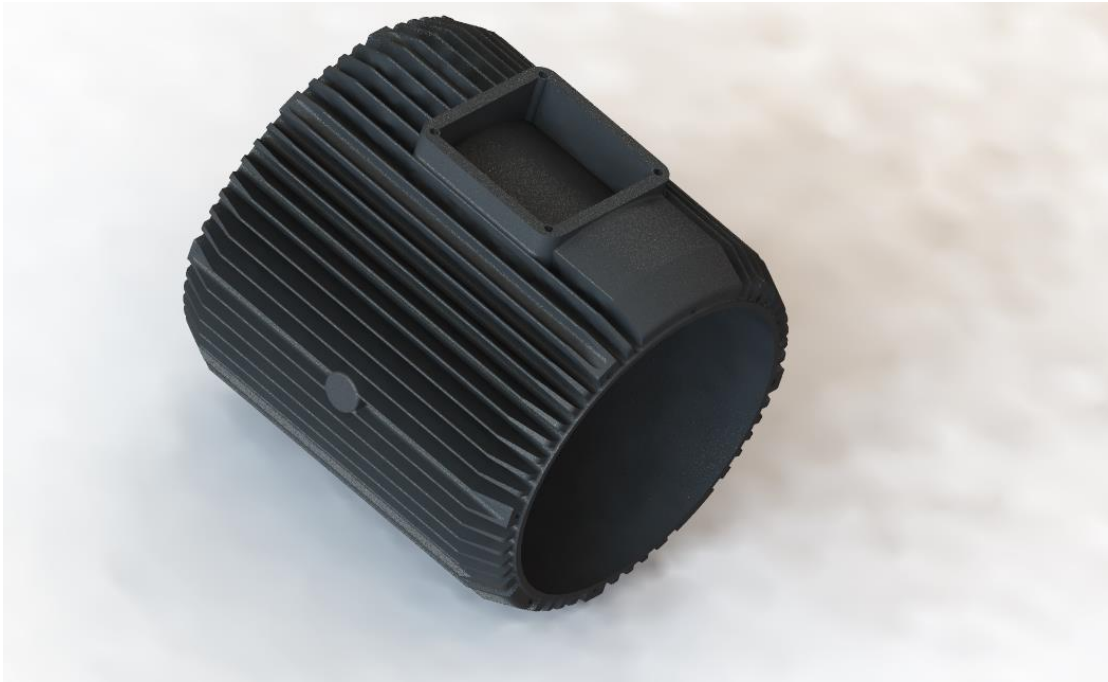


Figure VI-1: représente la carcasse de ce moteur

### VI.2. Flasque

Les flasques sont des couvercles mécaniques fixés aux extrémités de la carcasse. Leur conception doit garantir des chemins de gaz conformes (jeux et longueurs) pour éviter toute propagation de flamme vers l'extérieur

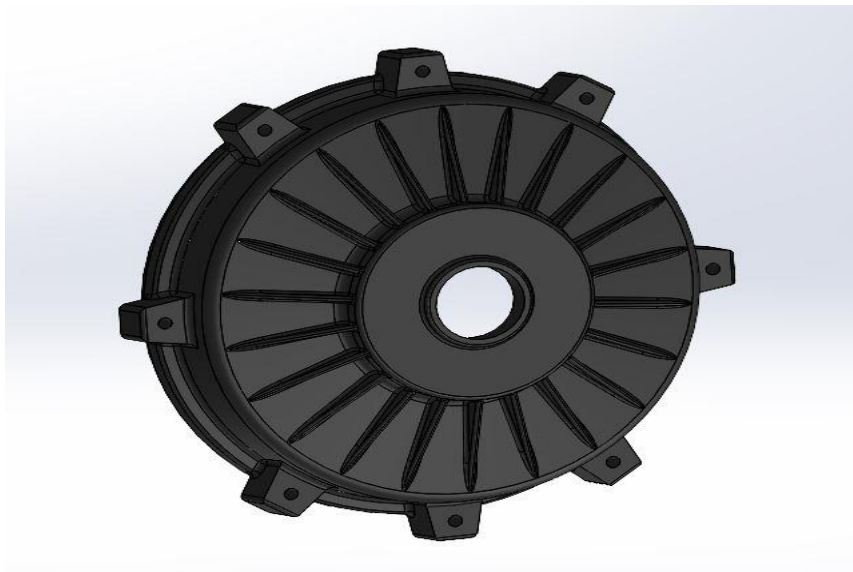


Figure VI-2: représente le flasque

### VI.3. Plaque de séparation

Cette plaque permet d'isoler électriquement et mécaniquement la zone moteur de la boîte à bornes tout en respectant les exigences de protection antidéflagrante. Elle empêche qu'une explosion dans la carcasse se propage vers la boîte à bornes



*Figure VI-3: représente la plaque de séparation de ce moteur*

### VI.4. Enveloppe

L'enveloppe antidéflagrante a pour rôle de contenir une explosion interne qui pourrait se produire par suite de l'inflammation d'un gaz ou d'une poussière.

Elle est conçue pour résister à la pression interne sans se rompre et pour empêcher la propagation de la flamme vers l'extérieur grâce à des interstices calibrés.

Ainsi, elle garantit la sécurité des installations et des personnes dans les zones à atmosphère explosive, conformément aux normes ATEX/IEC 60079-1.

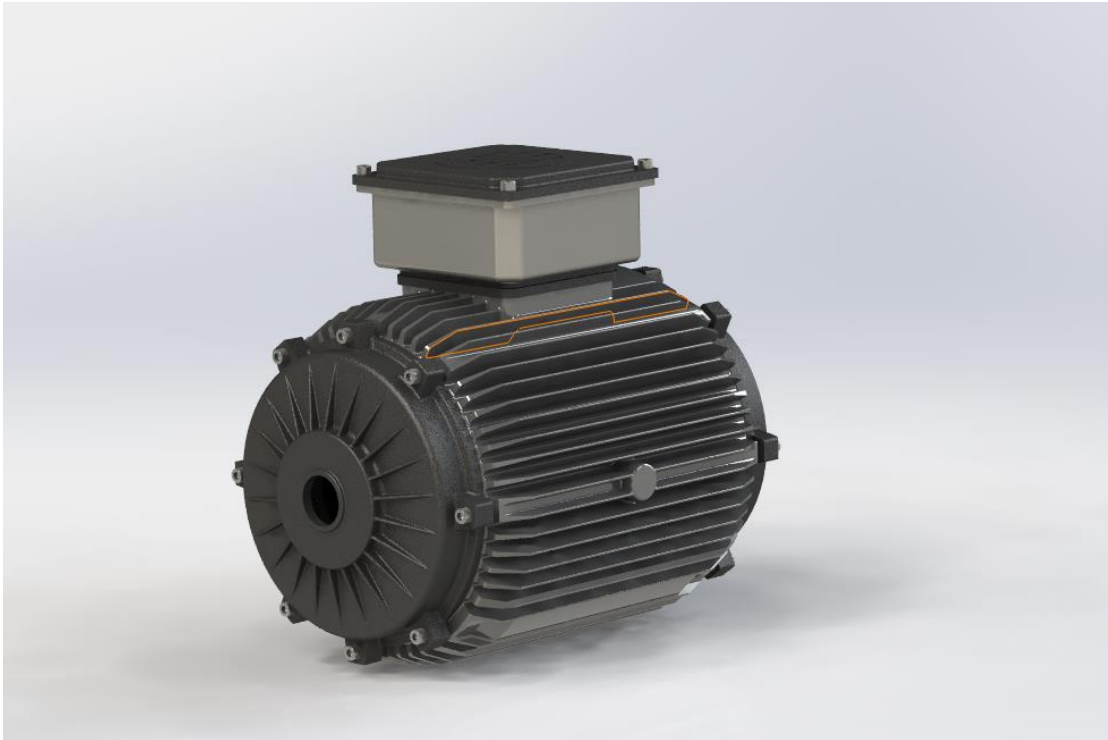


Figure VI-4: représente l'enveloppe de ce moteur

## VII. Simulation numérique sur SolidWorks

### VII.1.Objectif

Afin de compléter et de valider le dimensionnement analytique de l'enveloppe antidéflagrante, une simulation numérique a été effectuée à l'aide du logiciel SolidWorks simulation

Cette analyse a pour objectif :

- De vérifier la résistance mécanique de la paroi sous une pression interne de 1,5 MPa,
- De comparer les résultats numériques aux calculs analytiques,
- Et d'identifier d'éventuelles zones de concentration de contraintes.

### VII.2.Méthodologie

Le modèle géométrique simulé correspond au cylindre étudié, de diamètre intérieur  $D=309$  mm, longueur  $L=412$  mm et épaisseur  $e=10$  mm.

Le matériau retenu est la fonte EN-GJL-250 avec une contrainte admissible de  $\sigma_{adm}=165.6$ MPa.

La pression interne appliquée est  $P=15$ bar.

❖ Les détails concernant le maillage, les conditions aux limites et les paramètres de calcul sont présentés en Annexe C.

### VII.3.Résultats de la simulation

La figure suivante illustre la répartition des contraintes équivalentes de Von Mises obtenues dans l'enveloppe :

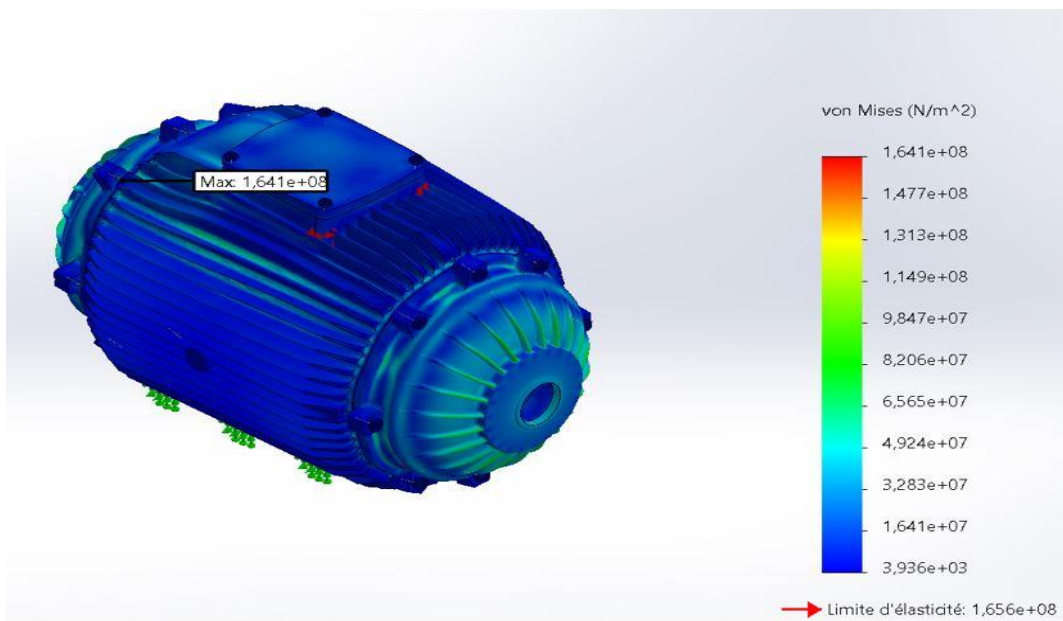


Figure VII-1: représente les résultats de simulation

- La contrainte maximale est localisée au niveau des jonctions entre le cylindre et les fonds.
- La valeur maximale obtenue est :  $\sigma_{VM,max} \approx 164.1$ MPa

## Chapitre 5 : Etude théorique et simulation SolidWorks

---

- Cette valeur reste largement inférieure à la contrainte admissible (80MPa), garantissant la sécurité mécanique de l'enveloppe.
- Les zones fragiles identifiées correspondent à des concentrations de contraintes dues à la géométrie (changements de section, arêtes vives).
- Les résultats de la simulation sont en accord avec les calculs analytiques présentés dans l'Annexe B, où une contrainte théorique de 20,1MPa avait été obtenue.

### VII.4. Discussion de différents résultats entre calcul numérique et simulation

Les calculs analytiques donnent une contrainte moyenne de  $\sigma \approx 21\text{MPa}$ .

Cependant, la simulation numérique sous SolidWorks révèle une contrainte maximale locale de  $\sigma_{VM,max} \approx 164\text{MPa}$ .

Cette différence s'explique par la prise en compte, dans la simulation, des effets de concentration de contraintes, des conditions aux limites et de la géométrie réelle (jonctions cylindre-fond), qui ne sont pas considérés dans le modèle analytique.

Ainsi, la valeur obtenue par la MEF correspond à une situation plus réaliste, alors que la formule théorique représente une approximation moyenne.

## VIII. Conclusion

La simulation numérique par éléments finis confirme la validité du dimensionnement analytique de l'enveloppe. L'épaisseur de 10 mm, imposée par la norme IEC 60079-1, s'avère suffisante pour assurer la sécurité mécanique. Bien que certaines zones présentent des concentrations de contraintes, les valeurs obtenues restent inférieures à la limite admissible, garantissant la conformité de l'enveloppe.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

La prévention des risques liés aux atmosphères explosives représente un enjeu fondamental pour la sécurité des installations industrielles et du personnel. Dans ce mémoire, nous avons abordé de manière progressive les aspects théoriques, normatifs et pratiques relatifs à la conception d'une enveloppe antidéflagrante destinée à un moteur asynchrone.

Dans un premier temps, les généralités sur les moteurs asynchrones ont permis de comprendre leur fonctionnement et de mettre en évidence les sources potentielles d'inflammation. Ensuite, l'étude du phénomène de déflagration a montré l'importance d'un confinement efficace et les pressions internes qu'une enveloppe doit être capable de supporter. L'analyse des directives européennes ATEX et de la norme IEC 60079-1 a mis en lumière les exigences réglementaires auxquelles doit répondre une enveloppe antidéflagrante pour être certifiée. Enfin, un travail de dimensionnement analytique a été réalisé pour déterminer l'épaisseur minimale de la paroi, et une validation numérique a été effectuée par simulation sur SolidWorks, permettant de confirmer les résultats et d'identifier des zones de concentration de contraintes.

Les résultats obtenus démontrent que l'épaisseur retenue, conforme aux exigences normatives, assure la sécurité mécanique de l'enveloppe. De plus, la simulation numérique a permis d'enrichir l'analyse en mettant en évidence des zones fragiles, sans toutefois compromettre la résistance globale de la structure.

Ce travail constitue une contribution méthodologique à la conception d'enveloppes antidéflagrantes, alliant rigueur normative, calcul analytique et validation par simulation numérique. Toutefois, certaines perspectives peuvent être envisagées, notamment l'étude de configurations géométriques optimisées pour réduire les concentrations de contraintes, l'analyse de la tenue en fatigue sous sollicitations cycliques.

En conclusion, cette étude met en évidence l'importance d'une approche intégrée, combinant théorie, normes et outils numériques, pour concevoir des enveloppes fiables et conformes aux exigences de sécurité des zones à atmosphères explosives.

# Références

1. [www.Electro-industrie.com](http://www.Electro-industrie.com)
2. C. Robert, M. Francis, « Commande électronique des moteurs à courant alternatif » À l'usage de l'enseignement supérieur, école d'ingénieurs, facultés, CNAM, Paris, éd. Eyrolles, coll. « Ingénieur EEA », France 1980.
3. M. Metrouh, R. Moussi, « Identification d'une machine asynchrone à cage », Mémoire de fin d'études de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
4. R. Bousseksou, « Modélisation analytique des machines asynchrone application au diagnostic »
5. Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007.
6. Livre machines électriques André Genon Willy Legros
7. Livre machines électriques André Genon Willy Legros
8. Machines électriques théorie et mise en œuvre Philippe Harret
9. A.Hamadou, A.Nessissen, (Modélisation numérique d'un moteur asynchrone a cage d'écureuil), Mémoire de master, université Djilali Bounaama.
10. Directive européenne 1999/92/CE (ATEX 137)
11. Cours de combustion ENSMP (École des Mines de Paris)
12. NFPA (National Fire Protection Association) :( extrait technique)
13. INRS Explosions industrielles
14. Norme IEC 60079-1



# **Annex A**

# Extrait explicatif de la norme NF EN 60079-1

## Enveloppes antidéflagrantes (Ex d)

### 1. Domaine d'application

La norme NF EN 60079-1 définit les exigences relatives à la conception, la fabrication, les essais et le marquage des matériels électriques protégés par enveloppe antidéflagrante (type de protection Ex d). Elle s'applique aux matériels destinés à être utilisés dans des atmosphères explosives dues aux gaz, vapeurs ou brouillards.

### 2. Principe de l'enveloppe antidéflagrante (Ex d)

Le principe repose sur la capacité de l'enveloppe à résister à la pression d'une explosion interne et à empêcher la transmission de la flamme vers l'extérieur. L'enveloppe n'empêche pas l'entrée du mélange explosif, mais elle garantit que toute explosion interne reste confinée.

### 3. Exigences mécaniques

Les matériaux utilisés doivent présenter une résistance mécanique suffisante pour supporter la pression maximale d'explosion ( $p_{max}$ ). Le calcul de l'épaisseur minimale dépend du diamètre, du volume et de la pression d'essai. Un facteur de sécurité est appliqué pour tenir compte des tolérances de fabrication et des contraintes mécaniques.

### 4. Pression d'essai et résistance à l'explosion

La pression d'essai ( $p_e$ ) doit être supérieure à la pression maximale d'explosion ( $p_{max}$ ) observée pendant les essais d'inflammation. Typiquement, pour les gaz du groupe IIB (ex. méthane),  $p_e$  varie entre 1,5 et 2,0 fois  $p_{max}$ . L'essai consiste à soumettre l'enveloppe à une explosion interne provoquée par un mélange d'essai représentatif.

### 5. Essai de non-transmission de flamme

L'essai vérifie que l'enveloppe empêche toute propagation de la flamme vers l'extérieur. On effectue plusieurs explosions internes à travers les joints, filets ou interstices critiques. Aucune inflammation du mélange extérieur ne doit être observée. Les essais sont réalisés pour le gaz le plus dangereux du groupe concerné (par exemple, le propane pour IIB).

### 6. Interstices et longueurs de filetage

Les surfaces de contact et les jeux doivent respecter des dimensions précises afin de garantir l'étanchéité à la flamme. Par exemple, pour les pas de vis M20x1,5, la longueur minimale d'engagement du filetage est d'environ 8 mm. Les interstices entre pièces mobiles doivent rester inférieurs à 0,2 mm selon le groupe de gaz.

## **7. Marquage et identification**

Chaque appareil conforme doit porter le marquage suivant : symbole Ex, type de protection (d), groupe de gaz (IIA, IIB ou IIC), et classe de température (T1 à T6). Exemple : Ex d IIB T4. Le marquage permet d'assurer la traçabilité et la conformité aux zones ATEX correspondantes.

## **8. Conclusion**

L'enveloppe antidéflagrante (Ex d) constitue une solution robuste pour les équipements destinés aux zones à risque d'explosion. Sa conception exige une étude approfondie de la résistance mécanique et des essais rigoureux de confinement et d'étanchéité. Le respect de la norme NF EN 60079-1 garantit la sécurité du matériel et des installations industrielles.

## **Annexe B**

## Calcul d'épaisseur et vérification mécanique d'une enveloppe antidéflagrante en fonte GJL-250

---

Cette annexe détaille le calcul de l'épaisseur minimale et la contrainte de Von Mises d'une enveloppe antidéflagrante en fonte EN-GJL-250, soumise à une pression interne de déflagration.

### Données de base :

Pression interne de calcul :  $P=1.5$  MPa

Diamètre intérieur :  $D=309$  mm

Longueur de cylindre :  $L=412$ mm

Matériau : Fonte grise EN-GJL-250

Résistance à la traction :  $R_m=250$ MPa

Contrainte admissible :  $\sigma_{adm} = 165.6$  MPa

Coefficient de sécurité :  $CS=1.5$  (intègres dans la pression d'essai)

### Formule de calcul (cylindre mince)

On utilise la formule de Barlow (paroi mince,  $e < D/10$ ) :

Formule de la contrainte circonférentielle :

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \times D}{2 \times e}$$

Donc l'épaisseur minimale :

$$e = \frac{P \times D}{2 \times \sigma_{adm}}$$

Application numérique :

$$e = \frac{1.5 \times 0.309}{2 \times 165.6}$$

$$e = 0.0013 \text{ m} = 1.3 \text{ mm}$$

Donc l'épaisseur calculé est égale ou supérieure à **1.3mm** ; on adopte d'après la norme IEC 60079-1 la valeur minimale pour enveloppe en fonte :  $e_{final} = 10$  mm

### Contrainte des parois :

#### Contrainte circonférentielle :

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \times D}{2e} = \frac{1,5 \times 10^6 \times 0,309}{2 \times 0,01} = 23,2 \text{ MPa}$$

# Calcul d'épaisseur et vérification mécanique d'une enveloppe antidéflagrante en fonte GJL-250

---

**Contrainte longitudinale :**

$$\sigma_L = \frac{P \times D}{4 \times e} = \frac{1,5 \times 10^6 \times 0,309}{4 \times 0,01} = 11,6 \text{MPa}$$

**Contrainte radiale :**

$$\sigma_r \approx 0 \text{ (Paroi mince)}$$

**Vérification par le critère de Von Mises :**

**Formule :**

$$\sigma_{vom} = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_L^2 - \sigma_\theta \times \sigma_L}$$

**Application :**

$$\sigma_{vom} = \sqrt{(23,2)^2 + (11,6)^2 - (23,6 \times 11,6)}$$

$$\sigma_{vom} = \sqrt{403,9} = 20,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{vom} \leq \sigma_{adm} = 165,6 \text{ MPa}$$

## **Annexe C**



# Simulation de Assemblage pour simulation

Date : mardi 27 mai 2025  
Concepteur : FEDOUL S SELMANI  
Nom d'étude : Statique  
Type d'analyse : Statique

## Objectif de la simulation

L'objectif de cette simulation est d'évaluer le comportement mécanique de l'assemblage de l'enveloppe antidéflagrante sous l'effet d'une surpression interne causée par une déflagration. L'étude vise à vérifier la tenue de l'enveloppe, des boulons de fixation, et des interfaces d'assemblage afin de garantir l'intégrité et la sécurité du système conformément aux exigences de la norme CEI 60079-1.

## Sommaire

Description .....	Erreur ! Signet non défini.
Hypothèses .....	3
Informations sur le modèle .....	4
Propriétés de l'étude .....	5
Unités .....	5
Propriétés du matériau.....	6
Actions extérieures .....	7
Définitions des connecteurs .....	8
Informations sur le maillage.....	22
Forces résultantes .....	23
Résultats de l'étude.....	24
Conclusion.....	28



---

## Hypothèses




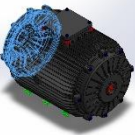


Modèle d'origine



Modèle analysé



## Informations sur le modèle

Corps volumiques			
Nom du document et référence	Traité comme	Propriétés volumétriques	Chemin/Date de modification du document
Congé67 	Corps volumique	Masse :73,4859 kg Volume :0,010136 m <sup>3</sup> Masse volumique :7 249,97 kg/m <sup>3</sup> Poids :720,161 N	D:\Moteur\assemblage\Car casse.SLDPRT May 25 19 :07:38 2025
Répétition circulaire10 	Corps volumique	Masse :13,516 kg Volume :0,00186427 m <sup>3</sup> Masse volumique :7 250 kg/m <sup>3</sup> Poids :132,456 N	D:\Moteur\assemblage\Flaque.SLDPRT May 27 12 :32 :53 2025
Répétition circulaire10 	Corps volumique	Masse :13,516 kg Volume :0,00186427 m <sup>3</sup> Masse volumique :7 250 kg/m <sup>3</sup> Poids :132,456 N	D:\Moteur\assemblage\Flaque.SLDPRT May 27 12:32:53 2025
Boss. -Extru.1 	Corps volumique	Masse :3,40296 kg Volume :0,000469373 m <sup>3</sup> Masse volumique :7 250 kg/m <sup>3</sup> Poids :33,349 N	D:\Moteur\assemblage\Pièce1.SLDPRT May 25 20:16:34 2025

## Propriétés de l'étude

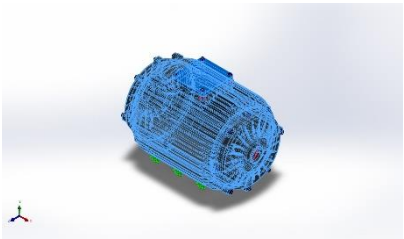
Nom d'étude	Statique
Type d'analyse	Statique
Type de maillage	Maillage volumique
Effets thermiques :	Activé(e)
Option thermique	Inclure des chargements thermiques
Température de déformation nulle	298 Kelvin
Inclure la pression du fluide calculée par SOLIDWORKS Flow Simulation	Désactivé(e)
Type de solveur	Automatique
Stress Stiffening :	Désactivé(e)
Faible raideur :	Désactivé(e)
Relaxation inertielle :	Désactivé(e)
Options de contact solidaire incompatible	Automatique
Grand déplacement	Désactivé(e)
Vérifier les forces externes	Activé(e)
Friction	Désactivé(e)
Méthode adaptative :	Désactivé(e)
Dossier de résultats	Document SOLIDWORKS (D:\Moteur\assemblage)

## Unités

Système d'unités :	SI (MKS)
Longueur/Déplacement	mm
Température	Kelvin
Vitesse angulaire	Rad/sec
Pression/Contrainte	N/m <sup>2</sup>

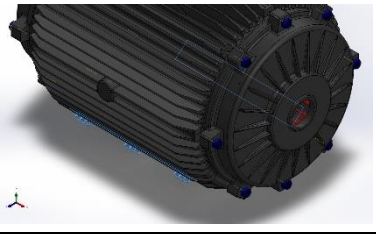


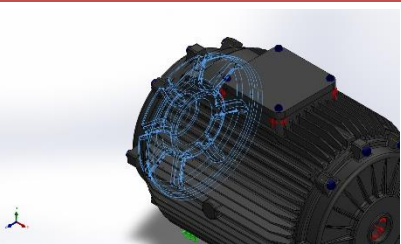
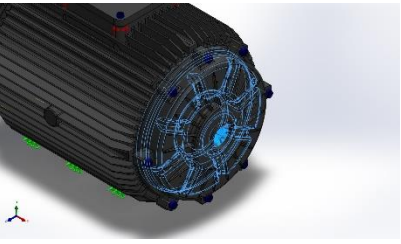
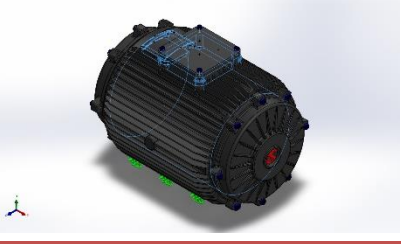
## Propriétés du matériau

Référence du modèle	Propriétés	Composants
	<p>Nom : 0.6025 (EN-GJL-250)</p> <p>Type de modèle : Linéaire élastique isotropique</p> <p>Critère de ruine par défaut : Inconnu</p> <p>Limite d'élasticité : 1,65594e+08 N/m<sup>2</sup></p> <p>Limite de traction : 2,5e+08 N/m<sup>2</sup></p> <p>Module d'élasticité : 1,2e+11 N/m<sup>2</sup></p> <p>Coefficient de Poisson : 0,26</p> <p>Masse volumique : 7 250 kg/m<sup>3</sup></p> <p>Module de cisaillement : 6,5e+09 N/m<sup>2</sup></p> <p>Coefficient de dilatation thermique: 1,05e-05 /Kelvin</p>	<p>Corps volumique 1(Congé67)(Carcasse-1),</p> <p>Corps volumique 1(Répétition circulaire10)(Flasque-1),</p> <p>Corps volumique 1(Répétition circulaire10)(Flasque-2),</p> <p>Corps volumique 1(Boss. - Extru.1)(Pièce1-1)</p>
Données de la courbe N/A		



## Actions extérieures

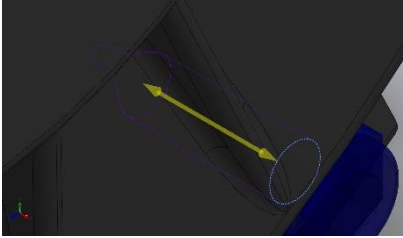
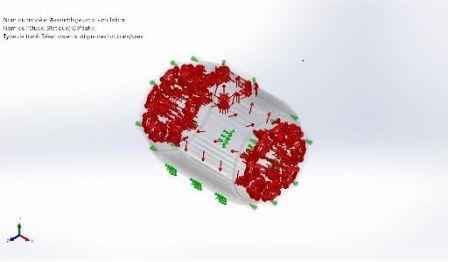
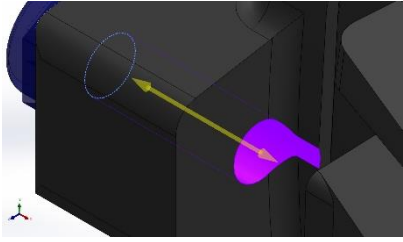
Nom du déplacement imposé	Image du déplacement imposé	Détails du déplacement imposé		
Fixe-1		Entités : 2 face(s) Type : Géométrie fixe		
<b>Forces résultantes</b>				
Composants	X	Y	Z	Résultante
Force de réaction(N)	3,18141	-12 405,1	0,31278	12 405,1
Moment de réaction (N.m)	0	0	0	0

Nom du chargement	Image du chargement	Détails du chargement
Pression-1		Entités : 238 face(s) Type : Normal à la face sélectionnée Valeur : 1,5 Unités : N/mm <sup>2</sup> (MPa) Angle de phase : 0 Unités : deg
Pression-2		Entités : 238 face(s) Type : Normal à la face sélectionnée Valeur : 1,5 Unités : N/mm <sup>2</sup> (MPa) Angle de phase : 0 Unités : deg
Pression-3		Entités : 54 face(s) Type : Normal à la face sélectionnée Valeur : 1,5 Unités : N/mm <sup>2</sup> (MPa) Angle de phase : 0 Unités : deg

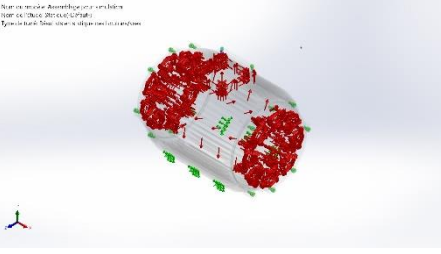


## Définitions des connecteurs

### Connecteur axe/boulon/palier

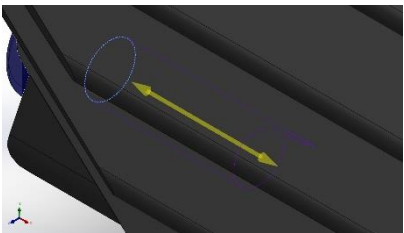
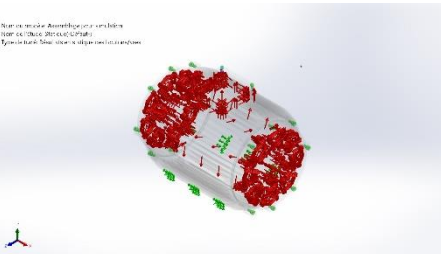
Référence du modèle	Détails du connecteur	Détails de résistance						
 <p>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 1</p>	<p>Entités : 1 arête(s), 1 face(s)</p> <p>Type : Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)</p> <p>Type de connexion: Distribuée</p> <p>Diamètre de la tête: 16 mm</p> <p>Diamètre nominal de la tige: 10 mm</p> <p>Nom du matériau: Acier allié</p> <p>Module d'Young: 2,1e+11 N/m<sup>2</sup></p> <p>Coefficient de Poisson: 0,28</p> <p>Superficie de contrainte en traction: 57,9896 mm<sup>2</sup></p> <p>Résistance du boulon: 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup></p> <p>Coefficient de sécurité: 2</p> <p>Précontrainte (Axial): 5 396,7 N</p> <p>Facteur de couple (K): 0,2</p> <p>Tige ajustée: Non</p>	<table border="1"> <tr> <td>Contrôle des boulons:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>CS calculé:</td> <td>6,45499</td> </tr> <tr> <td>CS désiré:</td> <td>2</td> </tr> </table> 	Contrôle des boulons:	OK	CS calculé:	6,45499	CS désiré:	2
Contrôle des boulons:	OK							
CS calculé:	6,45499							
CS désiré:	2							
<b>Forces dans les connecteurs</b>								
<b>Type</b>	<b>Composante X</b>	<b>Composante Y</b>	<b>Composante Z</b>	<b>Résultante</b>				
Force axiale (N)	5 477,1	0	0	5 477,1				
Force de cisaillement (N)	0	3,3775	5,5677	6,512				
Moment de flexion (N.m)	0	0,11469	-0,11642	0,16343				
	<p>Entités: 1 arête(s), 1 face(s)</p> <p>Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)</p> <p>Type de connexion: Distribuée</p>	<table border="1"> <tr> <td>Contrôle des boulons:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>CS calculé:</td> <td>6,54472</td> </tr> <tr> <td>CS désiré:</td> <td>2</td> </tr> </table>	Contrôle des boulons:	OK	CS calculé:	6,54472	CS désiré:	2
Contrôle des boulons:	OK							
CS calculé:	6,54472							
CS désiré:	2							



<p>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 2</p>	<p><b>Diamètre de la tête:</b> 16 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 10 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 57,9896 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 5 396,7 N  <b>Facteur de couple (K):</b> 0,2  <b>Tige ajustée:</b> Non</p>	
-------------------------------------	---	---

**Forces dans les connecteurs**

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	-5 437	0	0	5 437
Force de cisaillement (N)	0	6,0017	-0,23526	6,0063
Moment de flexion (N.m)	0	0,083307	0,0588	0,10197

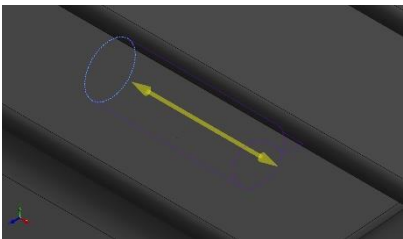
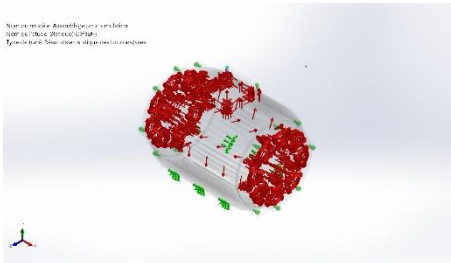
 <p>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 3</p>	<p><b>Entités:</b> 1 arête(s), 1 face(s)  <b>Type:</b> Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  <b>Type de connexion:</b> Distribuée  <b>Diamètre de la tête:</b> 16 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 10 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 57,9896 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 5 396,7 N</p>	<table border="1"> <tr> <td>Contrôle des boulons:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>CS calculé:</td> <td>6,47068</td> </tr> <tr> <td>CS désiré:</td> <td>2</td> </tr> </table> 	Contrôle des boulons:	OK	CS calculé:	6,47068	CS désiré:	2
Contrôle des boulons:	OK							
CS calculé:	6,47068							
CS désiré:	2							



	Facteur de couple (K): Tige ajustée: Non	
--	---	--

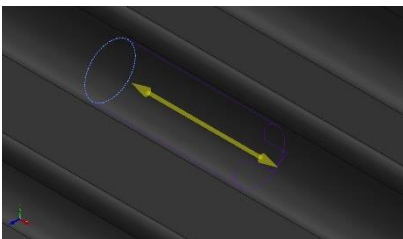
### Forces dans les connecteurs

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	-5 468,1	0	0	5 468,1
Force de cisaillement (N)	0	3,0643	-4,3811	5,3464
Moment de flexion (N.m)	0	0,10216	0,11773	0,15587

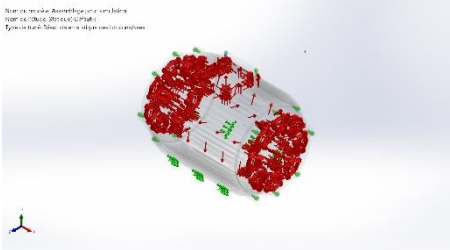
 <p>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 4</p>	<p>Entités: 1 arête(s), 1 face(s)</p> <p>Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)</p> <p>Type de connexion: Distribuée</p> <p>Diamètre de la tête: 16 mm</p> <p>Diamètre nominal de la tige: 10 mm</p> <p>Nom du matériau: Acier allié</p> <p>Module d'Young: 2,1e+11 N/m<sup>2</sup></p> <p>Coefficient de Poisson: 0,28</p> <p>Superficie de contrainte en traction: 57,9896 mm<sup>2</sup></p> <p>Résistance du boulon: 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup></p> <p>Coefficient de sécurité: 2</p> <p>Précontrainte (Axial): 5 396,7 N</p> <p>Facteur de couple (K): 0,2</p> <p>Tige ajustée: Non</p>	<table border="1"> <tr> <td>Contrôle des boulons:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>CS calculé:</td> <td>6,51827</td> </tr> <tr> <td>CS désiré:</td> <td>2</td> </tr> </table> 	Contrôle des boulons:	OK	CS calculé:	6,51827	CS désiré:	2
	Contrôle des boulons:	OK						
CS calculé:	6,51827							
CS désiré:	2							

### Forces dans les connecteurs

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	-5 442,8	0	0	5 442,8
Force de cisaillement (N)	0	-0,85885	7,1747	7,226
Moment de flexion (N.m)	0	-0,07093	0,109	0,13005

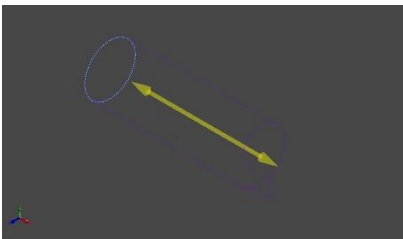
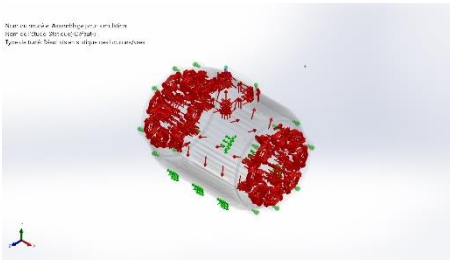
	<p>Entités: 1 arête(s), 1 face(s)</p> <p>Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)</p> <p>Type de connexion: Distribuée</p>	<table border="1"> <tr> <td>Contrôle des boulons:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>CS calculé:</td> <td>6,45358</td> </tr> <tr> <td>CS désiré:</td> <td>2</td> </tr> </table>	Contrôle des boulons:	OK	CS calculé:	6,45358	CS désiré:	2
	Contrôle des boulons:	OK						
CS calculé:	6,45358							
CS désiré:	2							



<p><b>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 5</b></p>	<p><b>Diamètre de la tête:</b> 16 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 10 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 57,9896 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 5 396,7 N  <b>Facteur de couple (K):</b> 0,2  <b>Tige ajustée:</b> Non</p>	
--	---	---

**Forces dans les connecteurs**

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	-5 412,2	0	0	5 412,2
Force de cisaillement (N)	0	-24,228	8,3828	25,637
Moment de flexion (N.m)	0	-0,14791	-0,23243	0,2755

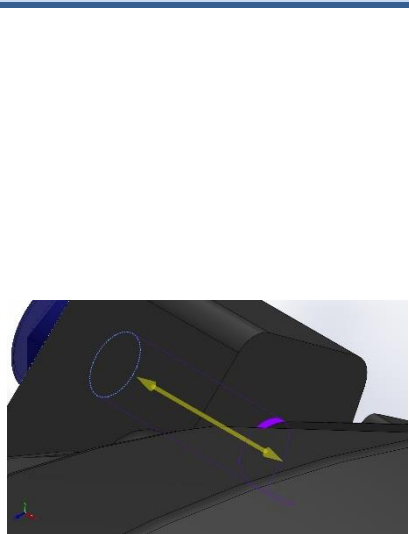
 <p><b>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 6</b></p>	<p><b>Entités:</b> 1 arête(s), 1 face(s)  <b>Type:</b> Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  <b>Type de connexion:</b> Distribuée  <b>Diamètre de la tête:</b> 16 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 10 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 57,9896 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 5 396,7 N</p>	<table border="1"> <tr> <td>Contrôle des boulons:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>CS calculé:</td> <td>6,54568</td> </tr> <tr> <td>CS désiré:</td> <td>2</td> </tr> </table> 	Contrôle des boulons:	OK	CS calculé:	6,54568	CS désiré:	2
Contrôle des boulons:	OK							
CS calculé:	6,54568							
CS désiré:	2							



	Facteur de couple (K): Tige ajustée: Non	
--	---	--

**Forces dans les connecteurs**

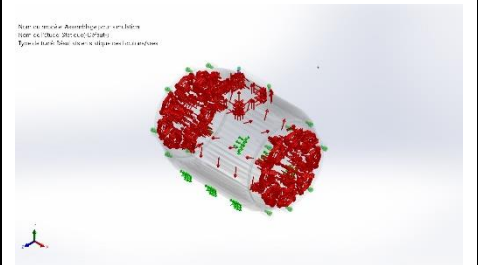
Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	-5 439,4	0	0	5 439,4
Force de cisaillement (N)	0	-2,6854	1,0509	2,8837
Moment de flexion (N.m)	0	-0,093283	-0,025066	0,096592



DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 7

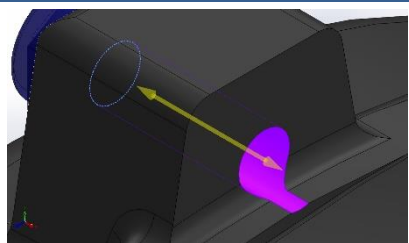
Entités: 1 arête(s), 1 face(s)  
 Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  
 Type de connexion: Distribuée  
 Diamètre de la tête: 16 mm  
 Diamètre nominal de la tige: 10 mm  
 Nom du matériau: Acier allié  
 Module d'Young: 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  
 Coefficient de Poisson: 0,28  
 Superficie de contrainte en traction: 57,9896 mm<sup>2</sup>  
 Résistance du boulon: 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  
 Coefficient de sécurité: 2  
 Précontrainte (Axial): 5 396,7 N  
 Facteur de couple (K): 0,2  
 Tige ajustée: Non

Contrôle des boulons:	OK
CS calculé:	6,5658
CS désiré:	2



**Forces dans les connecteurs**

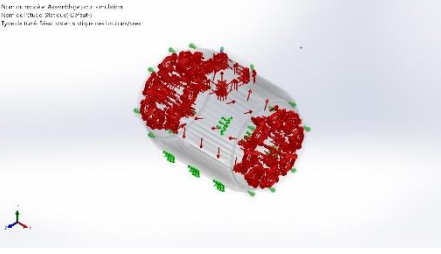
Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	-5 428,8	0	0	5 428,8
Force de cisaillement (N)	0	2,2636	-2,4542	3,3387
Moment de flexion (N.m)	0	-0,046835	-0,072245	0,086098



Entités: 1 arête(s), 1 face(s)  
 Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  
 Type de connexion: Distribuée

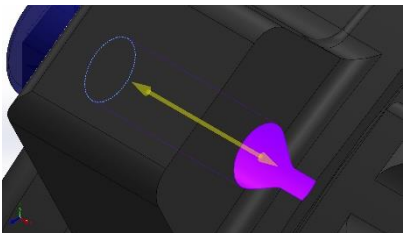
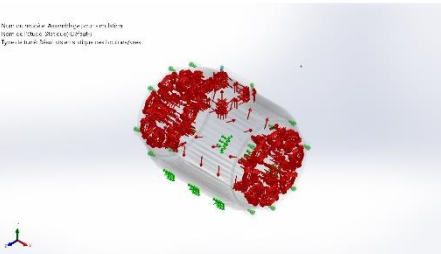
Contrôle des boulons:	OK
CS calculé:	6,59708
CS désiré:	2



<p><b>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 8</b></p>	<p><b>Diamètre de la tête:</b> 16 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 10 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 57,9896 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 5 396,7 N  <b>Facteur de couple (K):</b> 0,2  <b>Tige ajustée:</b> Non</p>	
--	---	---

**Forces dans les connecteurs**

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	-5 413,1	0	0	5 413,1
Force de cisaillement (N)	0	7,8574	-5,0571	9,3441
Moment de flexion (N.m)	0	0,0483	0,04877	0,06864

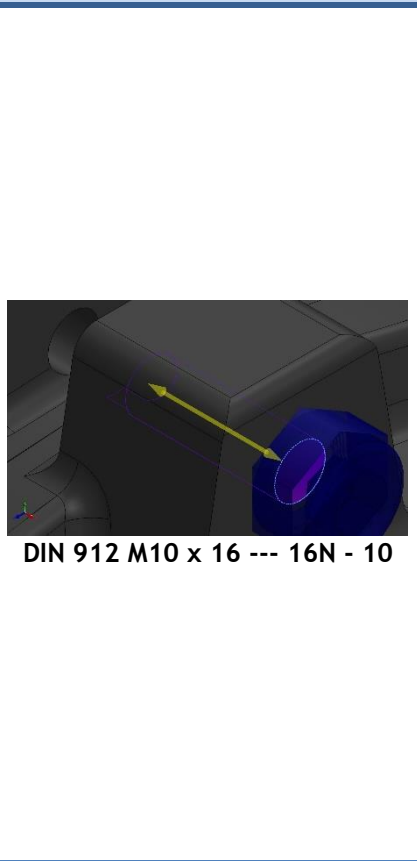
 <p><b>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 9</b></p>	<p><b>Entités:</b> 1 arête(s), 1 face(s)  <b>Type:</b> Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  <b>Type de connexion:</b> Distribuée  <b>Diamètre de la tête:</b> 16 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 10 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 57,9896 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 5 396,7 N</p>	<table border="1"> <tr> <td>Contrôle des boulons:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>CS calculé:</td> <td>6,46934</td> </tr> <tr> <td>CS désiré:</td> <td>2</td> </tr> </table> 	Contrôle des boulons:	OK	CS calculé:	6,46934	CS désiré:	2
Contrôle des boulons:	OK							
CS calculé:	6,46934							
CS désiré:	2							



	Facteur de couple (K): Tige ajustée: Non	
--	---	--

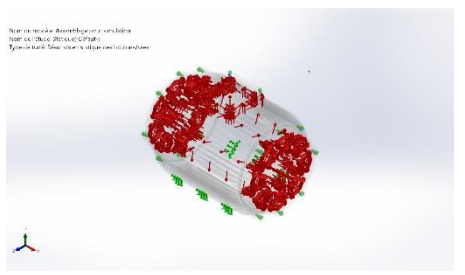
**Forces dans les connecteurs**

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	-5 368,4	0	0	5 368,4
Force de cisaillement (N)	0	30,905	-4,4751	31,227
Moment de flexion (N.m)	0	0,12667	0,30109	0,32665



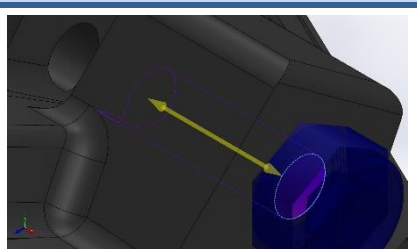
Entités: 1 arête(s), 1 face(s)  
 Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  
 Type de connexion: Distribuée  
 Diamètre de la tête: 16 mm  
 Diamètre nominal de la tige: 10 mm  
 Nom du matériau: Acier allié  
 Module d'Young: 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  
 Coefficient de Poisson: 0,28  
 Superficie de contrainte en traction: 57,9896 mm<sup>2</sup>  
 Résistance du boulon: 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  
 Coefficient de sécurité: 2  
 Précontrainte (Axial): 5 396,7 N  
 Facteur de couple (K): 0,2  
 Tige ajustée: Non

Contrôle des boulons:	OK
CS calculé:	6,19648
CS désiré:	2



**Forces dans les connecteurs**

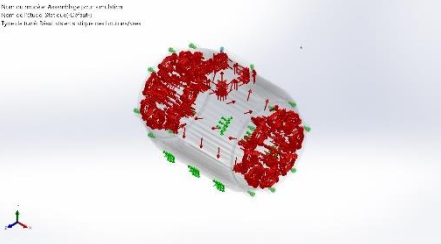
Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	5 466	0	0	5 466
Force de cisaillement (N)	0	-1,5804	4,9421	5,1886
Moment de flexion (N.m)	0	0,049841	0,12746	0,13686



Entités: 1 arête(s), 1 face(s)  
 Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  
 Type de connexion: Distribuée

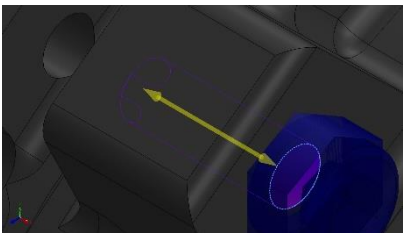
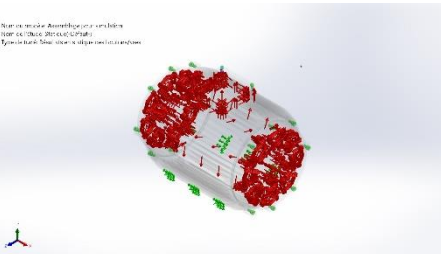
Contrôle des boulons:	OK
CS calculé:	5,62448
CS désiré:	2



<p><b>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 11</b></p>	<p><b>Diamètre de la tête:</b> 16 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 10 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 57,9896 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 5 396,7 N  <b>Facteur de couple (K):</b> 0,2  <b>Tige ajustée:</b> Non</p>	
---	---	---

**Forces dans les connecteurs**

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	5 418,6	0	0	5 418,6
Force de cisaillement (N)	0	21,095	5,2376	21,735
Moment de flexion (N.m)	0	0,12018	-0,1819	0,21801

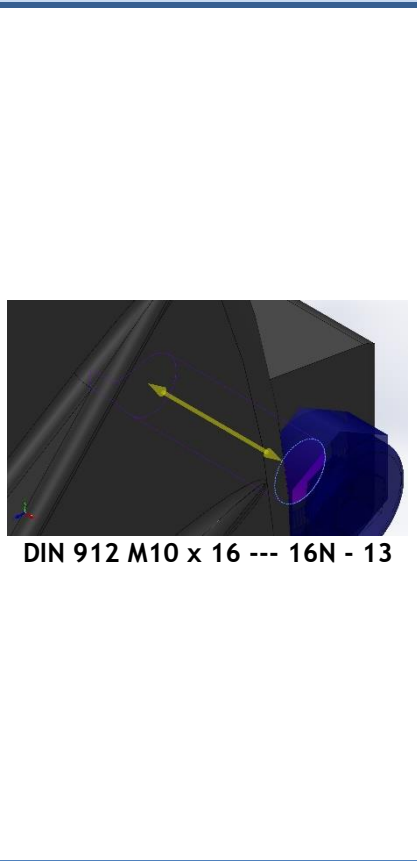
 <p><b>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 12</b></p>	<p><b>Entités:</b> 1 arête(s), 1 face(s)  <b>Type:</b> Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  <b>Type de connexion:</b> Distribuée  <b>Diamètre de la tête:</b> 16 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 10 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 57,9896 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 5 396,7 N</p>	<table border="1"> <tr> <td>Contrôle des boulons:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>CS calculé:</td> <td>6,22449</td> </tr> <tr> <td>CS désiré:</td> <td>2</td> </tr> </table> 	Contrôle des boulons:	OK	CS calculé:	6,22449	CS désiré:	2
Contrôle des boulons:	OK							
CS calculé:	6,22449							
CS désiré:	2							



	Facteur de couple (K): Tige ajustée: Non	
--	---	--

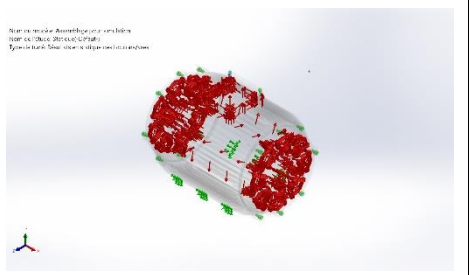
**Forces dans les connecteurs**

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	5 470,6	0	0	5 470,6
Force de cisaillement (N)	0	-6,1907	1,2269	6,3111
Moment de flexion (N.m)	0	-0,039191	0,16732	0,17185



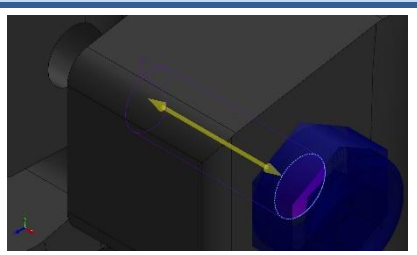
Entités: 1 arête(s), 1 face(s)  
 Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  
 Type de connexion: Distribuée  
 Diamètre de la tête: 16 mm  
 Diamètre nominal de la tige: 10 mm  
 Nom du matériau: Acier allié  
 Module d'Young: 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  
 Coefficient de Poisson: 0,28  
 Superficie de contrainte en traction: 57,9896 mm<sup>2</sup>  
 Résistance du boulon: 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  
 Coefficient de sécurité: 2  
 Précontrainte (Axial): 5 396,7 N  
 Facteur de couple (K): 0,2  
 Tige ajustée: Non

Contrôle des boulons:	OK
CS calculé:	5,65849
CS désiré:	2



**Forces dans les connecteurs**

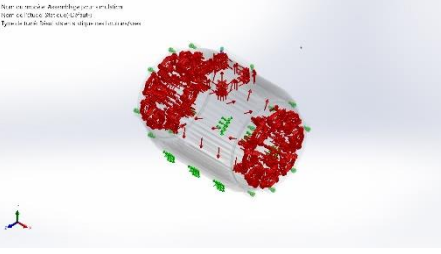
Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	5 446,1	0	0	5 446,1
Force de cisaillement (N)	0	5,5649	0,21503	5,5691
Moment de flexion (N.m)	0	0,08758	-0,057327	0,10467



Entités: 1 arête(s), 1 face(s)  
 Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  
 Type de connexion: Distribuée

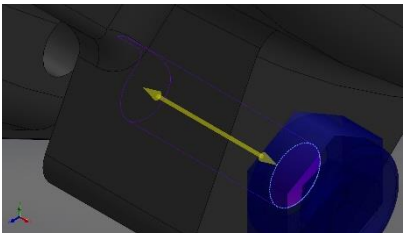
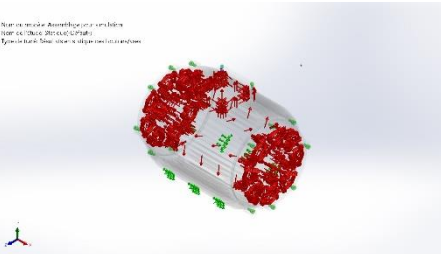
Contrôle des boulons:	OK
CS calculé:	6,48626
CS désiré:	2



<p><b>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 14</b></p>	<p><b>Diamètre de la tête:</b> 16 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 10 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 57,9896 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 5 396,7 N  <b>Facteur de couple (K):</b> 0,2  <b>Tige ajustée:</b> Non</p>	
---	---	---

**Forces dans les connecteurs**

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	5 448,6	0	0	5 448,6
Force de cisaillement (N)	0	-3,5389	-1,2098	3,74
Moment de flexion (N.m)	0	-0,1007	0,034728	0,10652

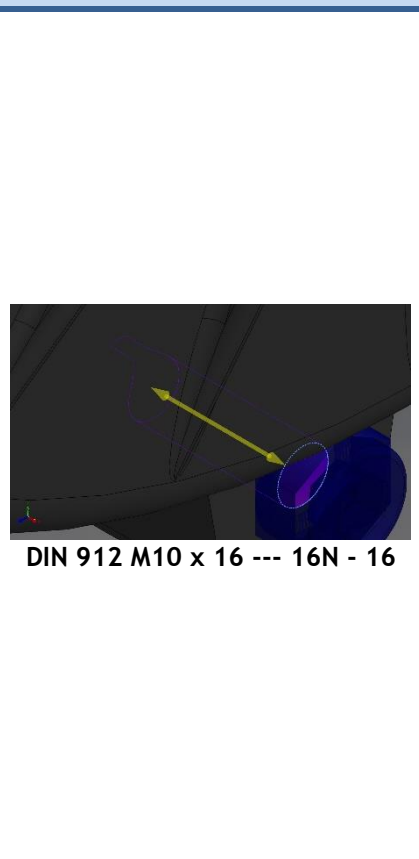
 <p><b>DIN 912 M10 x 16 --- 16N - 15</b></p>	<p><b>Entités:</b> 1 arête(s), 1 face(s)  <b>Type:</b> Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  <b>Type de connexion:</b> Distribuée  <b>Diamètre de la tête:</b> 16 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 10 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 57,9896 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 5 396,7 N</p>	<table border="1" data-bbox="1096 1186 1534 1365"> <tr> <td>Contrôle des boulons:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>CS calculé:</td> <td>6,48565</td> </tr> <tr> <td>CS désiré:</td> <td>2</td> </tr> </table> 	Contrôle des boulons:	OK	CS calculé:	6,48565	CS désiré:	2
Contrôle des boulons:	OK							
CS calculé:	6,48565							
CS désiré:	2							



	Facteur de couple (K): Tige ajustée: Non	
--	---	--

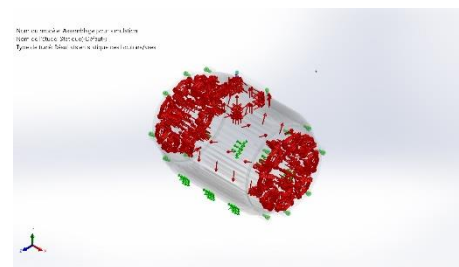
### Forces dans les connecteurs

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	5 425,5	0	0	5 425,5
Force de cisaillement (N)	0	-24,887	-9,1823	26,527
Moment de flexion (N.m)	0	-0,16698	0,23012	0,28432



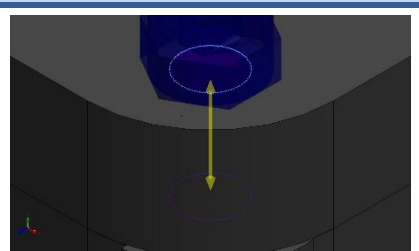
Entités: 1 arête(s), 1 face(s)  
 Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  
 Type de connexion: Distribuée  
 Diamètre de la tête: 16 mm  
 Diamètre nominal de la tige: 10 mm  
 Nom du matériau: Acier allié  
 Module d'Young: 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  
 Coefficient de Poisson: 0,28  
 Superficie de contrainte en traction: 57,9896 mm<sup>2</sup>  
 Résistance du boulon: 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  
 Coefficient de sécurité: 2  
 Précontrainte (Axial): 5 396,7 N  
 Facteur de couple (K): 0,2  
 Tige ajustée: Non

Contrôle des boulons:	OK
CS calculé:	6,4568
CS désiré:	2



### Forces dans les connecteurs

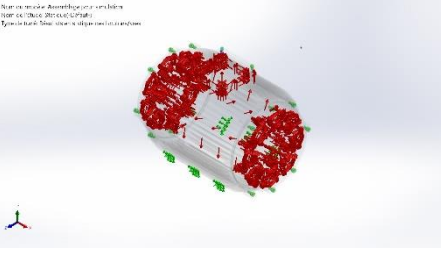
Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	5 457	0	0	5 457
Force de cisaillement (N)	0	-0,25396	-6,9358	6,9404
Moment de flexion (N.m)	0	-0,069693	-0,11793	0,13698



Entités: 1 arête(s), 1 face(s)  
 Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  
 Type de connexion: Distribuée

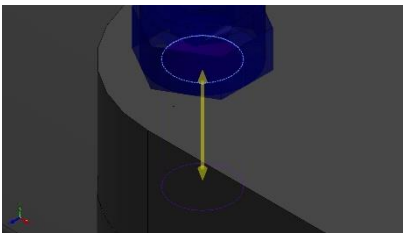
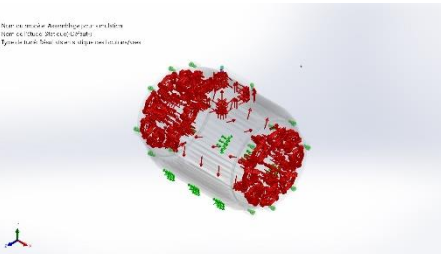
Contrôle des boulons:	OK
CS calculé:	6,53199
CS désiré:	2



<p><b>DIN 912 M8 x 12 --- 12N - 1</b></p>	<p><b>Diamètre de la tête:</b> 13 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 8 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 36,6085 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 3 406,91 N  <b>Facteur de couple (K):</b> 0,2  <b>Tige ajustée:</b> Non</p>	
---	---	---

**Forces dans les connecteurs**

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	0	3 384,1	0	3 384,1
Force de cisaillement (N)	32,574	0	49,113	58,933
Moment de flexion (N.m)	-0,32668	0	0,20597	0,38619

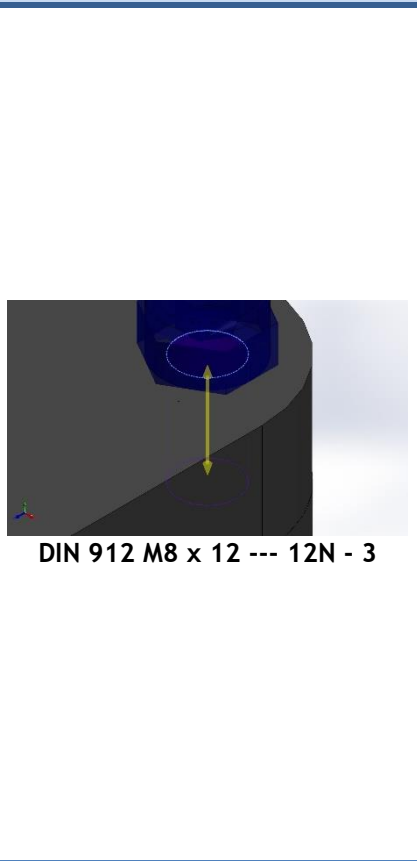
 <p><b>DIN 912 M8 x 12 --- 12N - 2</b></p>	<p><b>Entités:</b> 1 arête(s), 1 face(s)  <b>Type:</b> Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  <b>Type de connexion:</b> Distribuée  <b>Diamètre de la tête:</b> 13 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 8 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 36,6085 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 3 406,91 N</p>	<table border="1" data-bbox="1096 1186 1534 1365"> <tr> <td>Contrôle des boulons:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>CS calculé:</td> <td>6,52779</td> </tr> <tr> <td>CS désiré:</td> <td>2</td> </tr> </table> 	Contrôle des boulons:	OK	CS calculé:	6,52779	CS désiré:	2
Contrôle des boulons:	OK							
CS calculé:	6,52779							
CS désiré:	2							



	Facteur de couple (K): Tige ajustée: Non	
--	---	--

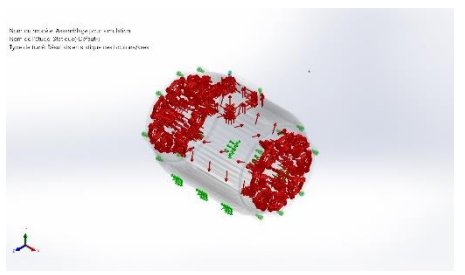
**Forces dans les connecteurs**

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	0	3 457,3	0	3 457,3
Force de cisaillement (N)	-21,465	0	129,86	131,62
Moment de flexion (N.m)	-0,78955	0	-0,10735	0,79681



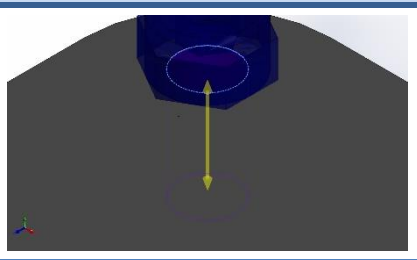
Entités: 1 arête(s), 1 face(s)  
 Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  
 Type de connexion: Distribuée  
 Diamètre de la tête: 13 mm  
 Diamètre nominal de la tige: 8 mm  
 Nom du matériau: Acier allié  
 Module d'Young: 2,1e+11 N/m^2  
 Coefficient de Poisson: 0,28  
 Superficie de contrainte en traction: 36,6085 mm^2  
 Résistance du boulon: 6,20422e+08 N/m^2  
 Coefficient de sécurité: 2  
 Précontrainte (Axial): 3 406,91 N  
 Facteur de couple (K): 0,2  
 Tige ajustée: Non

Contrôle des boulons:	OK
CS calculé:	6,43217
CS désiré:	2



**Forces dans les connecteurs**

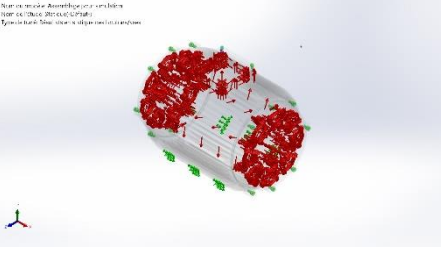
Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	0	3 381,2	0	3 381,2
Force de cisaillement (N)	30,4	0	-47,004	55,978
Moment de flexion (N.m)	0,31229	0	0,19384	0,36756



Entités: 1 arête(s), 1 face(s)  
 Type: Boulon(Diamètre de la tête/écrou)(Vis pour lamage)  
 Type de connexion: Distribuée

Contrôle des boulons:	OK
CS calculé:	6,4967
CS désiré:	2



<p><b>DIN 912 M8 x 12 --- 12N - 4</b></p>	<p><b>Diamètre de la tête:</b> 13 mm  <b>Diamètre nominal de la tige:</b> 8 mm  <b>Nom du matériau:</b> Acier allié  <b>Module d'Young:</b> 2,1e+11 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28  <b>Superficie de contrainte en traction:</b> 36,6085 mm<sup>2</sup>  <b>Résistance du boulon:</b> 6,20422e+08 N/m<sup>2</sup>  <b>Coefficient de sécurité:</b> 2  <b>Précontrainte (Axial):</b> 3 406,91 N  <b>Facteur de couple (K):</b> 0,2  <b>Tige ajustée:</b> Non</p>	 <p>Simulation de l'assemblage pour simulation      (Image de l'assemblage simulé)      Simulation de l'assemblage pour simulation</p>
---	---	---

**Forces dans les connecteurs**

Type	Composante X	Composante Y	Composante Z	Résultante
Force axiale (N)	0	3 452,2	0	3 452,2
Force de cisaillement (N)	-19,16	0	-114,84	116,43
Moment de flexion (N.m)	0,76377	0	-0,10373	0,77078



## Informations sur le maillage

Type de maillage	Maillage volumique
Mailleur utilisé:	Maillage raccordé basé sur la courbure
Points de Jacobien pour un maillage de qualité élevée	16 Points
Taille d'élément maximum	65,6344 mm
Taille d'élément minimum	1 mm
Qualité de maillage	Haute
Remailler les pièces en échec indépendamment	Désactivé(e)

## Informations sur le maillage - Détails

Nombre total de noeuds	3097814
Nombre total d'éléments	1919357
Aspect ratio maximum	1 813,5
% d'éléments ayant un aspect ratio < 3	96,4
Pourcentage d'éléments ayant un aspect ratio > 10	0,0913
Pourcentage d'éléments distordus	0
Durée de création du maillage (hh:mm:ss):	00:02:48
Nom de l'ordinateur:	



---

## Forces résultantes

### Forces de réaction

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N	3,18141	-12 405,1	0,31278	12 405,1

### Moments de réaction

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N.m	0	0	0	0

### Forces de corps libre

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N	-0,0203046	0,0427695	0,105613	0,11574

### Moments externes

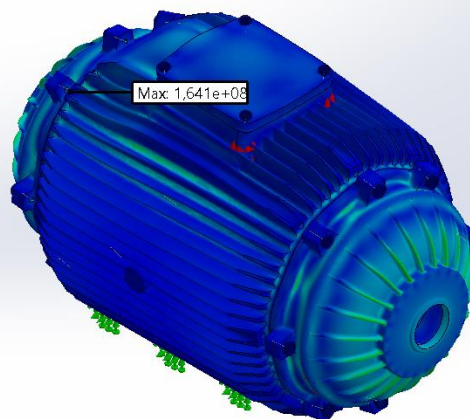
Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N.m	0	0	0	1e-33



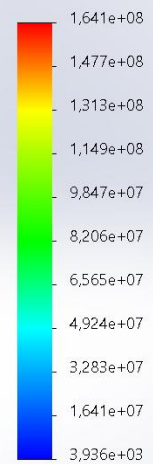
## Résultats de l'étude

Nom	Type	Min	Max
Contraintes1	VON : contrainte de von Mises	3,936e+03N/m <sup>2</sup> Noeud: 35216	1,641e+08N/m <sup>2</sup> Noeud: 2092125

Nom du modèle: Assemblage pour simulation  
 Nom de l'étude: Statique(-Défaut-)  
 Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1  
 Echelle de déformation: 442,429



von Mises (N/m<sup>2</sup>)



→ Limite d'élasticité: 1,656e+08

Assemblage pour simulation-Statique-Contraintes-Contraintes1

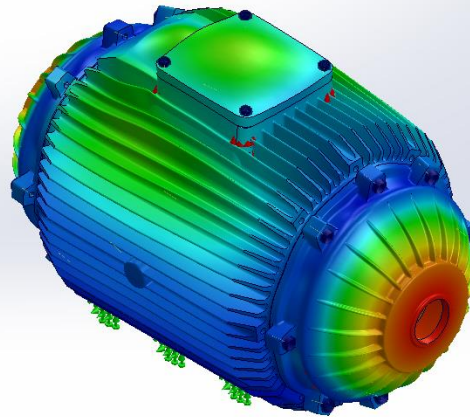
Nom	Type	Min	Max
Déplacements1	URES : Déplacement résultant	0,000e+00mm	1,325e-01mm



Noeud: 132

Noeud: 2601319

Nom du modèle: Assemblage pour simulation  
Nom de l'étude: Statique(-Défaut-)  
Type de tracé: Déplacement statique Déplacements1  
Echelle de déformation: 442,429

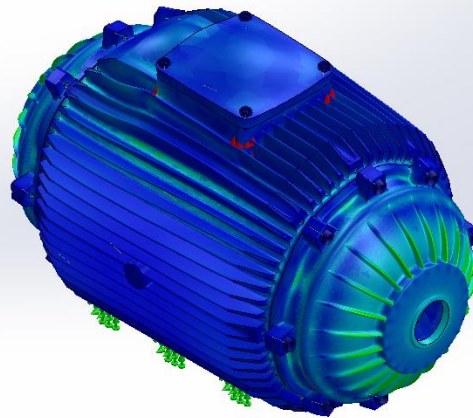


Assemblage pour simulation-Statique-Déplacements-Déplacements1

Nom	Type	Min	Max
Déformations1	ESTRN : Déformation équivalente	6,969e-08 Elément: 1159793	9,522e-04 Elément: 1642315



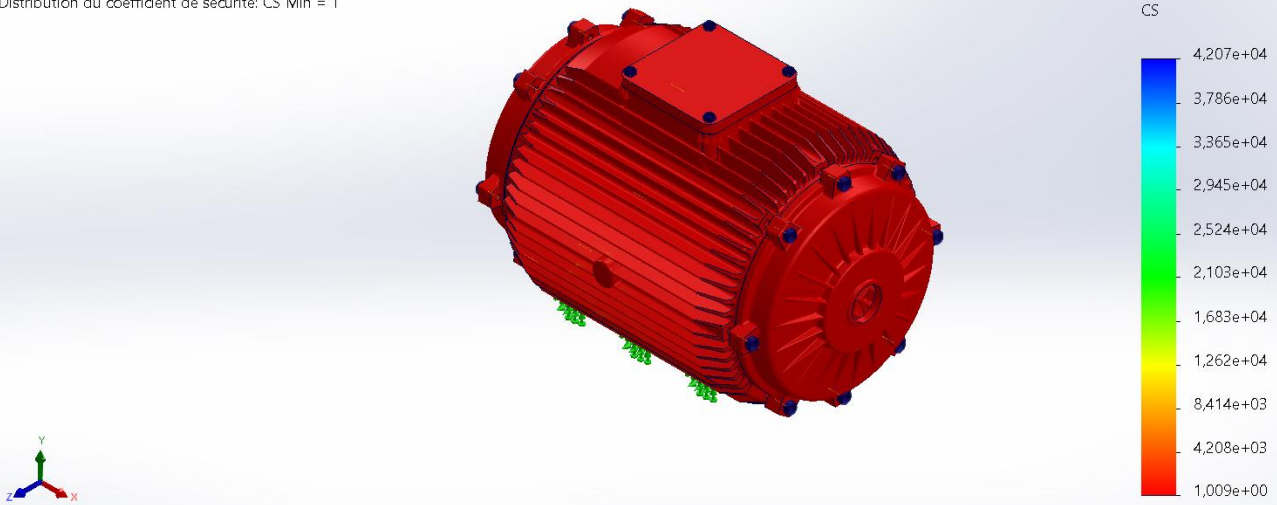
Nom du modèle: Assemblage pour simulation  
 Nom de l'étude: Statique(-Défaut-)  
 Type de tracé: Déformation statique Déformations1  
 Echelle de déformation: 442,429



Assemblage pour simulation-Statique-Déformations-Déformations1

Nom	Type	Min	Max
Coefficient de sécurité1	Automatique	1,009e+00 Noeud: 2092125	4,207e+04 Noeud: 35216

Nom du modèle: Assemblage pour simulation  
Nom de l'étude: Statique(-Défaut-)  
Type de tracé: Coefficient de sécurité Coefficient de sécurité1  
Critère : automatique  
Distribution du coefficient de sécurité: CS Min = 1



Assemblage pour simulation-Statique-Coefficient de sécurité-Coefficient de sécurité1



---

## Interprétation des résultats :

La simulation révèle les principaux critères suivants :

- La contrainte max de Von Mises : 164.1 MPa
- Le déplacement max : 0.13 mm
- La déformation max :  $9.52 \times 10^{-4}$  mm
- La limite élastique : 165.5 MPa
- Le coefficient de sécurité :  $CS=1$  donc le moteur va résister
- Le coefficient de sécurité des boulon min :  $CS=5.62$  donc les boulons vont résister

## Conclusion

La simulation montre que les boulons ont un coefficient de sécurité supérieure a 2. L'allongement reste négligeable et aucune concentration n'a été observée aux interfaces. La sollicitation est principalement axiale, ce qui confirme une bonne répartition des efforts. Le choix du boulon et son positionnement sont donc validés par cette simulation.

La simulation réalisée avec SolidWorks a permis de valider la tenue mécanique de l'enveloppe antidéflagrante face à une surpression interne. Les résultats ont montré que les contraintes maximales restent inférieures à la limite élastique du matériau, assurant ainsi la sécurité du dispositif. Toutefois, cette étude repose sur des hypothèses simplificatrices (charge statique, absence d'effet thermique), ce qui invite à considérer des approches complémentaires, telles qu'une simulation transitoire ou des essais physiques, pour affiner l'évaluation. Ces travaux constituent néanmoins une première étape concluante dans la validation du design.



**Mise en plan**