

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE



Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Energétique.

Présenté par :

FETHIZA ALI Ali.

ATIA Mosbah.

Intitulé :

**Evaluation des propriétés mécaniques d'une fonte GS utilisée à
la fabrication d'un arbre de transmission d'une éolienne.**

Soutenue le : 28/05/2025.

Devant le jury composé de :

Dr. MENECEUR Nouredine

Président.

Dr. NECIB Djilani

Examineur.

Dr. BOULIFA Mohammed Iliasse

Encadreur.

Dr. DEGHOUM Khalil

Co-Encadreur.

Année académique : 2024/2025

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

*À mes parents bien-aimés,
qui m'ont toujours soutenu(e) avec amour, patience et
encouragement.*

*À mes frères et sœurs,
pour leur présence constante, leur compréhension et leur soutien
moral.*

*À mes chers amis,
qui ont su être à mes côtés durant les moments difficiles et les
étapes importantes de ce parcours.*

*À tous ceux et celles
qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce
mémoire.*

Remerciements

En préambule à ce mémoire je remercie ALLAH qui m'a aidé et me donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude. je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire. Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté, et du département du génie mécanique pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur BOULFA Mohemmed Ilyass qu'en tant que Directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

Résumé

Ce projet porte sur l'étude approfondie de l'utilisation de la fonte à graphite sphéroïdal (GS) dans les arbres de transmission des éoliennes. Il débute par une contextualisation de l'énergie éolienne, avant d'analyser la métallurgie et les propriétés mécaniques de la fonte GS, en incluant l'effet des traitements thermiques comme l'ADI. Une modélisation mécanique permet d'évaluer le comportement de l'arbre en fonte GS sous diverses sollicitations, en intégrant des paramètres comme le module de Young et le coefficient de Poisson. Enfin, une comparaison numérique avec l'acier montre que, malgré une rigidité légèrement inférieure, la fonte GS demeure un choix sûr, performant et économiquement avantageux pour ce type d'application. Ce travail contribue à l'optimisation du choix des matériaux dans le domaine de l'ingénierie des éoliennes, en faveur de solutions durables et rentables.

Mots-clés: Fonte à graphite sphéroïdal (GS), Arbres de transmission des éoliennes, Fonte GS austénitisée, Optimisation des matériaux.

الملخص

يتناول هذا العمل دراسة شاملة حول استخدام الـ (GS) fonte à graphite sphéroïdal في أعمدة نقل الحركة داخل التوربينات الهوائية. يبدأ المشروع بتوضيح مبادئ الطاقة الهوائية وتطورها، ثم ينتقل إلى تحليل تفصيلي للتركيب المعدني والخصائص الميكانيكية للـ GS، بما في ذلك تأثير المعالجات الحرارية مثل التحويل إلى ADI. كما يتضمن المشروع تحليلًا ميكانيكيًا دقيقًا للأحمال والضغوط التي يتعرض لها عمود التوربين الهوائي عند استخدام الفونـ GS، بالاعتماد على خواص مادية مثل معامل يونغ ومعامل بواسون. وفي الختام، تقدم الدراسة مقارنة عددية بين أداء الفونـ GS والصلب، موضحة أن الفونـ GS، رغم امتلاكه صلابة أقل قليلًا، يظل خيارًا ملائمًا وآمنًا من الناحية الهيكلية والاقتصادية بفضل خصائصه الجيدة وتكلفته المنخفضة. يساهم هذا المشروع في تحسين اختيار المواد في تصميم مكونات التوربينات الهوائية، ويعزز التوجه نحو حلول مستدامة وأكثر اقتصادية في مجال الطاقات المتجددة.

الكلمات المفتاحية: الحديد الزهر ذو الجرافيت الكروي (الفونـ GS)، أعمدة نقل الحركة في التوربينات الهوائية، الحديد الزهر GS المعالج حراريًا (ADI)، تحسين اختيار المواد.

Abstract

This project presents an in-depth study of the use of spheroidal graphite cast iron (SG iron) in wind turbine drive shafts. It begins with an overview of wind energy, then explores the metallurgy and mechanical properties of SG iron, including the effects of heat treatments like ADI. A mechanical analysis models the behavior of the shaft under various loads using parameters such as Young's modulus and Poisson's ratio. Finally, a numerical comparison with steel shows that, although SG iron has slightly lower stiffness, it remains a safe, effective, and cost-efficient material choice for the application. This work contributes to optimizing material selection in wind turbine engineering, supporting more sustainable and economically viable energy solutions.

Keywords: Spheroidal Graphite Cast Iron (SG Iron), Wind Turbine Drive Shafts, Austempered SG Iron (ADI), Material Optimization.

TABLE DES MATIERES

Dédicace.	
Remerciements.	
Résumé.	
LISTE DES FIGURES.	
LISTE DES TABLEAUX.	
LISTE DES SYMBOLES.	
Introduction Générale.....	01
Chapitre I: Fondements scientifiques et techniques sur l'énergie éolienne.	
I.1. INTRODUCTION.....	04
I.2. HISTORIQUE.....	04
I.3. DÉFINITION.....	05
I.4. QUELQUES NOTIONS SUR LE VENT.....	05
I.5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	06
<i>I.5.1. Les avantages.....</i>	<i>06</i>
<i>I.5.2. Les inconvénients.....</i>	<i>06</i>
I.6. DIFFÉRENTS TYPES D'ÉOLIENNES.....	07
I.6.1. Eoliennes à axe horizontal.....	07
I.6.1.a. Avantages.....	07
I.6.1.b. Inconvénients.....	07
I.6.2. Eoliennes à axe vertical.....	08
I.6.2.a. Avantages.....	08
I.6.2.b. Inconvénients.....	08
I.6.3. Les raisons pour choisir une grande éolienne.....	09
I.6.4. Les raisons pour choisir une éolienne plus petite.....	09
I.7. L'ÉOLIEN EN ALGERIE.....	10
I.7.1. Carte de gisement éolien en Algérie.....	10
I.8. ASPECT ENVIRONNEMENTAL DE L'EOLIEN.....	13
I.8.1. Bilan environnemental global.....	13
I.8.2. Impacte sonore.....	13
I.8.3. Impacte visuel.....	13

I.9. ETAT DE L'ART, PRINCIPES ET DESCRIPTIF D'UNE EOLIENNE.....	14
<i>I.9.1. Descriptif d'une éolienne.....</i>	<i>15</i>
<i>I.9.2. Les différents composants d'une nacelle.....</i>	<i>16</i>
I.10. PRINCIPE D'UNE ÉOLIENNE.....	21

Chapitre II: Étude générale sue les fontes.

II.1. GÉNÉRALITES SUR LES FONTES.....	23
II.2. ELABORATION DE LA FONTE.....	24
<i>II.2.1. Les fontes de première fusion.....</i>	<i>24</i>
<i>II.2.2. Les fontes de deuxième fusion.....</i>	<i>24</i>
II.3. FONTES GRISES.....	24
<i>II.3.1. Fontes à graphite lamellaire.....</i>	<i>24</i>
<i>II.3.2. Fontes à graphite sphéroïdal.....</i>	<i>25</i>
<i>II.3.3. Fontes à graphite vermiculaire.....</i>	<i>26</i>
<i>II.3.4. Formes dégénérées de graphite.....</i>	<i>26</i>
<i>II.3.5. Caractéristiques mécaniques fondamentales des fontes grises.....</i>	<i>27</i>
II.4. LES FONTES BLANCHES.....	27
II.5. LES FONTES MALLÉABLES.....	28
II.6. LE GRAPHITE.....	28
<i>II.6.1. Graphite sphéroïdal.....</i>	<i>29</i>
<i>II.6.2. Sphéroïdisation.....</i>	<i>29</i>
<i>II.6.3. Inoculation.....</i>	<i>29</i>
<i>II.6.4. Solidification du graphite sphéroïdal dans les fontes</i>	<i>29</i>
<i>II.6.5. Effet des éléments traces sur la croissance du graphite.....</i>	<i>30</i>
<i>II.6.6. Influence des éléments spéciaux Aluminium.....</i>	<i>32</i>

Chapitre III: Étude des caractéristiques mécaniques des fontes à Graphite Sphéroïdal (GS).

III.1. DÉFINITION.....	35
III.2. LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES FONTES A GS.....	35
<i>III.2.1. Dureté.....</i>	<i>35</i>
<i>III.2.2. Caractéristiques en traction.....</i>	<i>35</i>
<i>III.2.3 Résistance à la compression.....</i>	<i>35</i>

III.2.4. Caractéristique en cisaillement et en torsion.....	36
III.2.5. Caractéristiques de fatigue.....	36
III.2.6. Propriétés aux températures élevées.....	36
III.2.8. Caractéristiques élastiques et capacité d'amortissement.....	36
II.2.9. Résistance à l'usure-Résistance à la corrosion.....	37
III.3. VARIABLES INFLUENÇANT LA RESISTANCE MECANIQUE.....	38
III.3.1. Microstructure.....	38
III.3.2. Composition chimique.....	38
III.4. INFLUENCE DE CERTAINS ELEMENTS CARBURIGENES SUR LA MICROSTRUCTURE DES FONTES À GS.....	38
a. Les carbures.....	38
b. La ferrite.....	39
III.5. LES DIVERSES NUANCES DE FONTE À GS.....	39
III.6. Elaboration des fontes GS.....	40
III.6.1. Méthodes de sphéroïdisation.....	41
III.6.2. Théorie de la sphéroïdisation.....	43
III.7. Les avantages de la fonte à graphite sphéroïdal.....	44
III.8. Domaines d'applications.....	45
III.9. Types de fontes FGS AM.....	45
Chapitre IV: Étude des forces appliquées sur l'arbre de transmission en fonte GS d'une éolienne de 3 kW à l'aide du logiciel "ANSYS".	
IV.1. INTRODUCTION.....	51
IV.2. PROPRIETES MECANQUES DE LA FONTE GS.....	51
IV.3. FORCES APPLIQUEES SUR L'ARBRE.....	51
a) Force de torsion (couple transmis)	51
b) Force axiale.....	52
c) Force radiale (flexion)	52
d) Moments de flexion combinés.....	53
IV.4. INFLUENCE DES PROPRIETES MECANQUES.....	53
IV.5. Définition du logiciel ANSYS.....	53
IV.6. Description de la conception de l'éolienne.....	54
IV.6.1. Géométrie.....	54
IV.6.2. Modèle.....	55
IV.6.3. Structure statique.....	55

IV.7. Présentation des résultats et discussion.....	56
IV.8. Comparaison des résultats de simulation – Fonte GS et Acier.....	61
IV.9. CONCLUSION.....	62
Conclusion Générale.....	63
REFERENCE.....	65

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Exemple d'une éolienne à axe horizontal.....	07
Figure I.2. Technologie éolienne à axe vertical.....	08
Figure I.3. Photo satellite de la ferme éolienne implanté a ADRAR.....	10
Figure I.4. La vitesse moyenne du vent en Algérie estimée à 10 m du sol.....	11
Figure I.5. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne du vent annuelle à 10 m du sol. (Eté et Printemps).....	11
Figure I.6. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol. (Hiver et automne).....	12
Figure I.7. Éoliennes dans un paysage rural.....	13
Figure I.8. Parc éolien très dense.....	14
Figure I.9. Parc éolien espacé.....	14
Figure I.10. Eléments constituant une éolienne.....	15
Figure I.11. Constitution d'une nacelle.....	16
Figure I.12. Palier et arbre lent.....	16
Figure I.13. Frein d'urgence.....	17
Figure I.14. Le multiplicateur.....	17
Figure I.15. Générateur.....	18
Figure I.16. Girouette.....	19
Figure I.17. Anémomètre.....	19
Figure I.18. Moteur directionnel.....	19
Figure I.19. Puissance suivant le diamètre de l'éolienne.....	20
Figure I.20. Le moyeu et le couronne d'orientation des pales.....	20
Figure I.21. Moyeu.....	20
Figure I.22. Pales de remplacement mesurant environ 15 m de long.....	20
Figure II.1. Diagramme de phases fer-carbone [19]. Le système stable fer-graphite apparaît en traits pleins, le système métastable fer-cémentite en traits pointillés.....	23
Figure II.2. Représentation schématique des différentes classes de graphite lamellaire [15]	25
Figure II.3. Images en microscopie optique (a) et en microscopie électronique à balayage après dissolution de la matrice (b) d'une fonte GS.....	25
Figure II.4. Images en microscopie optique (a) et en microscopie électronique à balayage après attaque profonde (b) d'une fonte à graphite vermiculaire.....	26
Figure II.5. Description de la solidification d'une fonte hypereutectique [38]	30
Figure II.6. Forme du graphite observée en fonction des teneurs résiduelles en soufre et magnésium dans les travaux de Jayaraman et al. Portant sur des fontes malléables [42]	31
Figure III.1. Cycle de production des pièces en FGS.....	40
Figure III.2. Procédé In-Mold.....	41
Figure III.3. Procédé sandwich dans une poche de coulée.....	42
Figure III.4. Procédé flow treat.....	43
Figure III.5. Croissance type feuille de chou.....	44
Figure III.6. FGS à matrice ferritique.....	45
Figure III.7. FGS à matrice perlitique.....	46
Figure III.8. FGS à matrice ferrito-perlitique.....	46
Figure III.9. Différentes FGS alliées.....	47
Figure III.10. FGS alliée Martensitique.....	47

Figure III.11. FGS alliée Austénitique.....	48
Figure III.12. FGS alliée Bainitique.....	48
Figure III.13. Courbes de résistance à la traction en fonction de l'allongement à la rupture pour différents types de fontes.....	49
Figure IV.1. Interface Workbench 2020 R1.....	54
Figure IV.2. Géométrie.....	54
Figure IV.3. Modèle.....	55
Figure IV.4. Structure statique.....	55
Figure IV.5. Déplacement total de FONT GS.....	56
Figure IV.6. Déplacement directionnel(Axe X) de FONT GS.....	56
Figure IV.7. Déplacement directionnel(Axe Y) de FONT GS.....	57
Figure IV.8. Déplacement directionnel(Axe Z) de FONT GS.....	57
Figure IV.9. Déformation élastique équivalente de FONT GS.....	57
Figure IV.10. Contrainte équivalente de FONT GS.....	58
Figure IV.11. Déplacement total de ACIE.....	59
Figure IV.12. Déplacement directionnel(Axe X) de FONT GS.....	59
Figure IV.13. Déplacement directionnel(Axe Y) de ACIE.....	59
Figure IV.14. Déplacement directionnel(Axe Z) de ACIE.....	60
Figure IV.15. Déformation élastique équivalente de ACIE.....	60
Figure IV.16. Contrainte équivalente de ACIE.....	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Stations dont les vitesses de vent ont été publiées dans l'Atlas Vent produit par l'O.N.M.....	12
Tableau II.1. Anisotropie de certaines propriétés physiques du graphite [21]	28
Tableau III.1. La dureté des fontes à graphite sphéroïdal.....	35
Tableau III.2. Propriétés aux températures élevées.....	36
Tableau III.3. La capacité d'amortissement des vibrations est nettement inférieure à celle des fontes grise.....	37
Tableau III.4. présente les nuances retenues par la norme AFNOR NF A323-201 avec indication de leurs caractéristiques mécaniques.....	39
Tableau IV.1: comparatif des résultats.....	61

LISTE DES SYMBOLES

T : couple transmis à l'arbre en **(N.m)**.

P : Puissance générée par la turbine en **Watts** (3000 W).

ω : vitesse angulaire de rotation de l'arbre en **rad/s**.

F_a : force axiale appliquée à l'arbre **(N)**.

F_t : force totale générée par les pales **(N)**.

β : angle de pas des pales, qui dans ce cas est de 20°.

F_r : force radiale **(N)**

F_t : force totale générée par les pales **(N)**.

β : angle de pas des pales.

M_f : moment de flexion **(N.m)**.

F_r : force radiale **(N)**.

l : longueur du levier, c'est-à-dire la distance entre l'axe de l'arbre et le point d'application de la force.

Introduction Générale

Dans un contexte mondial marqué par une prise de conscience croissante des enjeux environnementaux et de la nécessité de réduire notre dépendance aux énergies fossiles, les énergies renouvelables s'imposent comme des alternatives durables et stratégiques. Parmi elles, l'énergie éolienne occupe une place privilégiée, du fait de son fort potentiel de production, de son faible impact environnemental, et de sa capacité à s'intégrer dans des réseaux énergétiques modernes et intelligents. Le développement des systèmes éoliens, cependant, ne repose pas uniquement sur la conception aérodynamique des turbines ou la captation optimale du vent, mais aussi sur la qualité des matériaux utilisés dans les composants mécaniques critiques, tels que l'arbre de transmission.

C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail, visant à explorer la synergie entre la performance des matériaux métalliques, en particulier les fontes à graphite sphéroïdal (GS), et les exigences mécaniques imposées par les dispositifs de transmission dans une éolienne. Ces fontes, connues pour leur combinaison remarquable de résistance mécanique, de ductilité et de résistance à l'usure, représentent une solution prometteuse pour les éléments soumis à de fortes contraintes.

Notre étude s'articule autour de quatre chapitres complémentaires. Le premier chapitre est consacré à une vue d'ensemble de l'énergie éolienne, ses principes de fonctionnement, ses composants principaux ainsi que ses enjeux technologiques et environnementaux. Le deuxième chapitre s'intéresse à la caractérisation expérimentale d'une fonte GS, à travers des essais mécaniques, métallographiques et des analyses structurelles visant à en évaluer la performance dans un cadre industriel. Le troisième chapitre approfondit la compréhension des propriétés et caractéristiques intrinsèques des fontes à graphite sphéroïdal, en mettant en lumière les mécanismes microstructuraux qui confèrent à ces matériaux leur comportement singulier. Enfin, le quatrième chapitre est consacré à une simulation numérique de l'arbre de transmission d'une éolienne réalisé en fonte GS, en tenant compte des contraintes mécaniques, de la géométrie, et des conditions de fonctionnement réelles.

À travers cette étude, nous cherchons à démontrer que le choix judicieux des matériaux, combiné à une approche intégrée entre expérimentation et simulation, permet d'optimiser la fiabilité et la durabilité des systèmes éoliens, tout en valorisant des alliages innovants comme les fontes GS dans des applications à haute exigence mécanique.

Chapitre I

Fondements scientifiques
et techniques
sur l'énergie éolienne

I.1. INTRODUCTION

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres.

Parmi ses énergies on aura l'énergie éolienne qui produit l'électricité grâce à la force des vents. L'objectif de ce premier chapitre est donc de présenter un état de l'art sur l'énergie éolienne ainsi que les différentes chaînes dans la conversion de l'énergie éolienne soit dans les systèmes connectés au réseau électrique ou dans les systèmes isolés et autonomes.

I.2. HISTORIQUE

L'énergie éolienne, qui tire son nom d'Éole (dieu du vent dans la Grèce antique) est l'énergie produite par le vent. [1]

Cette énergie a d'abord été longtemps utilisée à partir de l'Antiquité pour un travail mécanique. Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie du vent pour faire avancer les bateaux, moudre du grain ou pomper de l'eau. Cette ressource nous sert désormais à produire de l'électricité.

Dans les années 90, l'amélioration de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 1 MW. [2]

L'énergie éolienne est aujourd'hui la plus accessible en termes de technologie et de coût. Elle est donc tout naturellement appelée à prendre une place importante dans le « mix énergétique » mondial.

Ces éoliennes servent à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydroélectrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.

L'énergie éolienne se développe à un rythme soutenu dans presque tous les pays du monde, avec une croissance de 30% par an. Ce fort développement est dû aux qualités environnementales de cette forme d'énergie mais également à d'autres facteurs économiques : rapidité d'installation, prévisibilité du coût sur le long terme, indépendance énergétique, aides financières, etc.

Bien au point techniquement, la production électrique éolienne est en plein essor. Que ce soit à l'échelle individuelle avec le petit éolien ou à l'échelle nationale avec le grand éolien, l'énergie.

du vent peut contribuer à diversifier la production électrique de façon décentralisée, en ne produisant directement ni polluants ni CO₂ et sans crainte d'épuisement de la ressource.

C'est surtout grâce à des tarifs liés aux fortes subventions, à son image vertueuse et à l'espoir que son développement industriel réussisse à en faire baisser les coûts, que l'énergie éolienne s'est développée. [1]

I.3. DÉFINITION

L'énergie du vent ou l'énergie éolienne est le résultat des déplacements de l'air. Plus spécifiquement, c'est l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Elle peut être utilisée de deux manières : directe et indirecte.

- **Direct** : c'est-à-dire l'énergie éolienne est directement utilisée, par exemple, le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin. [2]
- **Indirect** : l'énergie éolienne est transformée en énergie électrique, l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif.

Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. [2]

I.4. QUELQUES NOTIONS SUR LE VENT

Le vent est le résultat des déplacements de l'air.

Sur la terre, presque tous les vents sont créés par le rayonnement solaire : Le soleil réchauffe une masse terrestre et la chaleur de la terre est absorbée par l'air environnant, lorsque l'air atteint une certaine température, il commence à s'élever rapidement en hauteur.

Ceci crée au niveau du sol une région de basse pression, et au-dessus du sol une région de haute pression.

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers. Le vent est défini par sa direction, et sa vitesse.

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions.

Aux altitudes moyennes et aux grandes altitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire.

Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud. Les sens sont inversés par rapport aux précédents.

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression).

Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories. [3]

I.5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.5.1. Les avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, fiable, gratuit, inépuisable économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- ✓ Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ✓ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie.
- ✓ La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles. [4]
- ✓ C'est une énergie dont l'utilisation ne pollue pas, ni de gaz à effet de serre, ni de production de déchets « déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire ».
- ✓ Utilisable dans tous les endroits fortement exposés aux vents. [2]

I.5.2. Les inconvénients

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages:

- ✓ Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- ✓ Énergie change suivant la météo : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- ✓ Impact visuel: les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage.
- ✓ Les oiseaux: les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. [2]

I.6. DIFFÉRENTS TYPES D'ÉOLIENNES

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

I.6.1. Eoliennes à axe horizontal

Dans ces types d'éoliennes, l'arbre est parallèle au sol. Bien qu'elles doivent s'aligner suivant la direction du vent, les éoliennes à axe horizontal sont simples du point de vue mécanique et nécessitent un encombrement au sol relativement faible pour le montage et la fixation de la tour. La plupart des petites et grandes éoliennes installées aujourd'hui sont des éoliennes à axe horizontal. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi pales. [2]



Figure I.1. Exemple d'une éolienne à axe horizontal [64].

I.6.1.a. Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. [15]

I.6.1.b. Inconvénients

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident. [15]

I.6.2. Eoliennes à axe vertical

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux. A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit.

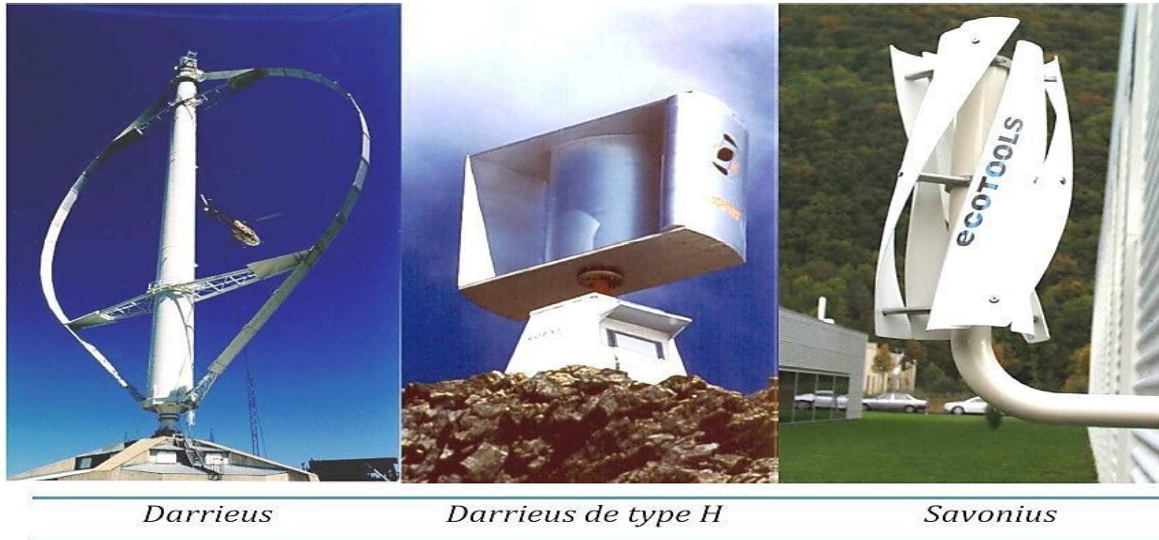


Figure I.2. Technologie éolienne à axe vertical [65].

I.6.2.a. Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

I.6.2.b. Inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour. [15]

I.6.3. Les raisons pour choisir une grande éolienne

1. Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes.

Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle commande..) sont plus ou moins les mêmes, quel que soit la taille de l'éolienne.

2. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

3. Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite. [4]

I.6.4. Les raisons pour choisir une éolienne plus petite

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.

2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.

3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.

4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

On distingue aussi le "grand éolien", qui concerne les machines de plus de 250 KW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 KW et 250 KW) et du petit éolien (inférieur à 36 KW).

I.7. L'ÉOLIENNE EN ALGERIE

Le programme national de développement des énergies renouvelables (EnR), adopté en 2011 puis révisé en 2015, ambitionne d'atteindre, à l'horizon 2030, une puissance totale de 22000 Mégawatts (MW) dédiés à la seule consommation locale. Il prévoit, pour cela, de mettre en œuvre un large éventail de filières technologiques où le photovoltaïque (PV) et l'éolien se taillent la part du lion avec respectivement 13575 MW et 5010 MW, le reste étant réparti entre le thermo-solaire (CSP), la biomasse, la cogénération et la géothermie. Suite à la révision du programme national en 2015, la part de l'énergie éolienne a été rehaussée de 2000 MW à 5010 MW et occupe désormais la seconde place derrière le photovoltaïque, loin devant les autres filières. [8]

I.7.1. Carte de gisement éolien en Algérie

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), publie, à l'occasion du solstice d'hiver, une nouvelle carte du gisement éolien national.

Etant engagée dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables, l'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables [6]. Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme. Avant d'étudier la possibilité d'implanter une ferme éolienne dans une région donnée, il est nécessaire de faire des études du gisement éolien pour une connaissance précise de la météorologie du vent.

De ce fait, plusieurs chercheurs de l'EPST CDER ont depuis quelques années axées leurs recherches dans l'élaboration de cartes éoliennes de l'Algérie [8].



Figure I.3. Photo satellite de la ferme éolienne implanté a ADRAR [66].

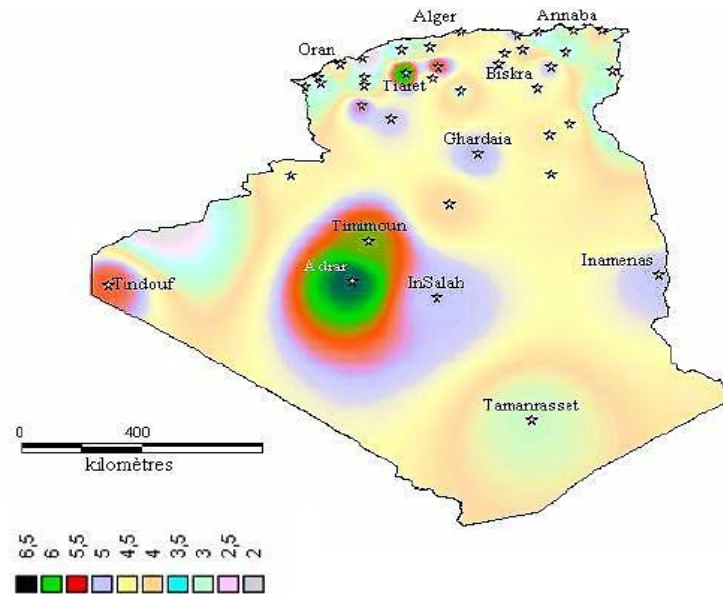


Figure I.4. La vitesse moyenne du vent en Algérie estimée à 10 m du sol [66].

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en **Figure I.5.** (Été et Printemps) et **Figure I.6** (Hiver et Automne). On remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année.

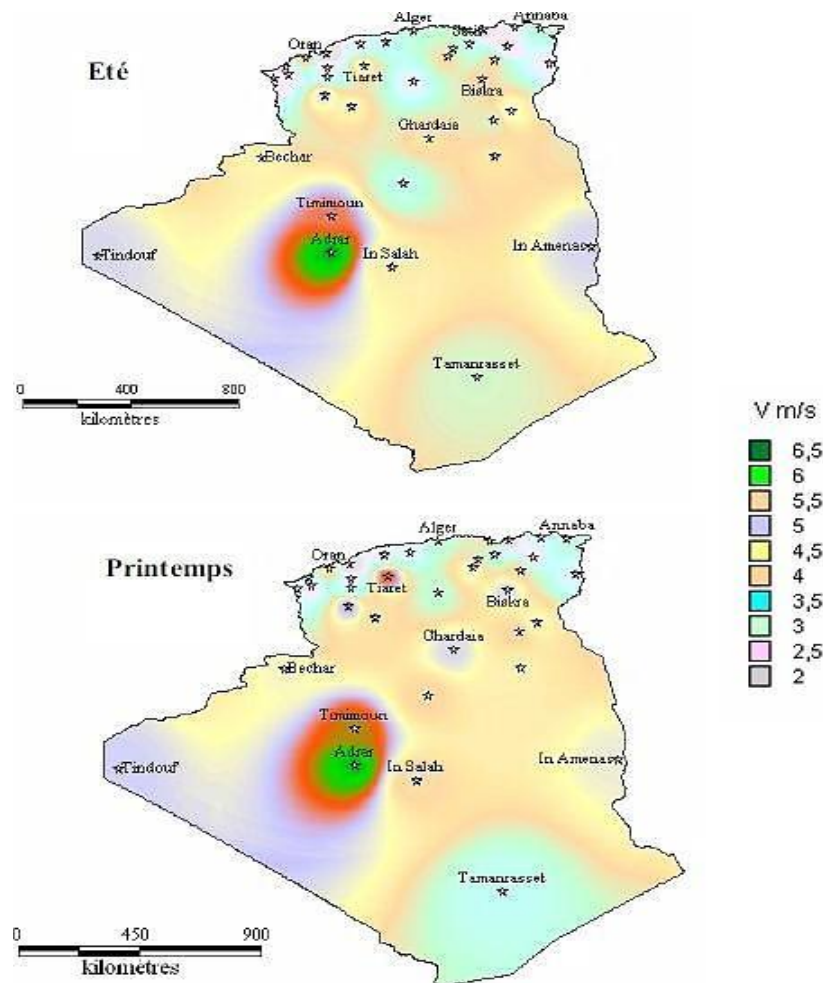


Figure I.5. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne du vent annuelle à 10 m du sol. (Été et Printemps) [66].

Tous les atlas établis présentent la région sud-ouest, à savoir Adrar, Timimoune et In-Salah comme la zone les plus ventée, à l'exception de l'atlas hivernal qui se distingue par le microclimat de Tiaret qui présente les vitesses de vent les plus élevées.

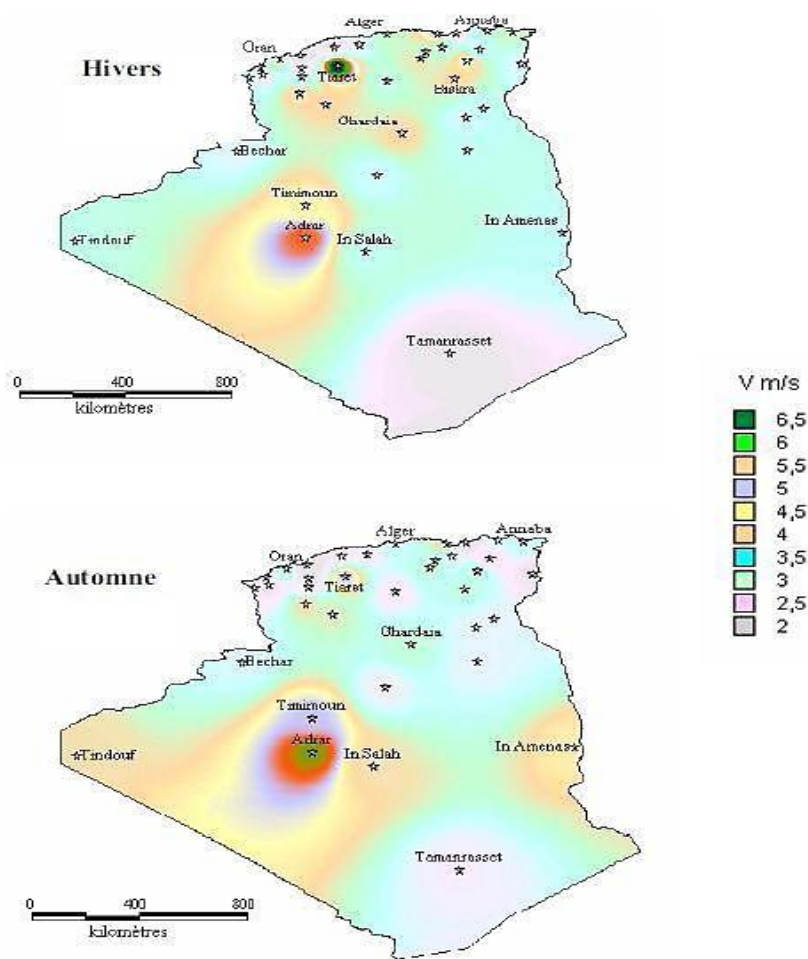


Figure I.6. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol. (Hiver et automne) [66].

Tableau I.1. Stations dont les vitesses de vent ont été publiées dans l'Atlas Vent produit par l'O.N.M..

WILAYA	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Rugosité (deg)	Vitesse du vent (m/s)
ADRAR	0.28	27.82	0.01	5.9
TIMIMOUNE	0.28	28.29	0.01	5.1
TIARET	1.47	35.37	0.02	4.7
TINDOUF	-8.10	27.67	0.00	4.6
GHARDAÏA	3.80	32.40	0.03	4.6

Dans le tableau I.1 nous avons les stations les plus éventées du pays, la plupart d'entre eux sont du sud su pays. On sait qu'une éolienne démarre avec une vitesse de vent minimal de 3.5m/s. Donc on peut dire que le sud du pays a un réel potentiel dans l'éolien comme on peut le voir a Adrar que le vent se lève a plus de 5.9 m/s c suffisent pour faire tourné le rotor.

I.8. ASPECT ENVIRONNEMENTAL DE L'EOLIEN

I.8.1. Bilan environnemental global

L'éolien était considéré, avant la prise de conscience des pollutions liées à l'exploitation des terres rares, comme la filière ayant le meilleur bilan environnemental dans le classement effectué dans l'étude multicritère, étude réalisée par le département énergie et atmosphère de l'université de Stanford.[7] Une éolienne ne consomme pas d'eau douce, ne nécessite pas de pesticides, n'induit pas de pollution thermique. Elle a une empreinte surfacique très faible et a un impact sur la biodiversité presque négligeable. Elle est de plus disponible presque partout, de manière décentralisée. C'est une énergie propre qui ne produit directement ni dioxyde de carbone, ni dioxyde de soufre, ni fines particules, ni déchets radioactifs à vie longue, ou n'importe quel autre type de pollution de l'air ou de l'eau sur son site de fonctionnement. Par contre, la production des aimants de forte puissance contenus dans la majorité des générateurs nécessite de grande quantité de néodyme dont l'extraction et surtout le raffinage sont dénoncés pour leur impact catastrophique sur l'environnement [9].



Figure I.7. Éoliennes dans un paysage rural [66].

La fabrication de l'éolienne puis ultérieurement son entretien consomme des ressources et produit indirectement des pollutions. Pour un mat d'éolienne de 80 mètres, 800 tonnes d'acier et de béton sont injectées à sa base pour les fondations. Cela est très supérieur (en MWh/an) aux quantités nécessaires à la construction d'une centrale de tout autre type y compris le nucléaire qui, sous cet aspect, est favorisé par sa très haute densité de puissance. Néanmoins l'impact de ces facteurs est peu important sur la durée de vie de l'éolienne.

I.8.2. Impacte sonore

Début 2006 le Groupe de Travail de la Faculté de Médecine sur les éoliennes affirmait :

- Que la production d'infrasons par les éoliennes est sans danger pour l'homme.
- Qu'il n'y a pas de risques avérés de stimulation visuelle stroboscopique par la rotation des pales des éoliennes
- Que la réglementation relative à l'impact sur la santé du bruit induit était à cette date insuffisante, ce qui a été corrigé depuis l'étude d'impact prévoyant maintenant une cartographie des nuisances sonores et des mesures individuelles chez les habitants les plus proches

Les machines de dernière génération ont fait des progrès importants sur le plan des nuisances sonores et elles peuvent être programmées, dans des circonstances particulières de force et orientation du vent, pour réduire l'impact sur une zone d'habitation proche

Une éolienne produit un bruit de 55 dBA au pied de sa tour, ce qui correspond à l'ambiance sonore d'un bureau. Ce niveau sonore est en général considéré comme acceptable.

I.8.3. Impacte visuel

Comparativement aux premiers parcs éoliens, très denses **Figure I.8**, les nouveaux parcs voient leurs éoliennes plus espacées **Figure I.9**, celles-ci étant de plus grandes taille et puissance. Ils ont donc perdu leur aspect surpeuplé.



Figure I.8. Parc éolien très dense [66].



Figure I.9. Parc éolien espacé [66].

I.9. ETAT DE L'ART, PRINCIPES ET DESCRIPTIF D'UNE EOLIENNE

L'énergie éolienne peut être utilisée de trois manières :

- ✓ Conservation de l'énergie mécanique: le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- ✓ Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...).
- ✓ Production d'énergie électrique; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour produire du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. [2]

I.9.1. Descriptif d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de:

Fondation, le mât (tour ou pylône), le rotor (moyeu et pales) et la nacelle comme il est montré sur la figure suivante:

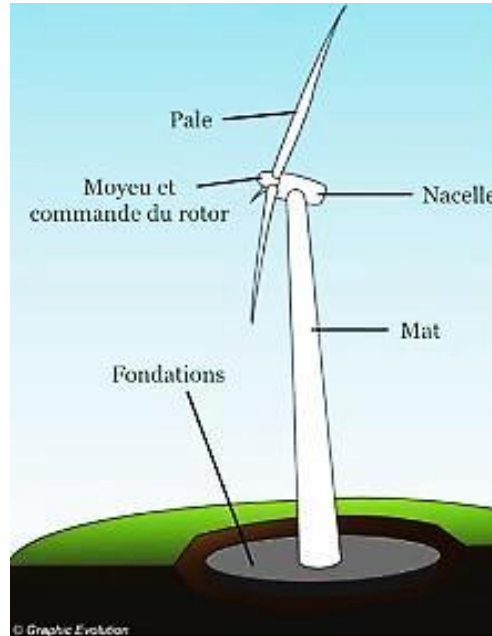


Figure I.10. Eléments constituant une éolienne [66].

a. La Fondation: C'est une assise de béton qui permet de fixer de façon rigide l'ensemble de la structure de l'éolienne. [2]

b. La Tour ou mât: Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. [10] Le mât peut être réalisé en acier roulé ou plié, protégé contre la corrosion ou bien en béton armé. [2]

c. Types de tours:

Il existe trois grands types de tour :

- ✓ Tours haubanés
- ✓ Tours treillis
- ✓ Tours hybrides

Quel que soit le type du support utilise il faut tenir compte de :

- la Protection contre la corrosion.
- la Facilité de montage.
- Risque de givrage. [2]

d. La nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine utilisée. [2]

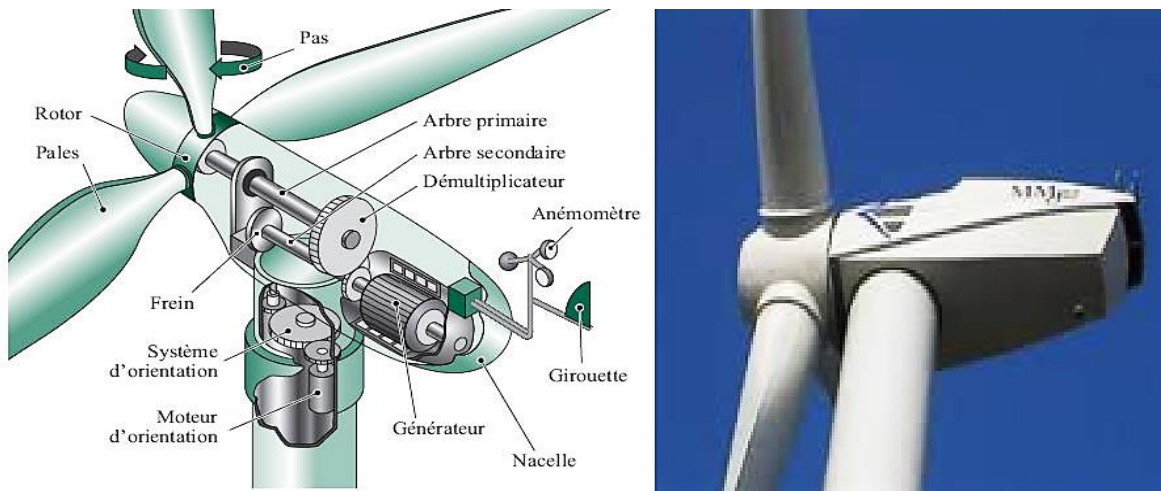


Figure I.11. Constitution d'une nacelle [2].

I.9.2. Les différents composants d'une nacelle[11],[12],[13]

- **L'arbre de transmission** : Il est composé de deux arbres :
- **L'arbre primaire** : cet arbre transmet l'effort fourni par le rotor au multiplicateur. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre (20 - 40 tr/min).

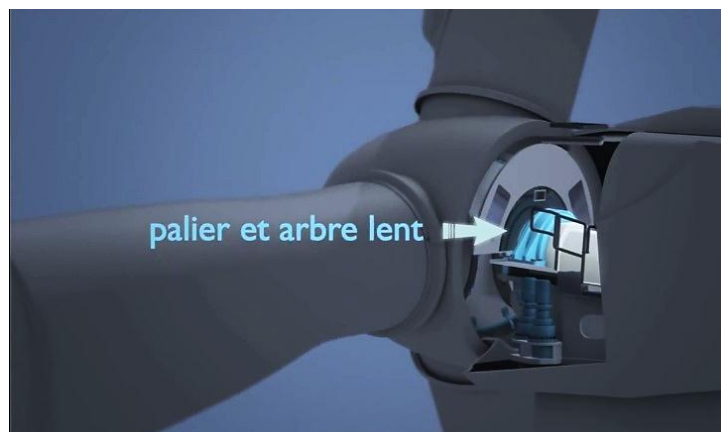


Figure I.12. Palier et arbre lent [2].

✓ **L'arbre secondaire** : il entraîne la génératrice à des vitesses élevées (environ 2000 tr/minute) et est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence.

- **Frein** : L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

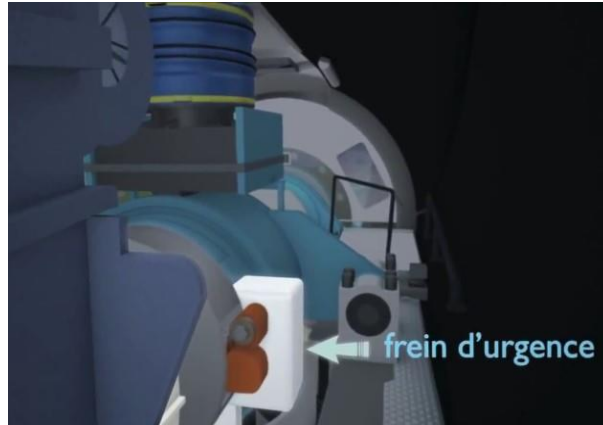


Figure I.13. Frein d'urgence [2].

- **Multiplicateur de vitesse** : Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire mu par le vent, et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

Le multiplicateur est un convertisseur de puissance. Il multiplie la vitesse d'entrée (rotor) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique. La puissance produite par la rotation du rotor d'une éolienne est transmise à la génératrice par toute une chaîne dynamique, c-à-d, par l'arbre lent (primaire), le multiplicateur et l'arbre rapide (secondaire). Le multiplicateur est monté sur plots élastiques (plots de caoutchouc) pour amortir les vibrations et limiter la transmission du bruit à la structure porteuse. Il peut aussi être monté flottant pour encaisser les à-coups de couple.



Figure I.14. Le multiplicateur [2].

Trois types de multiplicateurs peuvent être utilisés :

- Multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues d'entrées cylindriques. D'une réalisation économique. Pour un rapport de multiplication élevée, il est encombrant.
- Multiplicateur à engrenages avec trains planétaires qui permettent de réaliser des rapports de multiplication élevée sous un encombrement réduit et avec un bon rendement de transmission.
- Réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée. Les multiplicateurs industriels sont conçus pour assurer le fonctionnement silencieux des éoliennes.

- **La génératrice** : C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

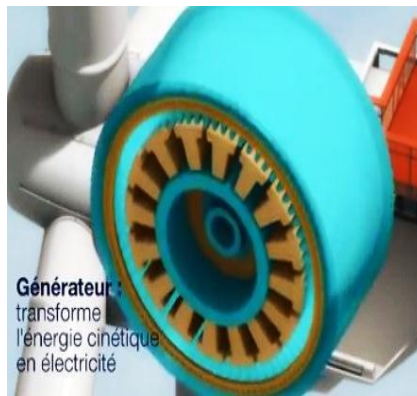


Figure I.15. Générateur [2].

- **Un contrôleur électronique** : Chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne.

Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor nacelle face au vent de manière à Maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le Contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

Chaque éolienne est équipée de son propre automate de contrôle. En générale on installe un système de contrôle et de commande tout en bas de la tour et à l'intérieur de la nacelle, la communication entre les deux systèmes est assurée par des fibres optiques. Sur certains nouveaux modèles, on a placé

un troisième système de contrôle dans le moyeu du rotor. Cette unité communique avec le système de contrôle situé dans la nacelle par des communications en série au travers de câbles couplés par des bagues et des balais sur l'arbre lent.

- **Divers dispositifs de refroidissement** : Le refroidissement des composantes situées à l'intérieur de la nacelle est assuré par des ventilateurs ou bien par des radiateurs d'eau ou d'huile.

- **Les outils de mesure du vent** : Nous avons deux types :

- ✓ **Une girouette (Figure 1.16)** : Permet de mesurer la direction du vent. Celle-ci est fixée sur un axe vertical à la base duquel se trouve une rose des vents.

- ✓ **Un anémomètre (Figure 1.17)** : Fournit le module du vecteur vent (vitesse ou force du vent), on l'exprime en mètre/seconde ou en nœud ($1 \text{ nœud} = 0.515 \text{ m/s}$). Il existe plusieurs types d'anémomètre (à ultrason ou à laser, à fil chaud) mais l'anémomètre le plus utilisé c'est l'anémomètre à coupelle (moulinet) : Il est muni d'un rotor de trois coupelles en métal ou en plastique qui sous l'effet du vent se met à tourner autour d'un axe vertical. La vitesse est enregistrée électroniquement.



Figure I.16. Girouette [2].



Figure I.17. Anémomètre [2].

- **Moteur d'orientation**: Le dispositif d'orientation de la nacelle permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. Cette couronne est intégrée au roulement d'orientation et peut être extérieure ou intérieure ; elle est soumise à des efforts importants.

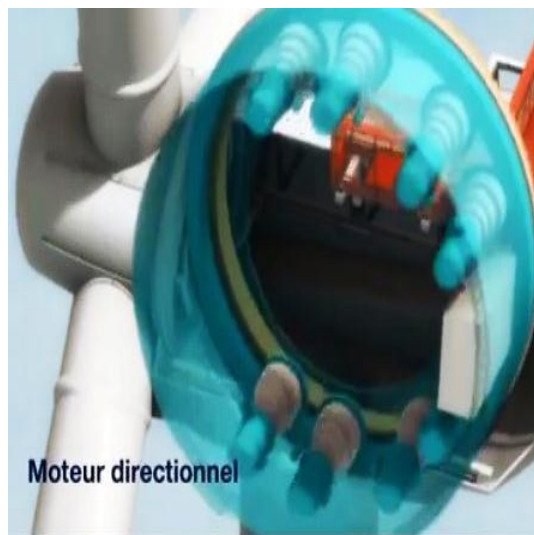


Figure I.18. Moteur directionnel [2].

- **Le rotor (moyeu et pales)**: Le rotor est composé des pales qui sont montées sur un moyeu, c'est la partie mobile du système. Le vent circule au-dessus des pales et convertit l'énergie cinétique du vent qui se déplace en mouvement de rotation du rotor. Le diamètre du cercle

formé par les pales du rotor détermine la quantité d'énergie pouvant être extraite du vent et par conséquent la puissance générée par le système. [2]

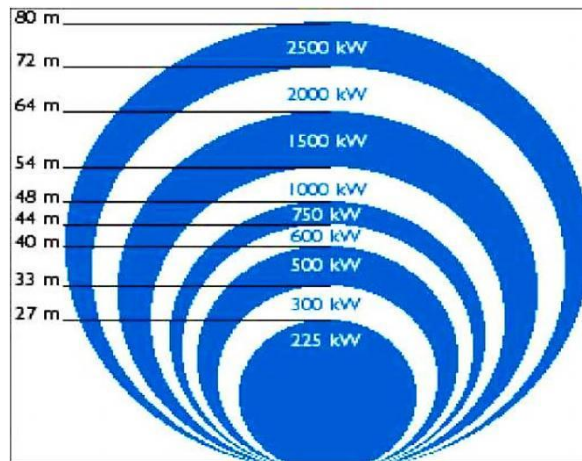


Figure I.19. Puissance suivant le diamètre de l'éolienne [2].

➔ Moyeu: En générale c'est une pièce d'acier moulé, il reçoit les pales sur des brides normalisées et se monte sur l'arbre lent (primaire) du multiplicateur. Sa conception utilise les éléments finis. Il est souvent protégé par une coupe en polyester forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique (plus esthétique que fonctionnelle). [2]

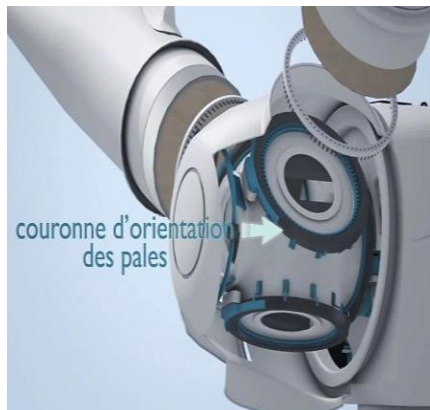


Figure I.20. Le moyeu et le couronne d'orientation des pales [2].



Figure I.21. Moyeu [2].

➔ Les Pales: Les pales sont une partie très importante des éoliennes, le nombre de pales influence directement l'efficacité de conversion du rotor, plus le nombre de pales est élevé, plus le couple transmis à l'arbre du rotor sera grand. [2]



Figure I.22. Pales de remplacement mesurant environ 15 m de long [2].

I.10. PRINCIPE D'UNE ÉOLIENNE

Les éoliennes produisent de l'électricité en utilisant l'énergie du vent pour entraîner une génératrice électrique. Le vent passe sur les pales, générant une portance et exerçant une force de rotation. Les pales rotatives font tourner un arbre à l'intérieur de la nacelle, qui passe dans une boîte de vitesse (multiplicateur); cette dernière augmente la vitesse de rotation jusqu'à celle qui est appropriée pour le générateur, lequel produit un champ magnétique pour convertir l'énergie de rotation en énergie électrique. La puissance fournie est transmise à un transformateur qui convertit l'électricité du générateur en une tension équivalente à celle du réseau.

Chapitre II

Étude générale sur les fontes

II.1. GÉNÉRALITES SUR LES FONTES

Les fontes sont des alliages (fer)-carbone – où (fer) définit un mélange riche en fer - dans lesquels la teneur en carbone est supérieure à 2,1 % massiques. Ceci est une conséquence du procédé de première fusion du minerai de fer à l'aide d'un haut-fourneau car l'utilisation de coke en tant que combustible entraîne un enrichissement du fer en carbone (le coke est utilisé pour réduire les oxydes de fer du minerai). En raison de cette teneur élevée en carbone, la solidification des pièces en fonte se fait essentiellement selon une transformation eutectique qui peut prendre place dans le diagramme stable (fer)-graphite ou dans le système métastable (fer)-cémentite (Fe_3C) [17].

L'ajout d'éléments d'alliage à la fonte permet de modifier les températures de transition des différents systèmes et il est ainsi possible de favoriser ou non la formation de graphite ou de cémentite [17].

Le silicium est un élément très largement utilisé dans le cas des fontes graphitiques car il permet d'augmenter de manière importante l'écart de température entre les deux eutectiques et promeut ainsi la formation de graphite. Le silicium modifie également la teneur en carbone du point eutectique. Un indice de carbone équivalent est utilisé pour situer les alliages par rapport au diagramme binaire Fe-C [17].

D'autres paramètres tels que la vitesse de refroidissement et le taux d'inoculation permettent également de modifier la microstructure de solidification. L'augmentation de la vitesse de refroidissement peut conduire à une solidification partielle ou totale dans le système métastable et entraîner l'apparition de cémentite. A l'inverse, l'inoculation du métal liquide permet de favoriser la germination du graphite et promeut donc une solidification dans le système stable [18].

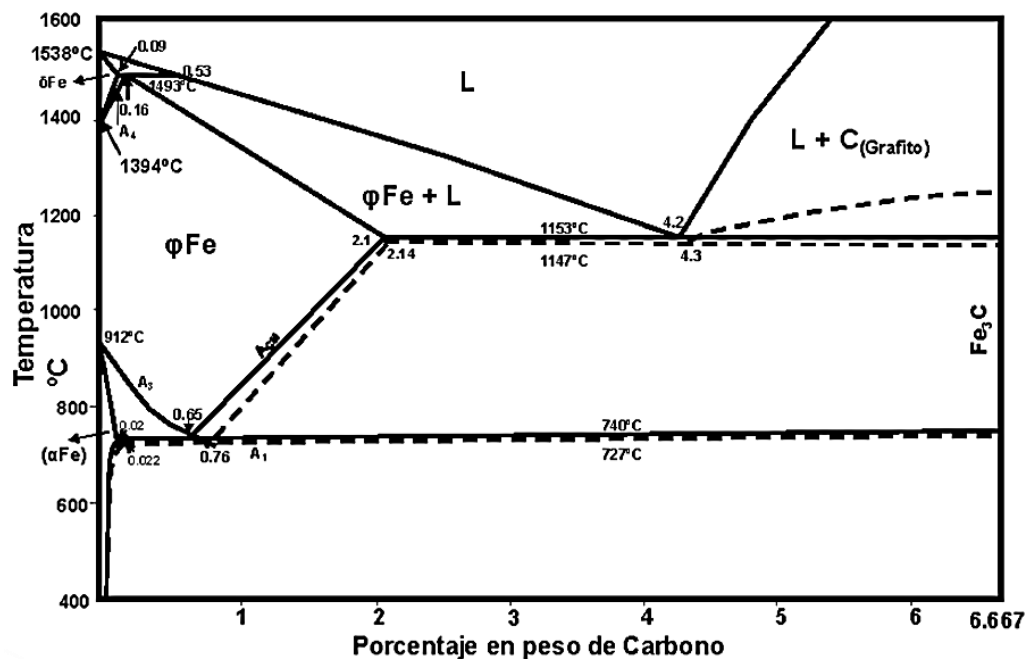


Figure II.1. Diagramme de phases fer-carbone [19]. Le système stable fer-graphite apparaît en traits pleins, le système métastable fer-cémentite en traits pointillés.

II.2. ELABORATION DE LA FONTE

On distingue deux types de fontes selon leur mode d'élaboration et leur destination.

II.2.1. Les fontes de première fusion

Elles sont élaborées à partir du minerai de fer au haut-fourneau (HF) à coke ou au bas-fourneau (BF) à arc électrique. Ce sont pour 90% des fontes blanches destinées à la transformation en acier par affinage et pour 10% des fontes grises destinées directement soit au moulage de grosses pièces (tuyaux..) soit au moulage de gueuses qui seront ultérieurement refondues, en fonderie, au cubilot ou dans des fours électriques. [19]

II.2.2. Les fontes de deuxième fusion

Elles sont élaborées en fonderie par refusion d'un lit de fusion constitué de gueuses de première fusion, de fontes ou rejets de fonderie de deuxième fusion, de ferrailles ou aciers de récupération. Ce sont soit des fontes grises, soit des fontes à graphite sphéroïdal (G.S) soit des fontes blanches destinées aux traitements de malléabilisation. Elles servent au moulage de toutes pièces mécaniques. Les appareils de refusions principalement utilisés sont : -Le cubilot

-Le four à induction -Le four à arc HEROULT à garnissage basique. Les petites fonderies qui limitent leur fabrication aux fontes utilisent des cubilots. [19]

Les fours à arc servent de préférence à l'élaboration d'aciers fins ou d'aciers alliés. Certaines fonderies les utilisent pour l'élaboration de fontes dites «électriques » à très basse teneur en soufre dont le graphite est très régulièrement distribué. Les fonderies modernes produisant un fort tonnage s'équipent de préférence en fours à induction polyvalents. La métallurgie du four à induction s'apparente à celle de l'ancien procédé dit « au creuset ». Elle consiste à fondre les charges nécessaires formant un lit de fusion à l'abri de toute pollution extérieure. Quelques additions judicieuses permettent d'obtenir la composition finale souhaitée. [19]

II.3. FONTES GRISES

Les fontes grises désignent les pièces pour lesquelles la solidification s'est déroulée dans le système stable en entraînant la formation de graphite. C'est d'ailleurs la présence du carbone sous cette forme qui donne une couleur grise aux faciès de rupture des pièces et est à l'origine de cette désignation [20]. La classification des différents types de fonte grise se fait en fonction de la taille et surtout de la forme des particules de graphite qui est l'élément clef en ce qui concerne les propriétés des pièces.

II.3.1. Fontes à graphite lamellaire

Le premier type de graphite observé est de forme lamellaire et, pour les pièces concernées, le graphite apparaît sous forme de particules plus ou moins grandes et toutes orientées selon la direction a. schématise les différentes formes répertoriées, elles correspondent à divers types de fontes pour lesquelles l'apparition et la croissance du graphite se sont produites à différents stades de la solidification. Les lamelles de graphite apparaissent disjointes lors des observations en coupe des échantillons mais elles sont en réalité interconnectées et forment un réseau tridimensionnel à grande échelle. C'est à cause de ceci que les fontes à graphite lamellaire

(fontes GL) ont des allongements à rupture très faibles (de l'ordre de 1 à 3 %). En effet, lorsqu'une fissure se développe à un point d'interface entre le graphite et la matrice, elle se propage alors à grande vitesse le long de cette interface puis dans toute la pièce. [20]

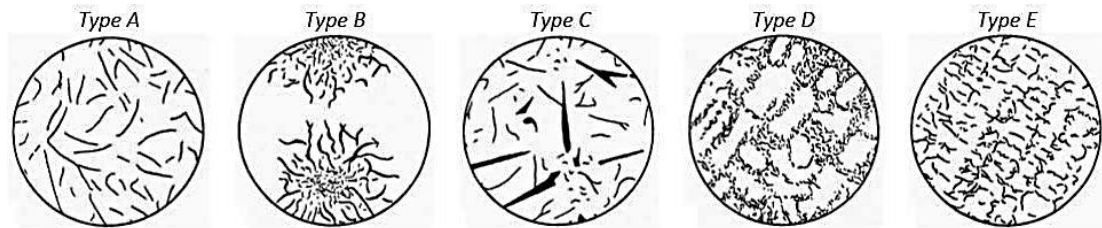


Figure II.2. Représentation schématique des différentes classes de graphite lamellaire [15].

II.3.2. Fontes à graphite sphéroïdal

A l'inverse, le graphite peut également apparaître sous la forme de sphères disséminées dans la matrice de fer. La disparition du réseau tridimensionnel de graphite associée à la forme sphérique des particules permet d'atteindre des allongements à rupture beaucoup plus importants pouvant aller jusqu'à plus de 25 % dans le cas d'une matrice Ferri tique. C'est pourquoi on parle également de fonte ductile. La Figure II.3 présente une observation classique au microscope optique d'une fonte à graphite sphéroïdal ainsi qu'un cliché en microscopie électronique à balayage (MEB) de nodules de graphite après dissolution de la matrice. Industriellement, l'obtention du graphite sphéroïdal est réalisée à l'aide d'un ajout de magnésium à la fonte avant la coulée, à des teneurs comprises en général entre 0,03 et 0,05 % massiques. Les paramètres de coulée tels que la vitesse de refroidissement et le taux d'inoculation jouent sur la microstructure et modifient le nombre et la taille des nodules de graphite [18].

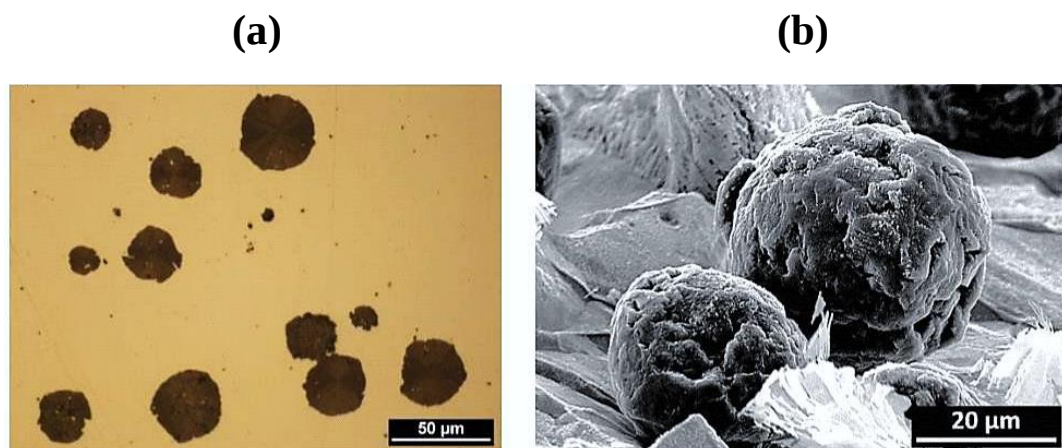


Figure II.3. Images en microscopie optique (a) et en microscopie électronique à balayage après dissolution de la matrice (b) d'une fonte GS [67].

II.3.3. Fontes à graphite vermiculaire

En pilotant les paramètres de coulée et en jouant notamment sur la quantité de magnésium ajouté, il est également possible d'obtenir des formes intermédiaires de graphite. La Figure II.4 présente des observations au microscope optique et au MEB après dissolution de la matrice d'une fonte à graphite dit vermiculaire (également appelé graphite compact). Dans ce cas, l'observation en coupe montre du graphite à la fois sous forme de sphères et sous forme de particules allongées de formes irrégulières. L'observation en 3 dimensions révèle que ces différentes particules sont en fait reliées entre elles et forment des amas de graphite ramifiés et plus ou moins étendus. Ce type de fonte est utilisé dans des industries telles que l'automobile car il permet d'obtenir des propriétés intermédiaires entre les fontes GL et GS, à savoir des propriétés d'amortissement des vibrations et un allongement à rupture suffisant [20].

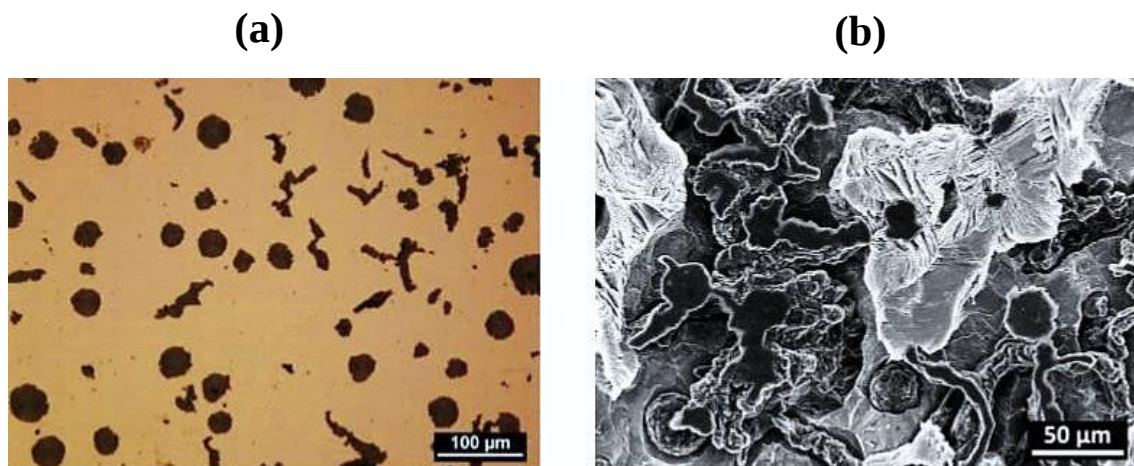


Figure II.4. Images en microscopie optique (a) et en microscopie électronique à balayage après attaque profonde (b) d'une fonte à graphite vermiculaire [67].

II.3.4. Formes dégénérées de graphite

A l'image du graphite vermiculaire, il existe d'autres formes intermédiaires entre les lamelles et les sphéroïdes de graphite mais celles-ci entraînent un abattement des propriétés mécaniques et sont des formes dites dégénérées de graphite. L'une d'elle, illustrée sur la Figure 1.6-a, est le graphite dit chunky (une forme de graphite fin et interconnecté). Sa formation est favorisée par les longs temps de solidification et une surconcentration en certains éléments tels le cérium [21-22].

Une autre forme dégénérée est le graphite explosé. Il est possible de reconnaître la forme globale des nodules de graphite avec une structure composée de plusieurs secteurs mais dans ce cas ces différentes zones ne sont pas jointes. Des ajouts trop importants [23].

II.3.5. Caractéristiques mécaniques fondamentales des fontes grises

Nous appellerons caractéristiques mécaniques fondamentales celles qui, étant aisément mesurables, ont fait l'objet d'études nombreuses et approfondies, et à partir desquelles on peut se faire une bonne idée du comportement mécanique général de la fonte; ce sont: -La résistance à la traction -La dureté -Le module d'élasticité.

• Résistance à la traction

Depuis l'application aux fontes de la métallographie, les caractéristiques mécaniques de ces matériaux, et notamment leur résistance à la traction, n'ont cessé de s'améliorer. Toutefois, l'allongement de rupture reste très faible en raison de la morphologie du graphite (il est généralement inférieur à 1%).

• Dureté

La dureté des fontes non alliées varie dans les proportions très importantes en fonction de la structure:

- Fontes blanches: 400 à 550 HB suivant la teneur en carbone. -Fontes grisesperlitiques: 170 à 270 HB suivant la finesse de la perlite.

- Fontes grises ferritiques: 100 à 150 HB.

- Fontes grises martensitiques : 400 à 500 HB. -Fontes grises bainitiques: 300 à 400 HB [24].

• Module d'élasticité

Même dans le cas des fontes non alliées, le module d'élasticité est susceptible de varier de façon considérable: il est compris entre 80 et 150 GPa dans le cas des fontes à graphite lamellaire, atteint 160 à 180 GPa dans les fontes malléables à cœur noir et à graphite sphéroïdal et il a une valeur voisine de celle de l'acier, 200 à 210 GPa dans les fontes blanches. La valeur du module d'élasticité des fontes grises est liée, d'une part à la quantité de graphite, d'autre part à la forme du graphite et à ses dimensions [24].

II.4. LES FONTES BLANCHES

Dans la même logique que précédemment, le terme de fonte blanche désigne les alliages pour lesquels la solidification s'est déroulée entièrement dans le système métastable en entraînant la formation de cémentite comme phase riche en carbone. C'est l'absence de graphite et la présence de carbures qui confère une couleur blanche argentée aux faciès de rupture et explique cette dénomination. Afin d'obtenir ce type de microstructure il est possible de jouer sur la profondeur de trempe en augmentant la vitesse de refroidissement ou en réalisant des ajouts d'éléments dits trempants tels que le tellure. Une autre solution est d'ajouter des éléments carburigènes qui stabilisent la cémentite par substitution dans son réseau [25]. Il existe trois classes de fontes blanches qui se différencient par la quantité d'éléments d'alliages introduits, sachant que l'élément le plus couramment utilisé est le chrome [26].

En raison de leur forte teneur en carbure les fontes blanches présentent une dureté élevée et une très bonne résistance à l'usure ou à l'abrasion. Elles sont en revanche fragiles et difficiles à usiner. On retrouve ces alliages pour la fabrication de boulets de broyeurs, mâchoires de concasseurs ou encore pour la réalisation de la surface externe des cylindres de laminoir [18]

II.5. LES FONTES MALLÉABLES

Il est également possible de faire subir un traitement thermique de graphitisation aux pièces solidifiées avec une microstructure blanche pour décomposer la cémentite en graphite. Les pièces obtenues présentent une ténacité et une ductilité augmentées. On parle dans ce cas de fontes malléables à cœur noir. Le traitement de graphitisation est réalisé dans le domaine austénitique à des températures avoisinant les 950 °C. Le graphite issu de la décomposition de la cémentite apparaît sous forme d'amas plus ou moins réguliers mais il est possible d'augmenter leur sphéricité en réalisant des ajouts d'éléments connus pour favoriser la sphéroïdisation du graphite à la solidification comme le magnésium ou le cérium [27, 28]. Un des enjeux principaux lors de la coulée de ce type de fonte est d'ajuster au mieux la composition de l'alliage afin de concilier de bonnes propriétés de coulée avec une microstructure finale permettant de répondre aux propriétés requises (ce qui nécessite donc une forme de graphite correcte) et en limitant les temps de graphitisation [25-27, 28].

On définit également des fontes malléables à cœur blanc qui sont obtenues selon le même principe de traitement thermique d'une fonte blanche. Dans ce cas, en revanche, l'objectif est de décomposer la cémentite et de décarburer le matériau en réalisant les traitements thermiques dans une atmosphère - adaptée [29-30].

L'utilisation des fontes malléables reste marginale mais les différents travaux portant sur ces sujets sont tout de même intéressants pour cette étude. En effet, lors de la coulée par centrifugation de tuyaux de faible épaisseur, la vitesse de solidification très importante engendre une microstructure brute de coulée dite truitée, composée à la fois de graphite et de cémentite. Aussi, les tuyaux sont soumis à un traitement thermique de graphitisation similaire à celui des fontes malléables pour obtenir finalement une fonte GS ferritique.[18]

II.6. LE GRAPHITE

Le graphite présente une structure cristallographique hexagonale organisée selon des feuillets nommés graphènes. Les atomes d'un même plan de graphène sont reliés entre eux par des liaisons covalentes de type sp^2 et la cohésion entre les plans de graphène se fait par des liaisons de Van der Waals. Cette structure est responsable de l'anisotropie des propriétés physiques du graphite (**Tableau II.1**). Elle lui organise plusieurs degrés d'organisation.jr

Tableau II.1. Anisotropie de certaines propriétés physiques du graphite [21].

	Selon le plan (ab)	Selon le plan (c)
Résistivité électrique ($\Omega.cm$)	40.10^{-6}	0,04
Conductivité thermique ($W.M^{-1}. K^{-1}$)	2.10^{-3}	8
Module de Young (GPa)	1000	50

Le graphite est rarement parfait et présente souvent des défauts de structure. Des exemples de ces défauts sont retrouvés dans d'autres types de matériaux carbonés. Pour illustrer ceci, on peut citer des matériaux ayant des structures moins ordonnées que celle du graphite tels que le carbone turbostratique et le carbone amorphe. [31]

II.6.1. Graphite sphéroïdal

En 1948, il a été découvert que l'ajout d'une faible quantité de magnésium ou/et des terres rares dans une fonte liquide avant sa coulée menait à la production de graphite sous forme de précipités sphériques [32]. Les fontes dont les morphologies du graphite sont sphériques sont génériquement appelées fonte ductile. La ductilité et la ténacité des fontes à graphite sphéroïdal sont supérieures à celles des fontes grises puisqu'il n'y a plus l'effet d'entaille qui a lieu en pointe de lamelle. Il est donc possible d'obtenir des fontes à graphite sphéroïdal avec des propriétés mécaniques très diverses en jouant sur la nature de la matrice (ferritique, ferritoperlitique, perlitique...)

La formation du graphite sphéroïdal nécessite différents traitements avant la coulée de la fonte liquide : l'inoculation ou la sphéroïdisation. Il est donc nécessaire d'ajouter certains éléments dont la fonction sera d'obliger le précipité à prendre une forme sphérique. [31]

II.6.2. Sphéroïdisation

Ce traitement permet comme son nom l'indique d'obtenir un graphite de forme sphérique. Lors de cette étape, il est nécessaire d'ajouter du Mg dans le bain liquide, qui se combine au S et à l'O pour former des sulfures et des oxydes [33], et fait augmenter la tension superficielle du liquide. Quand la tension superficielle de la fonte augmente jusqu'à 1,4 N/m, la nodularisation est complète. Une teneur de 0,03 à 0,06 % de Mg dans le bain liquide suffit à obtenir une forme sphéroïdale du graphite dans une fonte à bas soufre.[31]

II.6.3. Inoculation

Le traitement d'inoculation permet d'obtenir une fonte graphitique. Cette inoculation consiste à ajouter, après le traitement de sphéroïdisation et avant la coulée, un inoculant, en général de ferro-silicium, de calcium-silicium ou de graphite. Un inoculant est un matériau qui, ajouté à la fonte liquide, crée des sites préférentiels de germination du graphite [34]. Actuellement, les inoculants les plus utilisés sont le ferro-silicium contenant des quantités contrôlées d'éléments tels que Ca, Al, Ba, Sr, Zr, Ce, Ti ou Bi [35].

II.6.4. Solidification du graphite sphéroïdal dans les fontes

Les fontes à graphite sphéroïdal sont majoritairement de composition eutectique ou hyper eutectique. Lors de la solidification, c'est le graphite qui se forme en premier dans le bain liquide sur les sites de germination constitués pendant l'étape d'inoculation [36].

Ensuite, les sphéroïdes formés s'entourent d'une couche austénitique, appelée cellule eutectique, à travers laquelle le carbone doit diffuser pour les faire croître [37]. La Figure schématise les mécanismes de solidification.

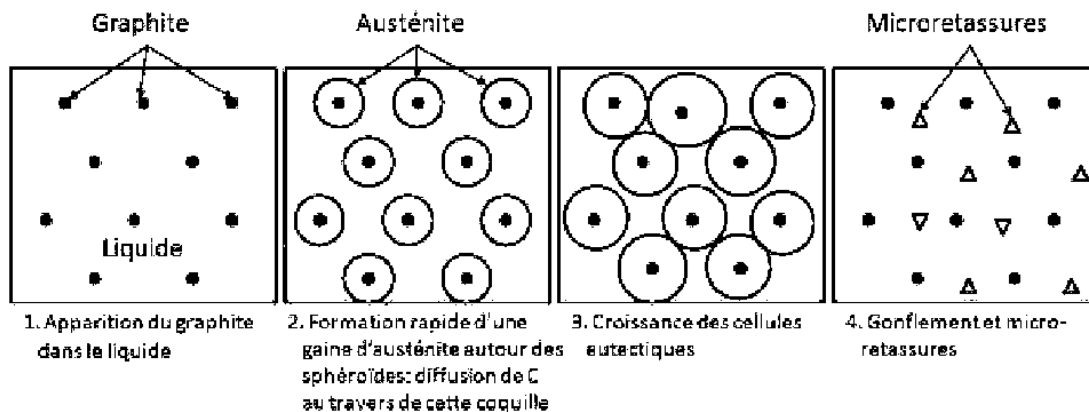


Figure II.5. Description de la solidification d'une fonte hypereutectique [38].

La solidification des fontes à graphite sphéroïdal entraîne toujours la formation de porosités que l'on peut diviser en deux familles des micro-retassures de petite taille (de l'ordre de quelques micromètres) qui sont dues aux espaces laissés libres en fin de solidification, lorsque les cellules eutectiques se rencontrent, et des porosités de tailles plus importantes (de quelques dizaines de micromètres jusqu'à parfois plus d'un millimètre) [28] qui apparaissent dans les zones de la pièce se solidifiant en dernier. Elles sont dues à la différence de densité du métal à l'état liquide et à l'état solide, qui entraîne un retrait lors de la solidification et provoque la formation de cavités appelées retassures.

II.6.5. Effet des éléments traces sur la croissance du graphite

• Effet du magnésium et terres rares

L'ajout de magnésium ou de certains éléments des terres rares (cérium et lanthane en particulier) dans la fonte liquide permet de favoriser la croissance du graphite sous forme sphéroïdale. Une des actions majeures de ces éléments dits "sphéroïdisants" est de capter le soufre et l'oxygène présents dans la fonte, les inclusions formées peuvent alors servir de site de germination pour le graphite. [18]

A l'échelle industrielle le magnésium est utilisé pour l'obtention des fontes GS, la quantité d'élément à ajouter augmente avec la teneur en soufre et le temps de solidification. D'autre part, une augmentation de la vitesse de solidification favorise la croissance sphéroïdale du graphite et permet de limiter l'ajout en magnésium. Ce traitement présente néanmoins certaines contraintes telles que le temps alloué à la coulée par exemple. En effet, une fois l'ajout de magnésium réalisé, la fonte doit être coulée rapidement car celui-ci présente un évanouissement important : le magnésium réagit avec l'oxygène présent dans l'atmosphère et sa quantité disponible dans la fonte liquide décroît. [18]

Le cérium et le lanthane peuvent également être utilisés en vue d'obtenir du graphite sphéroïdal car ils réagissent avec le soufre et l'oxygène dissous dans la fonte pour former des oxydes, sulfures et oxysulfures très stables [39].

La quantité à ajouter varie aussi avec la vitesse de refroidissement des pièces, [40] cette variation est plus importante lors d'ajout de cérium que dans le cas des traitements magnésium. En revanche, en raison de la densité plus élevée des éléments et des composés, un traitement de la fonte aux terres rares génère moins de crasses et l'évanouissement est largement retardé [41].

Enfin, l'utilisation principale du cérium dans les fontes a pour objectif de neutraliser la présence d'éléments néfastes à la croissance sphéroïdale du graphite tels que le plomb, le bismuth, l'antimoine, l'aluminium ou le titane. Le magnésium et le cérium favorisent également la croissance sphéroïdale du graphite dans le cas des fontes malléables.

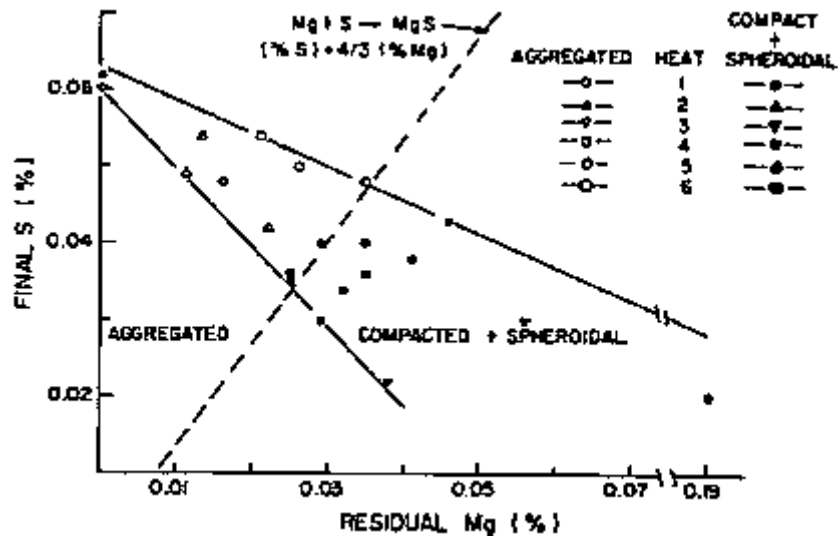


Figure II.6. Forme du graphite observée en fonction des teneurs résiduelles en soufre et magnésium dans les travaux de Jayaraman et al. Portant sur des fontes malléables [42].

Au-delà de leur action désulfurante et désoxydante, les éléments sphéroïdisants peuvent également interagir directement avec le graphite en croissance. Ceci est visible à travers les dégénérescences observées dans le cas de surtraitement du métal liquide. Le cérium est connu pour favoriser la formation de graphite chunky dans les pièces de grande section [21-22]. Du graphite explosé peut également être observé et, lors de leur étude portant sur du graphite formé dans le métal liquide, Sun et Loper précisent que les terres rares ont une plus grande influence que le magnésium sur la formation de graphite explosé [43]. Au cours de ses travaux, Theuwissen s'est intéressé au graphite explosé dans des alliages purs (Fe)-C- Ce [44, 45]. Pour expliquer sa formation il décrit un blocage de la croissance du graphite dans les directions prismatiques par une adsorption des atomes de cérium sur ces plans [45], ce blocage ne pouvant opérer que si la concentration en cérium est assez importante.

• Soufre et Oxygène

Le soufre et l'oxygène sont deux éléments particulièrement intéressants car ils sont toujours présents dans la fonte à plus ou moins fortes teneurs et ils interviennent à plusieurs étapes de la formation du graphite. En effet, ces éléments ont une réactivité très élevée et les composés qu'ils forment servent de sites de germination pour le graphite. L'inoculation des alliages ainsi que l'influence du soufre et de l'oxygène ont été, et sont encore, au cœur de très nombreuses études. En 2005 Skaland a proposé une revue exhaustive des différentes théories avancées pour expliquer la germination du graphite dans les fontes GS dans lesquelles il met

En avant l'importance de la structure cristallographique des composés susceptibles de servir de germe [36]. Selon cette approche, l'écart entre les paramètres de maille de ces composés et ceux du graphite ne doit pas être trop important pour que la germination soit possible. Différents modèles plus ou moins complexes de germes observés dans les fontes ductiles ont été développés et présentent des différences, mais ils se rejoignent sur la présence de sulfures et

oxydes .Les éléments entrant dans la composition des oxydes complexes étant le magnésium, le silicium, l'aluminium, le calcium et/ou le baryum.

II.6.6. Influence des éléments spéciaux Aluminium

L'aluminium est alphagène. Il présente la particularité d'être graphitisant jusqu'à une teneur de 4%, carbirugène entre 10 et 18%, puis à nouveau graphitisant jusqu'à 27%, valeur à partir de laquelle il reste carbirugène. Il augmente sensiblement la résistance à l'oxydation [42].

➔ Molybdène

Élément antigraphitisant, le molybdène est, par ailleurs, soluble dans la ferrite, qu'il durcit. Ces deux propriétés ont pour résultat, que, même à faible teneur dans la fonte (0,25 à 0,6%) le molybdène est un affinant de la perlite, qu'il tend à transformer en troostite. Comme il a, également, une action affinant sur le graphite, le molybdène, en définitive, confère aux fontes auxquelles il est ajouté, une bonne résistance à la rupture [42].

➔ Nickel

Le nickel est un graphitisant, toutefois, son action à cet égard est nettement moins

efficace que celle du silicium. Il a la propriété remarquable d'homogénéiser la structure des pièces moulées en fonte, car il régularise la précipitation du graphite et la grosseur de celui-ci. Le nickel affine la perlite, ce qui a pour effet d'augmenter les caractéristiques mécaniques de la fonte. Il modifie la nature de l'austénite qui se transforme en : -Perlite très fine (teneur en nickel de la fonte: 0,5 à 2%). -Troostite (teneur en nickel de la fonte: 2 à 4%). -Martensite (teneur en nickel de la fonte: 4 à 6%) [42].

➔ Chrome

Le chrome est un antigraphitisant énergique, dont l'effet, sur la fonte dépend de son pourcentage dans celle-ci. Ajouté à une fonte grise normale en très faible quantité (0,1 à 0,20%) le chrome affine tant le graphite que la perlite, ce qui a pour effet d'augmenter

nettement les valeurs de la dureté et de la résistance à la rupture des pièces coulées. Au-delà de 0,2%, dans une fonte grise normale, le chrome forme des carbures très stables à chaud mais très durs, et dès qu'elle contient plus de 0,7% de chrome, la fonte devient très difficile à usiner à l'outil coupant [42]. Le chrome donne à la fonte une grande résistance à l'oxydation. Il augmente la température de transformation allotropique (élément alphagène) [37]. Vanadium Le vanadium est un élément qui a pour effet de stabiliser les carbures. Il est également un élément désoxydant, ce qui le fait utiliser dans le but d'obtenir des fontes très saines. Cet élément, étant donné son activité sur la fonte, est toujours employé à un très faible pourcentage (0,2 à 0,3%) [42].

➔ Titane

Le titane, ajouté à la fonte, même à dose extrêmement faible, a un effet très sensible sur le graphite, qu'il rend très fin. Le titane- dont la teneur dans la fonte doit être toujours très faible

(0,10 à 0,30%)- est un élément légèrement graphitisant, dont l'action, à ce point de vue peut être neutralisée par une faible addition de vanadium [42]. L'augmentation du titane dans la fonte amène simultanément :

- Une baisse de la résistance à la traction et de la dureté.
- Une baisse du module de Young [46].

→Cuivre

De température fusion de 1084°C, le Cu est allié qu'à peu de nuances, car il s'enrichit sous la couche de calamine et provoque, suite à une pénétration dans la limite du grain, une grande sensibilité en surface lors des processus de transformation à chaud. Il se dissout dans la ferrite où sa concentration est de 0.30% à la température ambiante. L'addition seule de Cu n'a pas d'influence directe sur la dureté, uniquement si les dimensions de pièces ne sont pas importantes. Il augmente la résistance à la traction et la limite d'élasticité. Des teneurs supérieures à 0.30% peuvent entraîner des durcissements structuraux en améliorant la trempabilité et la résistance à la corrosion atmosphérique. Une teneur en Cu supérieure à 1% améliore la résistance aux substances chimiques.

Le cuivre a un effet légèrement graphitisant, mais cette action semble n'influencer que la cémentite libre (dont il favorise la décomposition) et non la cémentite de la perlite. Par ailleurs le cuivre donnant avec le fer α une solution solide, durcit la ferrite et affine la perlite. Ces deux actions simultanées ont pour résultat d'augmenter les caractéristiques mécaniques de la perlite et, toutes choses égales par ailleurs, celle de la fonte. Mais, comme le cuivre affine également le graphite, son addition à une fonte se traduit, par des résultats supérieurs à ceux que son action sur la perlite seule, laisseraient supposer. Le cuivre peut, en partie, remplacer le nickel, ses effets étant comparables. Toutefois, dans la fonte, la teneur en cuivre ne doit pas dépasser 7% (car, au-delà de cette valeur, le cuivre ne se dissout plus dans le fer

→Niobium

Le niobium augmente la limite d'élasticité et, à un degré moindre, la résistance à la traction. L'ajout de petites quantités de niobium peut considérablement augmenter la limite d'élasticité des aciers et des fontes. Le niobium peut aussi avoir un effet sur les précipitations. Ses principales contributions sont capables de former des précipités au-dessus des températures de transformation, et de retarder la recristallisation de l'austénite, ce qui donne une microstructure à grains fins ayant une résistance et ténacité améliorées. Le niobium est ajouté dans les aciers austénitiques pour améliorer la résistance à la corrosion intergranulaire, mais il améliore également les propriétés mécaniques à des températures élevées [47].

Chapitre III

Étude des caractéristiques
mécaniques des fontes à
Graphite Sphéroïdal (GS)

III.1. DÉFINITION

Les fontes à GS sont des alliages Fer-Silicium-Carbone (Fe-Si-C) connues aussi sous le nom de fontes ductiles. En effet, les fontes ductiles sont le résultat d'un traitement spécifique du métal liquide provoquant au moment de la solidification le graphite [48]. Alors qu'elle peut se présenter sous forme lamellaire, nodulaire ou sphéroïdale, la fonte ductile doit ses remarquables caractéristiques mécaniques, en particulier, à la cristallisation sous forme sphéroïdale du graphite qu'elle contient [49]. Contrairement à la fonte lamellaire qui peut entraîner des fissures sous une concentration d'efforts, l'addition de certains métaux alcalins, alcalino-terreux ou encore du magnésium (Mg) à la fonte liquide permettent ainsi de modifier la structure du graphite lamellaire en graphite sphéroïdal [50].

III.2. LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES FONTES A GS

III.2.1. Dureté

La dureté de toutes les fontes à graphite est pratiquement celle de la matrice, plus ou moins diminuée par la présence du graphite. Naturellement avec les appareils d'essai de dureté classique, le graphite sphéroïdal exerce une influence sur les valeurs de la dureté [51]. La dureté des fontes à graphite sphéroïdal : [52]

Tableau III.1. La dureté des fontes à graphite sphéroïdal [51].

Les Fontes	Dureté (HB)
Fonte GS 70-2	240-300
Fonte GS 60-2	230-280
Fonte GS 50-7	210-260
Fonte GS 42-12	<=220
Fonte GS 38-15	<=220

III.2.2. Caractéristiques en traction

Les caractéristiques en traction et la dureté d'une fonte à graphite sphéroïdal subissent l'influence de l'épaisseur du métal. Cette influence varie avec la nuance, la composition et le traitement thermique. [51]

Les caractéristiques en traction sont d'autant meilleures que les nodules de graphite sont plus sphériques, que leur dimension est plus petite, que le grain de la matrice est plus finet que la teneur en carbone total est plus basse. [51]

III.2.3 Résistance à la compression

L'augmentation de la limite d'élasticité en compression par rapport à la valeur de la résistance à la traction, est plus importante pour les fontes à graphite sphéroïdal à matrice ferritique que pour celles qui ont une structure perlitiques. [51]

III.2.4. Caractéristique en cisaillement et en torsion

La résistance à la rupture en torsion ou en cisaillement +.vayt, en général environ 90% de la valeur de la résistance à la traction. Toutefois, ce pourcentage est moins élevé dans le cas des fontes à graphite sphéroïdal à résistance élevée et à ductilité faible. [51]

III.2.5. Caractéristiques de fatigue

Les caractéristiques en fatigue dépendent dans une certaine mesure, de la forme du graphite. La présence du graphite de forme non sphéroïdal abaisse la résistance à la fatigue, mais encore plus la résistance à la traction. [51]

III.2.6. Propriétés aux températures élevées

Les fontes à graphite sphéroïdal sont des matériaux très utiles pour les applications qui mettent en jeu des températures élevées car les nuances courantes de fonte à graphite sphéroïdal présentent une excellente résistance à l'oxydation jusqu'à 650°C. [51]

Tableau III.2. Propriétés aux températures élevées [51].

FONTE	Composition en %		
	Si	Ni	Mn
1	2,63	1,45	0,59
2	2,41	0,72	0 ,42
3	2,30	0,96	0,26
4	1,85	-----	0,57

III.2.8. Caractéristiques élastiques et capacité d'amortissement

Les fontes à graphite sphéroïdal ou un module d'élasticité constant le module d'élasticité varie d'environ 159 à 172 Gpa, les valeurs les plus faibles correspondant aux fontes qui ont les teneurs en carbone totale les plus élevés. [51]

Si les modules de graphite prennent une forme irrégulière, leur importance relative augmente et le module d'élasticité diminue. Le module d'élasticité tend à augmenter en présence de carbures primaires. [51]

La capacité d'amortissement des vibrations est nettement inférieure à celle des fontes grise, mais elle est supérieure à celle des aciers (voir tableau). [51]

Tableau III.3. La capacité d'amortissement des vibrations est nettement inférieure à celle des fontes grise [51].

	Fonte a graphite sphéroïdale, de matrice ferrite + perlite et d'une dureté Brinell de 156 à 241	Acier XC18	Fonte grise Ft20
	Valeurs moyennes	Valeurs moyennes	Valeurs moyennes
Module de Young en Gpa	172,38	210,63	122,11
Module de cisaillement	67,18	82,06	48,67
Capacité d'amortissement décrément logarithmique x10⁻⁴	8, 316	1,31	68,67

II.2.9. Résistance à l'usure-Résistance à la corrosion

La résistance à l'usure des fontes GS est supérieur à celle des fontes à graphite lamellaire quand la pression de frottement est élevée (engrenage par exemple). La structure ferritique est convenable à de nombreux cas de frottement doux (vérins). Les fontes GS 70-2 et 60-2 sont recommandées dans les cas frottements; notamment lorsque la lubrification peut- être interrompue momentanément. [51]

Dans les cas sévères, on peut recourir aisément à la trempe superficielle martensitique.

Les fontes GS peuvent être utilisées dans le frottement à sec a cause de leur bonne résistance mécanique.

La résistance à la corrosion est nettement élevée que celle de l'acier, et au moins aussi bonne que celle des fontes à graphite lamellaire, notamment dans les solutions basiques (eau de mer), elle est meilleure dans les solutions acides de faible concentration, surtout pour du type FGS42-12. [51]

III.3. VARIABLES INFLUENÇANT LA RESISTANCE MECANIQUE

III.3.1. Microstructure

Les fontes à graphite sphéroïdal se caractérisent par le fait que la totalité de leur graphite se présente sous la forme de sphéroïdes microscopiques. Le graphite ne se présente pas toujours sous la forme de sphères parfaites et peut avoir quelquefois un aspect quelque peu irrégulier. [51]

La différence entre les diverses nuances de fontes à graphite sphéroïdal réside dans la microstructure et la matrice métallique. Cette microstructure varie avec la composition chimique et la vitesse de refroidissement d'une pièce. [51]

On a la possibilité de modifier la structure et la dureté de la matrice au moyen d'un traitement thermique. Habituellement, les nuances à ductilité élevée subissent un traitement de recuit qui donne une matrice entièrement constituée de ferrite pratiquement dépourvue de Partie spéciale Carbone. Les nuances à résistance mécanique élevée donc moins ductiles sont obtenues en générale, par un traitement thermique de normalisation, qui rend leur matrice entièrement perlitique ou par traitement de trempe et revenu. [51]

III.3.2. Composition chimique

Composition chimique d'une fonte à graphite sphéroïdal et la vitesse de La refroidissement de la pièce exercent une influence directe sur les caractéristiques mécaniques de celle-ci, en déterminant la nature de la matrice. [51]

Généralement en pratique, les nuances les plus douces ont une composition qui ne comporte que de faibles quantités d'éléments stabilisants la perlite tel que le manganèse pour réduire au minimum, la teneur en carbone combiné à l'état brut de coulée ou pour abréger le cycle de recuit, si celui-ci est nécessaire. [51]

Une augmentation de la teneur en silicium tend à diminuer la dureté de ferrite plutôt que de perlite, cependant, dans les fontes entièrement ferritiques, telles celles qui sont recuites,

une augmentation de la teneur en Si provoque un léger accroissement de la résistance mécanique. Le nickel exerce un effet analogue. [51]

Le chrome n'est utilisé que dans certains cas particuliers, en raison de sa tendance à former des carbones primaires stables.

III.4. INFLUENCE DE CERTAINS ELEMENTS CARBURIGENES SUR LA MICROSTRUCTURE DES FONTES À GS

a. Les carbures

Mn-Cr: L'effet carburigène de manganèse important, il est d'autant plus fort que la teneur en chrome est plus élevée. De même, l'influence carburigène du chrome se trouve renforcée par la présence de manganèse. [53]

Si-Ti: Le titane à généralement un effet carburigène son action atteint un maximum à teneur moyenne varié de 0,045 à 0,075. ? L'effet graphitisant du silicium est confirmé [53].

Ti-V: L'effet carburigène du titane est maximal entre 0,05 et 0,065%, lorsque les teneurs en Ti sont supérieures, le vanadium exerce une influence graphitissante et non plus carburigène [53].

b. La ferrite

Mn-Cr: Ces deux éléments, ont un effet négatif sur la ferrite, (ce qui signifie qu'ils Favorisent la formation de perlite), l'influence du manganèse est plus forte en présence de hautes teneurs en carbone, et réciproquement, celle du chrome est plus marquée en présence des teneurs élevée en manganèse. [53]

Mn-Si : A l'inverse du manganèse, le silicium a un très fort pouvoir ferritisant et il produit d'autant plus de ferrite que la teneur en manganèse est plus basse, tandis que l'action du manganèse sur la matrice est d'autant plus forte que la teneur en silicium est plus élevée. Il est donc impératif de choisir des charges à faible teneur en manganèse, si l'on veut obtenir des produits ferritiques. [53]

III.5. LES DIVERSES NUANCES DE FONTE À GS

Les nuances courantes de fonte à graphite sphéroïdal diffèrents essentiellement par la structure de la matrice. Le paragraphe précédent donne des indications sur les facteurs qui permettent d'obtenir un type de matrice donnée. [51]

Tableau III.4. présente les nuances retenues par la norme AFNOR NF A323-201 avec indication de leurs caractéristiques mécaniques [51].

Qualities	Caractéristiques mécaniques minimal			Constituent		Durté
	La résistance à la traction (R(N\mm2))	Limite conventionnell e d'élasticité (N\mm2)	Allongement % après rupture A	Prédominant de la structure (à titre indicatif)		Brinell (à titer indicative)
FGS800-2	800	480	2	Perlite structure revenu	ou de	248-352
FGS700-2	700	420	2	Perlite		229-302
FGS600-3	600	370	3	Perlite		192-269
FGS500-7	500	320	7	Ferrite-perlite		170-241
FGS400-12	400	250	12	Ferrite		≤201
FGS-370-17	370	230	17	Ferrite		≤179

III.6. Elaboration des fontes GS

La fonte est la base de la métallurgie du fer et de l'acier. La transformation directe du minerai de fer en acier n'a pu encore être réalisée d'une façon industrielle ; la fonte est donc l'intermédiaire inévitable entre le minerai de fer et l'acier. Elle est ainsi appelée fonte d'affinage.

Cependant, la fonte est également préparée pour être utilisée à l'état brut, elle est ainsi désignée sous le nom de fonte de moulage ou fonte mécanique (fontes grises, blanches...) [54].

Les fontes de première fusion qui sont élaborées à partir du minerai de fer au haut-fourneau (HF) sont pour 90 % des fontes blanches destinées à la transformation en acier par affinage et pour 10 % des fontes grises (obtenues en marche chaude des HF) destinées directement soit au moulage de grosses pièces soit au moulage de gueuses qui seront ultérieurement refondues, en fonderie, au cubilot ou dans des fours électriques [55, 56].

Les fontes de deuxième fusion sont élaborées en fonderie par refusions d'un lit de fusion constitué de gueuses de première fusion, de fontes ou rejets de fonderie de deuxième fusion, de ferrailles ou de toutes pièces mécaniques.

Il est alors possible de pratiquer des alliages en rapport avec les propriétés imposées au produit final et des additions de ferro-alliages pour améliorer la structure et les propriétés. Les observations pratiques et les adaptations par des milliers de fonderies productrices ont fait que la production des FGS, devenue une routine, est semblable à la production de toutes autres pièces en alliages ferreux. Le cycle de production est représenté par la Figure (Figure.III.1).

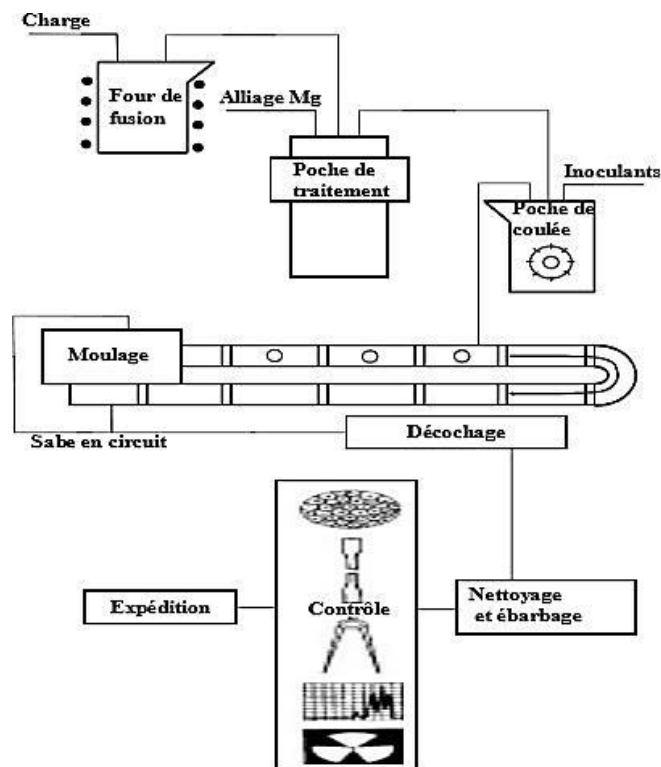


Figure III.1. Cycle de production des pièces en FGS [67].

Le contrôle de la composition chimique des FGS s'effectue sur environ une vingtaine d'éléments. Le suivi des teneurs en carbone et en silicium dans le four est requis de façon routinière [57].

Par ailleurs, la production de pièces saines (sans défauts) est due aux méthodes de fabrications et de contrôle de qualité les plus élémentaires sinon l'on peut facilement douter de l'intégrité des pièces produites.

III.6.1. Méthodes de sphéroïdisation

Il existe plusieurs procédés de sphéroïdisation des fontes, mais parmi les plus utilisées, car assurant un bon rendement, sont celles réalisées à l'aide de magnésium (Mg).

- Procédé In. Mold (dans le moule)

La fonte est traitée directement dans le moule figure (Figure.III.2), l'alliage au Mg étant placé dans une chambre de réaction dans le système de coulée du moule.

Ce procédé, datant de 1971, n'est adaptable qu'à des fabrications de grande série car pour une masse d'inoculant sphéroïdisant donnée et un volume de moule défini, il faut adapter la vitesse de coulée et la composition de la fonte. Le rendement en Mg atteindrait 80

% et les caractéristiques des fontes élaborées seraient meilleures que celles obtenues par les autres procédés [56].

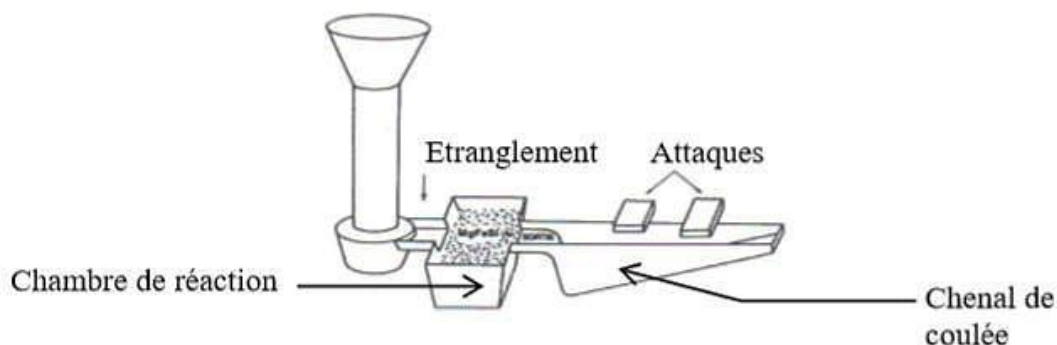


Figure III.2. Procédé In-Mold [67].

Les inoculants sont en général des alliages à base de Fe et de Si qu'on ajoute à faible dose dans la fonte liquide en vue d'améliorer les propriétés des pièces moulées. Le but de l'inoculation des FGS est de combattre la tendance naturelle de la fonte refroidie rapidement à se solidifier dans le système métastable.

- Procédé Sandwich

Il s'agit du procédé le plus utilisé, à cause de sa simplicité et du bon rendement en Mg. Il prend actuellement une très large extension. Dans ce cas on utilise une poche de coulée de forme spéciale, profonde et présentant une réduction vers le fonds de hauteur $h \geq 2d$ (d : diamètre) (Figure.III.3). La hauteur de la fonte conserve une grande importance afin d'éviter les projections [58].

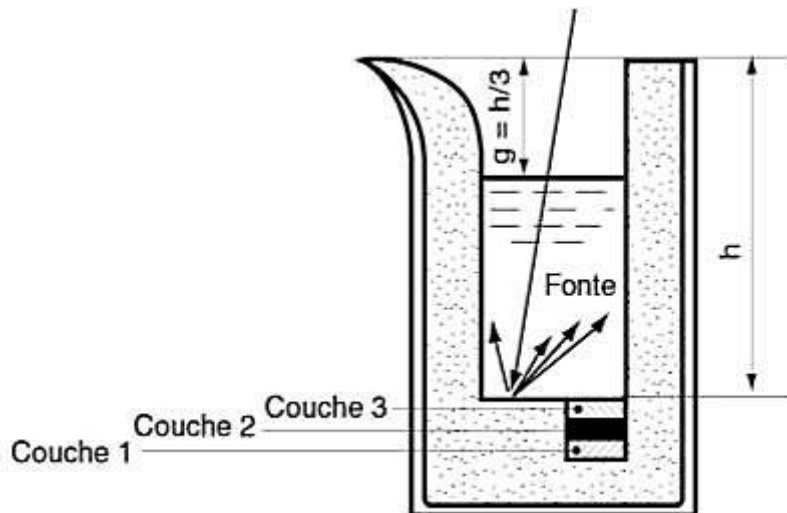


Figure III.3. Procédé sandwich dans une poche de coulée [67].

La poche de coulée étant protégée convenablement, on introduit dans la section réduite un « sandwich », des additions sphéroïdisantes et inoculantes. Ce sandwich est recouvert très souvent de tôles minces (2 à 3 mm) de façon à retarder le contact entre la fonte et les alliages de traitement.

En partant du fond de la poche, on distingue trois couches :

- **Couche 1:** Ferro – Silicium – Magnésium – Calcium – Cérium (Fe-Si-Mg-Ca-Ce) en gros grains de 10 à 20 mm avec des teneurs en Si = 47,5 %, Mg = 3 à 6 %, Ca = 3 %, Ce = 0,3 %. Son rôle est nodulisant et sphéroïdisant pour le Mg, inoculant et graphitisant pour le Si, désulfurant pour le Ca et le Ce et antipoison pour le Ce. Cette couche, qui contient le Mg, est placée au fond de la poche pour éviter son oxydation rapide lors de la coulée du liquide dans la poche.

- **Couche 2:** Ferro – Silicium – Baryum – Aluminium (Fe-Si-Ba -Al) en petits grains de 1 à 7mm. Sa composition est : Si = 60 à 65 % ; Ba = 9 à 10 % ; Al = 0,5 à 0,6 %. Son rôle est inoculant et graphitisant pour le Si, désoxydant pour Al et Si et inoculant, sphéroïdisant et ferritisant pour le Ba.

- **Couche 3:** Ferro – Silicium – Aluminium en grains très fins de 1 à 4mm. Son rôle est inoculant et graphitisant pour le Si, désoxydant pour Al et Si.

A noter que les couches une et deux sont parfois fusionnées en une seule et que le jet de fonte versée dans la poche est dirigé à côté de la cavité contenant les additions de traitements. Lorsque le temps entre traitement en poche et coulée est un peu long, on peut rattraper la sphéroïdisation en ajoutant dans le moule des morceaux de Fe-Si-Mg-Al [59].

-Procédé flow treat

Ce procédé consiste à l'incorporation du métal liquide dans une poche spéciale qui contient un trou au fond. Le métal à traiter suit son chemin vers une chambre réfractaire afin d'injecter l'inoculant par le gaz (N₂) ; la réaction est spontanée. Après le traitement, le métal inoculé coule dans le moule directement figure (Figure.III.4) [57].

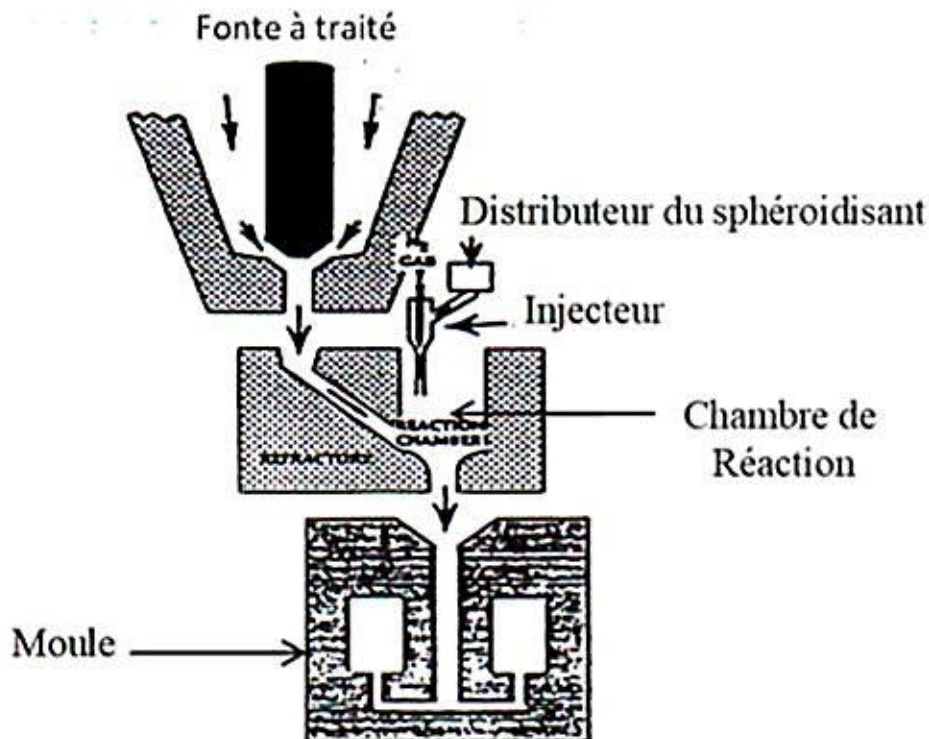


Figure III.4. Procédé flow treat [67].

III.6.2. Théorie de la sphéroïdisation

Pour l'étude du mécanisme de solidification des FGS, deux outils puissants sont valables : l'étude de la courbe de refroidissement et l'examen métallographique.

L'interprétation des résultats a toujours été subjective, s'appuyant fortement sur l'imagination. Les théories et les hypothèses contradictoires existantes peuvent être classées en groupes [56]:

a. La forme du graphite est déterminée par son noyau:

L'explication supposait qu'un certain type de particules étrangères (probablement composées de l'élément sphéroïdisant) agissant comme noyau, provoqueraient la croissance du graphite avec une vitesse constante dans toutes les directions ; d'où la formation de sphères [56].

b. La forme du graphite est déterminée par la fréquence de ramification des dendrites de graphite en croissance:

On suppose que la croissance d'un sphéroïde commence comme celle d'une lamelle qui croît d'une façon dendritique de sorte que : Si la fréquence de ramification est basse on a uniquement

formation de lamelles mais si cette fréquence et par la présence du sphéroïdisant est très élevée, les branches se recouvrent les unes les autres, donnant ainsi une forme sphéroïdale.

Cette explication est très semblable à la précédente à la différence que la croissance est excentrique (Figure.III.5) [56].

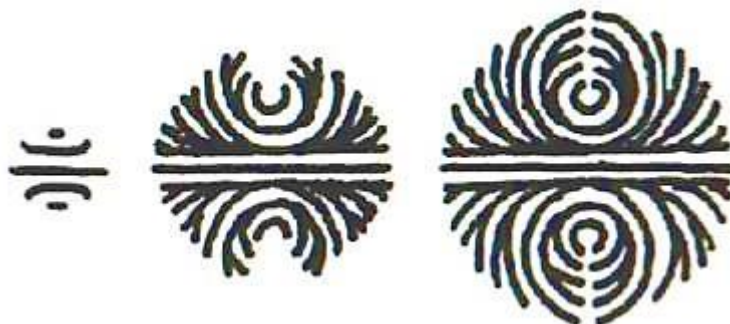


Figure III.5. Croissance type feuille de chou [67].

III.7. Les avantages de la fonte à graphite sphéroïdal

De nombreux avantages expliquent le succès de la fonte GS on peut les résumer en quelques mots: Polyvalence et performance supérieur à un coût inférieur. Cette polyvalence

Est particulièrement évidente pour ce qui est du choix des propriétés mécaniques. En effet, le concepteur peut choisir entre une ductilité élevée avec pour certains types un taux d'allongement de plus 18%, et une haute résistance avec des résistances en traction dépassent 120,000 tlb/po². (825 MPA). La fonte ADI offre des propriétés mécaniques et de résistance à l'usure encore plus grandes, avec des résistances à la traction de plus de 230,000 tlb/po² (1600 Mpa). [57]

Par rapport à l'acier et à la fonte malléable, la fonte GS offre en plus des avantages économiques de toutes, des possibilités supplémentaires d'économie. [57]

Comme la plupart des fontes commerciales, l'acier et la fonte malléable diminuent de volume au cours de leur solidification. Il faut donc des réservoirs alimentant les moules en métal liquide afin de compenser le retrait et d'empêcher la formation de défauts internes ou externe dans le cas de la fonte GS, la formation de graphite pendant la solidification cause une expansion interne qui donne un moulage exempt de défauts de retrait significatifs et ce avec des réservoirs d'alimentations beaucoup plus petits que ceux utilisés pour le moulage de la fonte malléable et de l'acier, ou même sans réservoir dans le cas des grands moulages produits dans des moules rigides. [57]

L'utilisation des types les plus communs de fonte GS, obtenus sous forme de produits bruts de coulée, élimine donc les couts des traitements thermiques. [57]

III.8. Domaines d'applications

En raison de ces caractéristiques élevées suscités, les fontes FGS sont utilisées dans une variété de branches de l'industrie :

- a. Industrie chimique et pétrolière : fabrication de pompes, valves, conduites travaillant dans les milieux corrosifs.
- b. Eléments de machines-outils, de presses et de forges qui travaillent à des pressions élevées, fabrication des pièces accouplées aux arbres ne subissant pas de traitement thermique [60].
- c. Pièces pour l'industrie lourde (cylindres de laminoirs, ...) [37].
- d. Pièces de construction automobile, canalisations et accessoires d'hydraulique et de voirie.
- e. Autres moyens de transport (Pignons pour chenilles, Paliers de pont, Godets d'élévateurs) [61].

III.9. Types de fontes FGS

La popularité des FGS vient de leur diversité et de leur prix de revient intéressant. La majorité des pièces en FGS résultantes sont brutes de coulée et n'ayant subi aucun traitement thermique. Il existe 3 types :

FGS ferritique

Le graphite de forme sphéroïdale est introduit dans une matrice de ferrite (Figure.III.6). Ces fontes sont caractérisées par une résilience élevée, une perméabilité magnétique élevée, une perte hystérésis assez faible, une bonne usinabilité, une résistance à la corrosion élevée et une conductibilité thermique relativement bonne [57]

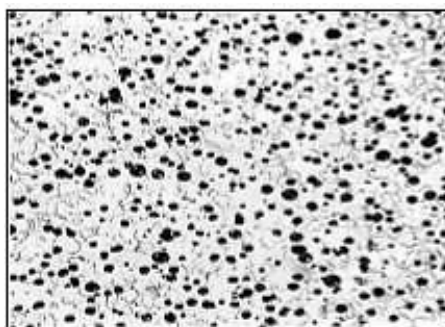


Figure III.6. FGS à matrice ferritique [67].

FGS perlitique

Le graphite se présente sous forme de sphéroïdes dans une matrice de perlite. Ces sont fontes caractérisées par une perméabilité magnétique faible, une perte par hystérésis élevée et une bonne usinabilité et une conductivité thermique peu réduite (Figure.III.7) [57].

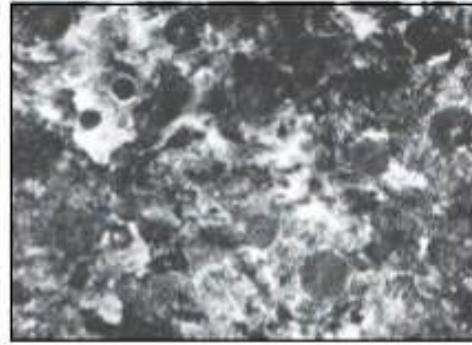


Figure III.7. FGS à matrice perlitique [67].

FGS ferrito-perlitique

Le graphite de forme sphéroïdale se trouve dans une mixte de ferrite et de perlite (Figure.III.8) c'est la nuance de fonte GS la plus courante. Les propriétés de ce type de fontes se situent entre celles des structures «totalement ferritiques» et «totalement perlitiques». Elles sont caractérisées par leurs bonnes usinabilités et un prix de revient faible [57].

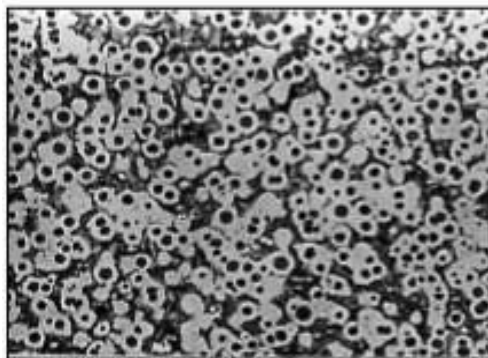
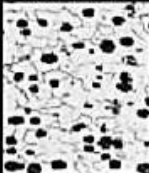
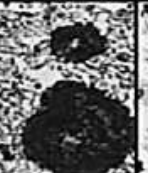


Figure III.8. FGS à matrice ferrito-perlitique [67].

FGS alliées

La désignation de “ fontes GS alliées ou spéciales” est réservée à l’ensemble de fontes contenant des éléments dits d’addition, tels le nickel (Ni), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), l’aluminium (Al), le molybdène (Mo), le vanadium (V), le titane (Ti), le zirconium (Zr), etc. ou des nuances spécifiques de phases ferritique, perlitique, etc. (Figure.III.9)

MATRICE							
Ferritique Nuance 60-40-18	Ferrito-perlitique Nuance 80-55-06	Perlitique Nuance 100-70-03	Martensitique (avec austénite retenue)	Martensitique revenue	ADI Nuance 150-100-7	ADI Nuance 230-185-	Austenitique
60 000 psi (414 MPa)	80 000 psi (552 MPa)	100 000 psi (690 MPa)	* N.D.	115 000 psi (793 MPa)	150 000 psi (1 050 MPa)	230 000 psi (1 600 MPa)	45 000 psi (310 MPa)
							

* Limite élastique approximative : 87 000 psi (600 MPa). Dure, fragile. (Noter que les grossissements sont différents)

Figure III.9. Différentes FGS alliées [67].

L’ajout en quantités variables mais bien définies de ces derniers, entraîne soit une amélioration de la structure perlitique de la fonte, soit la formation de structures particulières. La nature de la structure obtenue dépend de la nature et des dimensions de la pièce, de la proportion des éléments et aussi des conditions de refroidissement. Ce type de fontes est sollicité dans des cas bien précis en raison des propriétés attachées à leurs structures (très hautes caractéristiques mécaniques, résistance à la corrosion, températures élevées,...) [62]. La forme sphéroïdale du graphite laisse à ces structures toutes leurs qualités propres [63].

FGS alliée Martensitique

La martensite possède de très fortes résistances à la traction (R) et à l’usure [50]. Dans ce cas, les fontes peuvent être obtenues soit par traitement thermique avec ou sans éléments trempant soit brutes de coulée par l’addition de Ni (3 à 4,5%) et du Cr (0,5 à 1,2%) (dans les conditions «brutes de coulée», l’alliage est dur, cassant et rarement utilisé). Elles ont des caractéristiques mécaniques élevées et une excellente résistance à l’usure par frottement, notamment sous des pressions élevées.



Figure III.10. FGS alliée Martensitique [67].

FGS alliée Austénitique

L'austénite (Figure.III.11), connue aussi sous le nom GS Ni-Résiste, n'est jamais choisie uniquement pour sa ténacité. Ses caractéristiques exceptionnelles sont : une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation, des propriétés magnétiques supérieures, une ténacité élevée et une bonne stabilité dimensionnelle aux températures élevées [57].

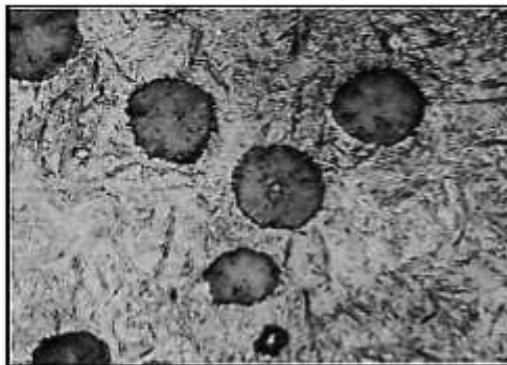


Figure III.11. FGS alliée Austénitique [67].

FGS alliée Ferritique

Ces fontes facilement usinables ont des caractéristiques mécaniques élevées, mais sont relativement fragiles [52]. La structure peut être obtenue, brute de coulée avec une composition chimique ordinaire (Si 2 à 2,5%), mais tout en respectant les conditions d'une basse teneur en manganèse, l'absence de certains oligo-éléments, l'inoculation particulière, etc. Dans le cas contraire le silicium (4,5 à 7%) donne une structure ferritique dont la résistance à la déformation et à l'oxydation à haute température (850 à 900C) est très élevée.

FGS alliée Bainitique (ADI)

C'est la dernière arrivée dans la famille des FGS (Figure.III.12). Elle offre une combinaison remarquable de ténacité, dureté et résistance à l'usure permettant ainsi de réduire le poids et le coût des composantes pour une performance équivalente ou améliorée [52].

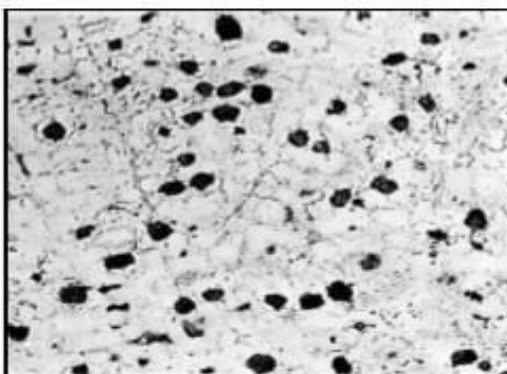


Figure III.12. FGS alliée Bainitique [67].

L'ADI est presque deux fois plus forte que les nuances ASTM des fontes GS alors qu'elle garde un bon allongement et une dureté élevée. De plus, l'ADI offre une résistance exceptionnelle à l'usure et à la fatigue, permettant ainsi aux ingénieurs de réduire le poids et le coût des composantes, cela pour une performance équivalente ou améliorée.

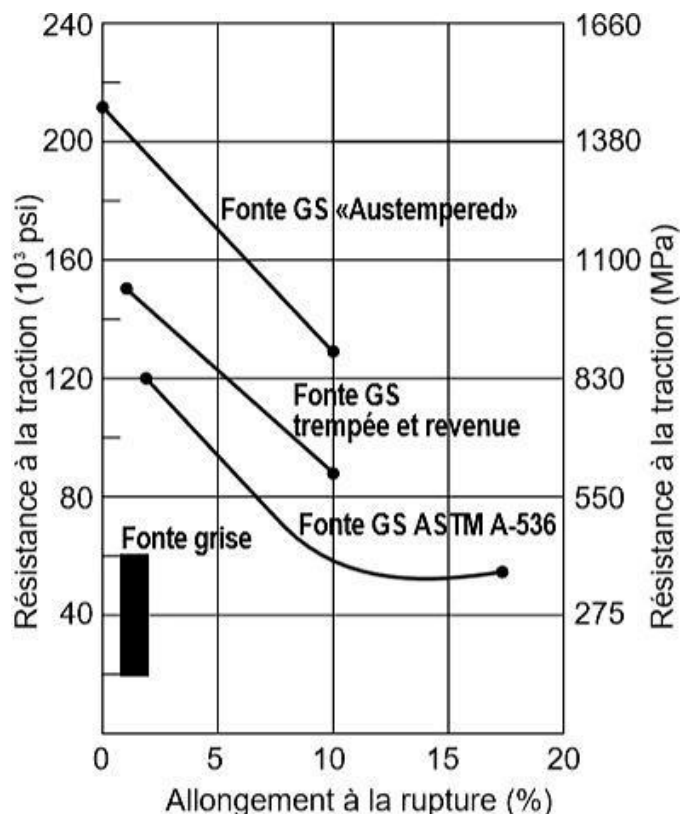


Figure III.13. Courbes de résistance à la traction en fonction de l'allongement à la rupture pour différents types de fontes [67].

Les propriétés remarquables de l'ADI sont obtenues par un traitement thermique (trempe étagée) contrôlé de très près, qui permet la formation d'une structure composée de ferrite bainitique et d'austénite résiduelle (à haut carbone).

L'austénite résiduelle (H.C.) est thermiquement stable; elle est cependant durcissable en service et se transforme même localement en martensite dans les conditions favorables de contrainte. L'avantage de cette caractéristique de l'ADI est que les contraintes de charge durcissent, au travail, les surfaces qui reçoivent l'effort. On peut aussi imposer délibérément, avant service, des tensions de surface, par exemple par «shot peening» des engrenages ou par galeage des vilebrequins, pour obtenir des améliorations significatives de résistance à l'usure et à la fatigue.

Il n'y a actuellement aucune spécification standard pour l'ADI, mais des propositions couvrant cinq nuances de fonte ADI ont été soumises et servent de base de discussion; elles sont utilisées comme critères de sélection par les concepteurs et les fondeurs.

L'ADI est bien connue comme matériau de remplacement de l'acier forgé pour les engrenages avec des réductions majeures des coûts de production, un fonctionnement plus silencieux et un poids plus faible. En usinant les engrenages avant le traitement thermique étagé, on obtient des économies majeures sur les coûts d'usinage.

Chapitre IV

Étude des forces appliquées sur
l'arbre de transmission
en fonte GS d'une éolienne
de 3 kW à l'aide du logiciel
"ANSYS"

IV.1. INTRODUCTION

Dans un contexte de transition énergétique et de recherche constante de sources d'énergie renouvelable, l'éolienne s'impose comme une solution efficace et durable. Le bon fonctionnement de ses composants mécaniques, notamment l'arbre de transmission, est essentiel pour garantir une production fiable et continue de l'énergie.

Ce travail a pour objectif d'étudier les forces mécaniques s'exerçant sur l'arbre de transmission d'une éolienne d'une puissance de 3 kW. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel ANSYS, un outil de simulation numérique de référence dans le domaine de l'ingénierie. Grâce à cet environnement de calcul par éléments finis, nous avons pu modéliser le système, appliquer les conditions de charge réelles, et analyser les efforts internes, les contraintes ainsi que la déformation de l'arbre.

Cette étude permet d'identifier les zones critiques soumises à des sollicitations élevées et de proposer, le cas échéant, des améliorations de conception. Elle constitue une étape clé dans le processus de validation mécanique d'un système de transmission d'éolienne.

la fonte utilisé dans cette étude est une fonte GS faiblement alliée au Manganèse, Nickel, Molybdène et vanadium. Les résultats sont comparés à celle d'un acier de construction.

IV.2. PROPRIETES MECANQUES DE LA FONTE GS

La fonte GS (fonte à graphite sphéroïdal) est un matériau couramment utilisé pour les pièces de machines en raison de sa résistance à la fatigue et de sa ductilité. Elle présente plusieurs caractéristiques importantes qui influencent la conception de l'arbre :

- **Module de Young (E) :** Le module de Young de la fonte GS est d'environ 170 GPa. Il détermine la rigidité du matériau et son aptitude à résister à la déformation élastique sous une charge appliquée.

- **Coefficient de Poisson (ν) :** Le coefficient de Poisson de la fonte GS est environ 0,28. Ce paramètre décrit la manière dont un matériau se déforme latéralement lorsqu'une contrainte est appliquée longitudinalement. Ces propriétés influencent directement le comportement de l'arbre sous contraintes, notamment dans les situations de torsion, de flexion et de compression.

IV.3. FORCES APPLIQUEES SUR L'ARBRE

a) Force de torsion (couple transmis)

Le couple transmis à l'arbre provient de la turbine et est déterminé par la puissance générée par les pales. Il est essentiel de calculer ce couple pour dimensionner l'arbre et garantir qu'il peut supporter la torsion sans déformation excessive.

Le couple transmis est calculé par la relation suivante : $T = P / \omega$ (1)

où :

T : couple transmis à l'arbre en N.m .

P : Puissance générée par la turbine en watts (3000 W).

ω : vitesse angulaire de rotation de l'arbre en rad/s.

Le couple produit par l'éolienne est directement lié à la puissance produite et à la vitesse de rotation de l'arbre. Une augmentation de la vitesse ou de la puissance génère un couple plus élevé, ce qui impose une plus grande contrainte sur l'arbre. Cette torsion induit des contraintes de cisaillement dans l'arbre, qui doivent être prises en compte dans la conception pour éviter la rupture par torsion.

b) Force axiale

La force axiale est générée par la composante de la force aérodynamique qui agit dans l'axe de l'arbre. Cette force dépend de l'angle de pas β des pales, qui modifie la direction de la force aérodynamique par rapport à l'arbre.

$$F_a = F_t * \sin(\beta) \quad (2)$$

où :

F_a : force axiale appliquée à l'arbre (N)

F_t : force totale générée par les pales (N)

β : angle de pas des pales, qui dans ce cas est de 20°.

Cette force axiale peut être compressive ou tendue, en fonction de la direction de la force aérodynamique par rapport à l'arbre. Elle a une influence directe sur la stabilité de l'arbre et la résistance à la fatigue, en particulier au niveau des roulements et des points de fixation.

c) Force radiale (flexion)

La force radiale est perpendiculaire à l'axe de rotation de l'arbre. Elle est générée par la force de portance des pales de l'éolienne. Cette force induit une flexion de l'arbre qui peut conduire à une déformation locale si elle n'est pas correctement dimensionnée.

$$F_r = F_t * \cos(\beta) \quad (3)$$

où :

F_r : force radiale (N)

F_t : force totale générée par les pales (N)

β : angle de pas des pales.

La force radiale génère une flexion de l'arbre qui peut être responsable de déformations ou même de fractures dans les cas extrêmes. Il est essentiel de dimensionner l'arbre de manière à minimiser cette déformation, en tenant compte de la rigidité du matériau et de sa capacité à supporter ces contraintes.

d) Moments de flexion combinés

Le moment de flexion est une conséquence de la force radiale agissant sur l'arbre, avec une distance par rapport au point d'application. Ce moment induit des contraintes de flexion qui peuvent entraîner une rupture ou une déformation permanente si elles sont trop élevées.

$$M_f = F_r * l \quad (4)$$

où :

M_f : moment de flexion (N.m)

F_r : force radiale (N)

l : longueur du levier, c'est-à-dire la distance entre l'axe de l'arbre et le point d'application de la force.

IV.4. INFLUENCE DES PROPRIETES MECANQUES

Le module de Young détermine la résistance de l'arbre à la déformation sous l'effet des forces appliquées. Un module de Young élevé, tel que celui de la fonte GS, signifie que l'arbre est rigide et se déforme peu sous les contraintes.

Le coefficient de Poisson, quant à lui, définit la déformation latérale de l'arbre lorsque des forces sont appliquées dans une direction spécifique. Il est essentiel de prendre en compte ces deux propriétés pour éviter la défaillance de l'arbre à cause de la fatigue ou de la flexion excessive.

IV.5. Définition du logiciel ANSYS

ANSYS est un logiciel de simulation numérique avancé basé sur la méthode des éléments finis (MEF), largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie pour analyser le comportement physique des matériaux et des structures. En ce qui concerne la **simulation des métaux**, ANSYS permet d'étudier de manière précise la réponse des matériaux métalliques soumis à divers types de sollicitations mécaniques, thermiques ou couplées.

Grâce à ses modules spécialisés (tels que **ANSYS Mechanical**, **ANSYS Workbench**), le logiciel offre la possibilité de modéliser les propriétés spécifiques des métaux — comme l'élasticité, la plasticité, la fatigue, le fluage ou encore la rupture — tout en tenant compte de leurs comportements non linéaires. Il permet également de simuler les effets de traitements thermiques, de soudures, de chargements dynamiques ou de conditions extrêmes, ce qui est essentiel dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, de l'énergie et de la métallurgie.

Par la richesse de ses outils de post-traitement, ANSYS fournit des résultats visuels et quantitatifs détaillés sur les contraintes, les déformations, les zones critiques ou les modes de défaillance potentiels. Ainsi, il constitue un outil indispensable pour **optimiser la conception, garantir la sécurité et améliorer la durabilité des composants métalliques** avant leur mise en production.

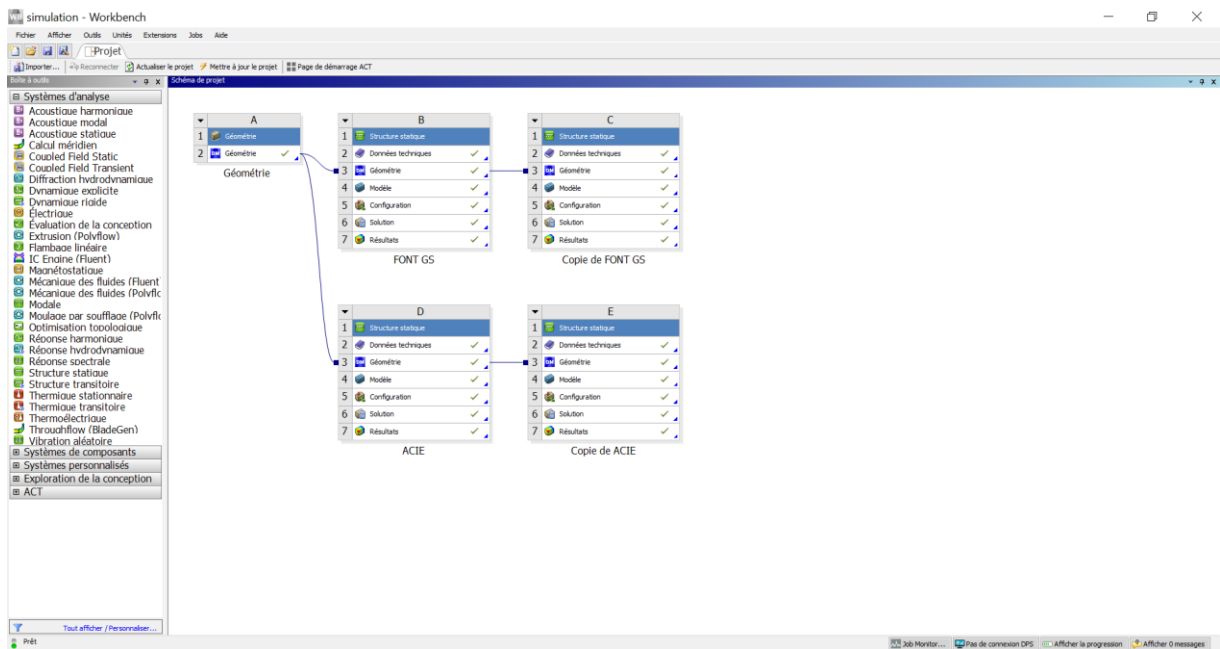


Figure IV.1. Interface Workbench 2020 R1.

IV.6. Description de la conception de l'éolienne

IV.6.1. Géométrie

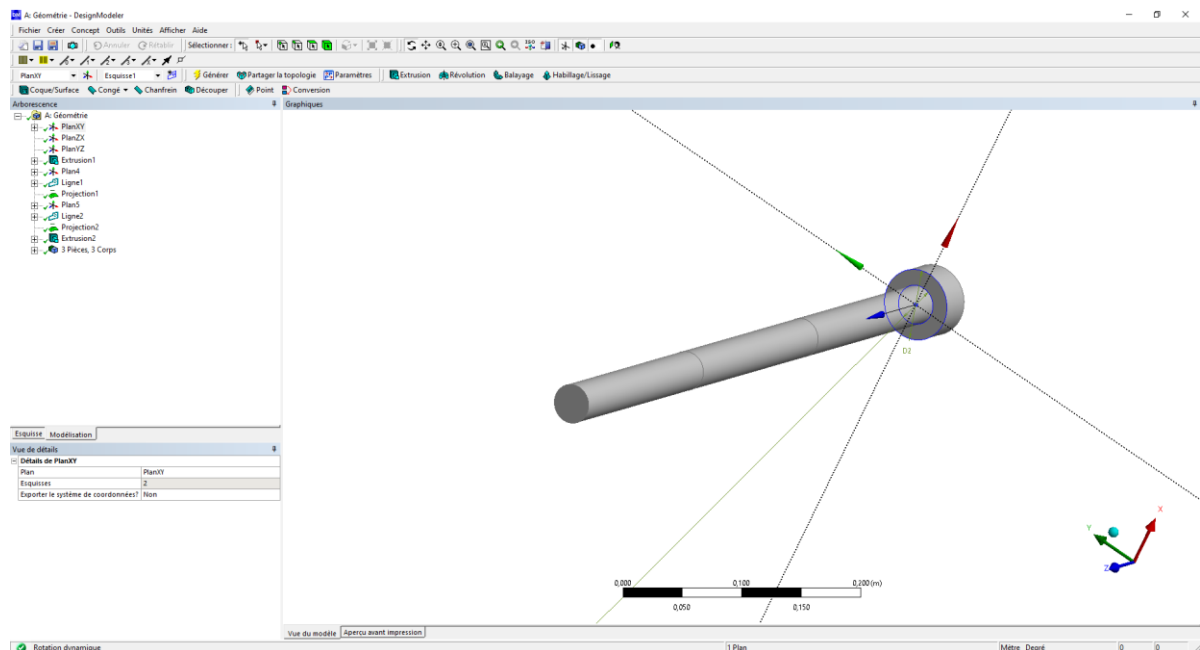


Figure IV.2. Géométrie.

IV.6.2. Modèle

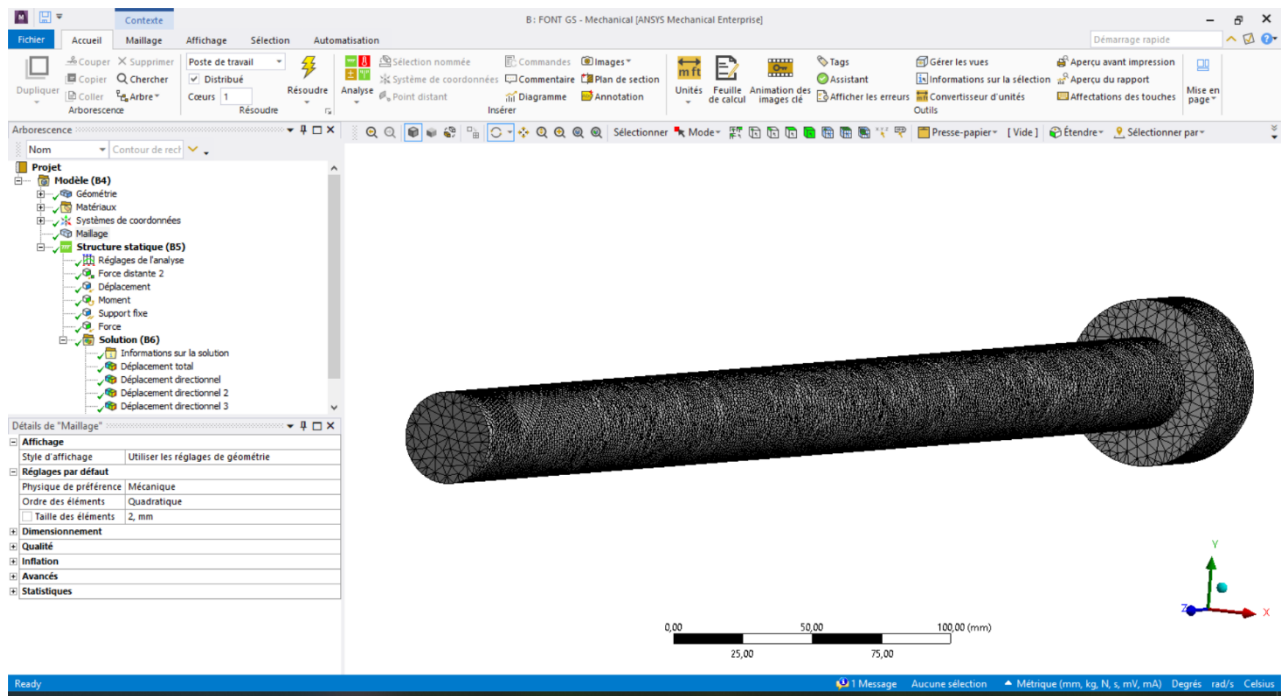


Figure IV.3. Modèle.

IV.6.3. Structure statique

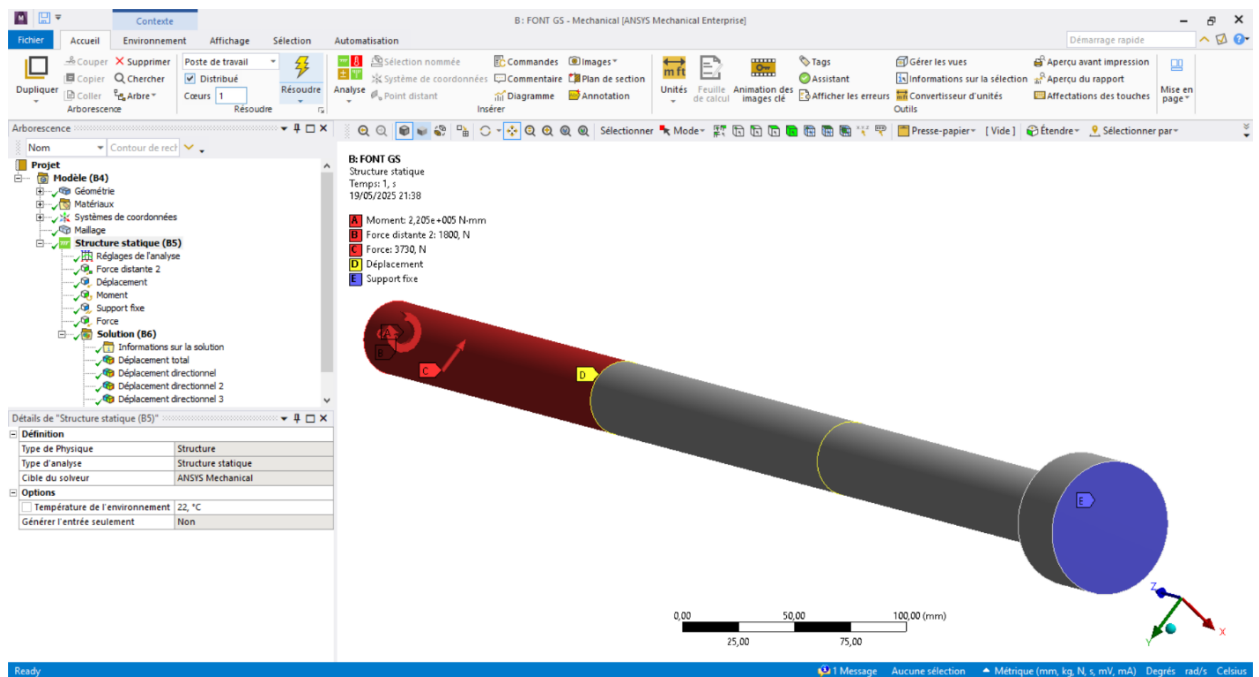


Figure IV.4. Structure statique.

IV.7. Présentation des résultats et discussion

Tous les résultats indiqués ci-dessous sont soumis à la force suivante:

- **Moment:** 2.205e+005 N.mm
- **Force distante:** 1800 N
- **Force:** 3030 N

* FONT GS

C: Copie de FONT GS

Déplacement total

Type: Déplacement total

Unité: mm

Temps: 1

19/05/2025 14:35

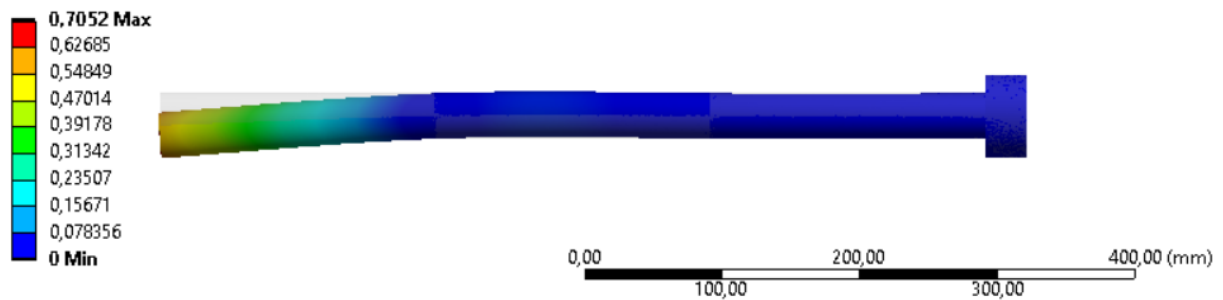


Figure IV.5. Déplacement total de la fonte GS.

C: Copie de FONT GS

Déplacement directionnel

Type: Déplacement directionnel(Axe X)

Unité: mm

Système de coordonnées global

Temps: 1

19/05/2025 14:36

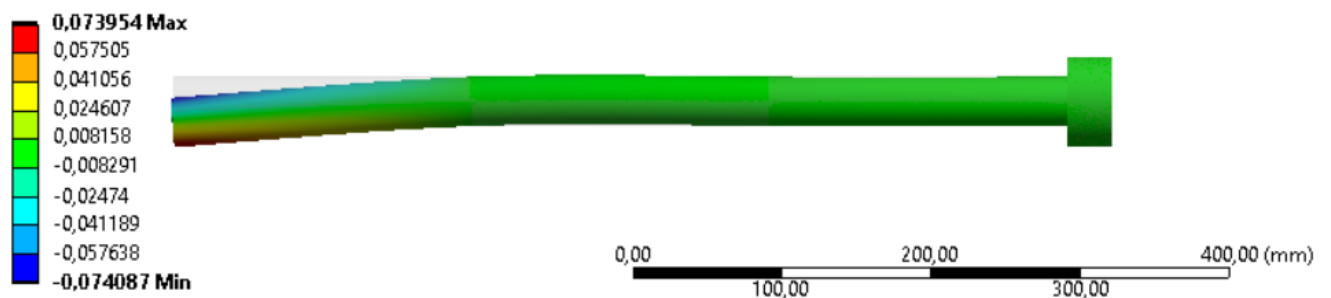


Figure IV.6. Déplacement directionnel(Axe X) de la fonte GS.

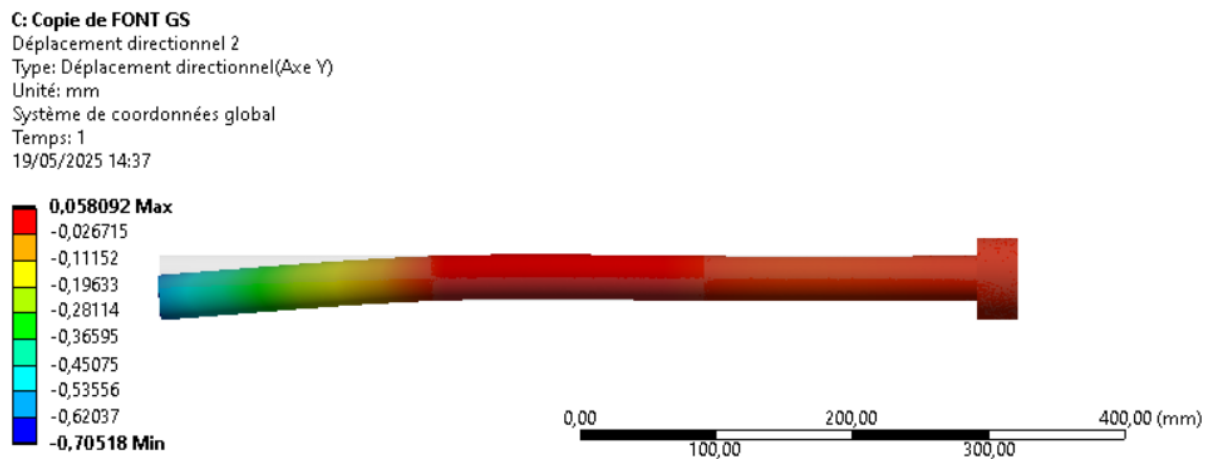


Figure IV.7. Déplacement directionnel(Axe Y) de la fonte GS.

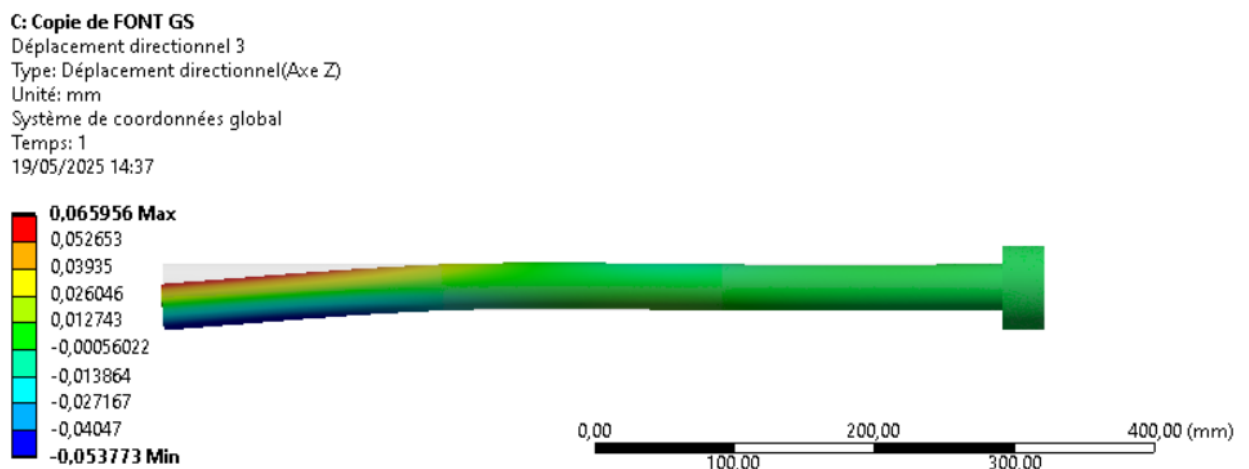


Figure IV.8. Déplacement directionnel (Axe Z) de la fonte GS.

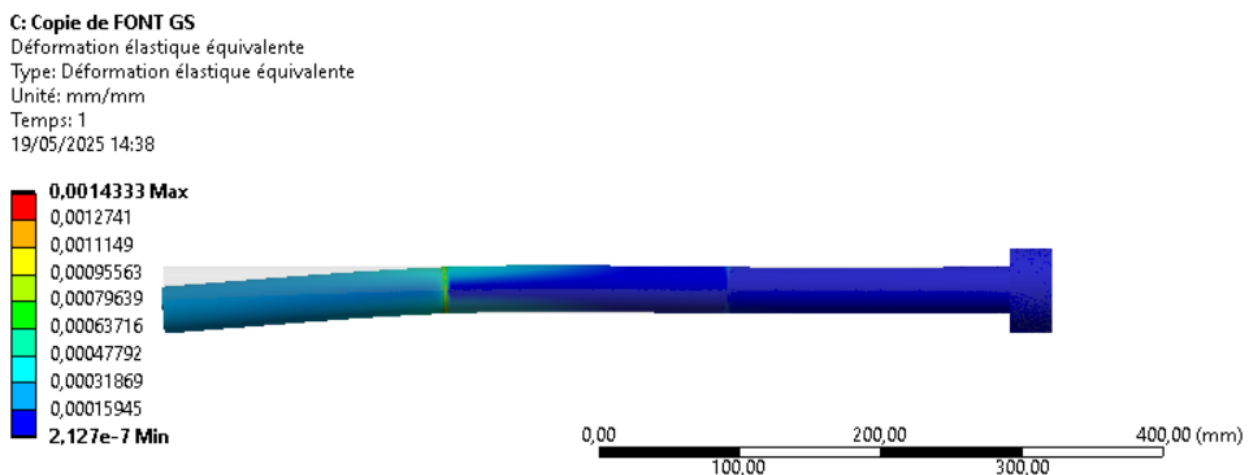


Figure IV.9. Déformation élastique équivalente de la fonte GS.

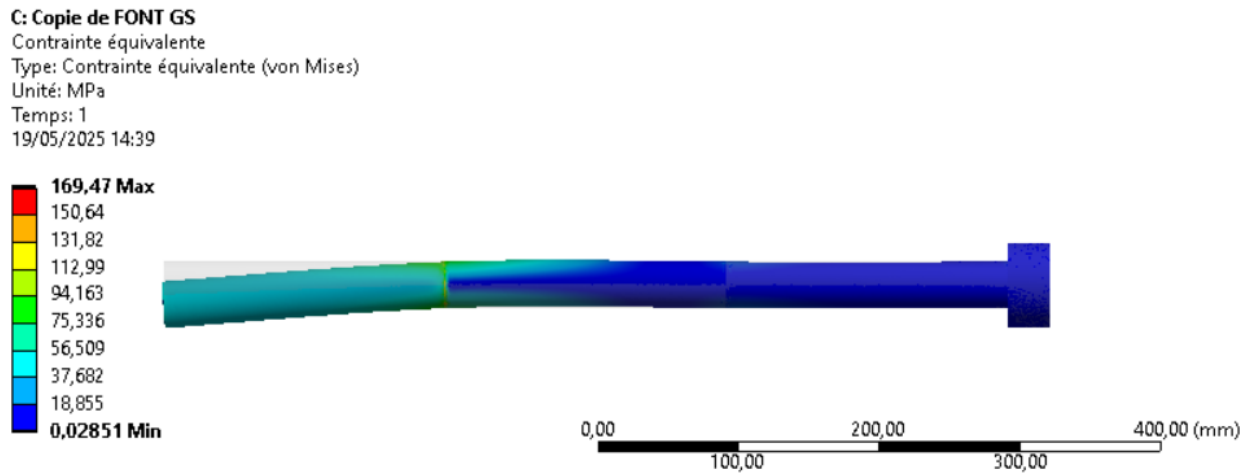


Figure IV.10. Contrainte équivalente de la fonte GS.

✓ Analyse et discussion des résultats

Dans cette simulation numérique réalisée avec ANSYS pour un arbre en fonte GS, les résultats montrent un déplacement total maximal d'environ 0,7052 mm, localisé principalement à l'extrémité gauche de l'arbre, ce qui reflète l'effet dominant de la force radiale appliquée. L'analyse des déplacements directionnels révèle que le déplacement selon l'axe Y est le plus significatif, atteignant une valeur minimale de -0,70518 mm, indiquant une flexion importante dans ce plan. Le déplacement selon l'axe X est faible (max. 0,073954 mm), tandis que celui selon l'axe Z reste négligeable. La déformation équivalente maximale est de 0,0014333 mm/mm, concentrée dans la zone soumise aux plus fortes contraintes. Enfin, la contrainte équivalente de von Mises atteint un maximum de 169,47 MPa, ce qui reste dans la limite acceptable pour la fonte GS, confirmant la validité du design sous les charges appliquées.

Les résultats de la simulation de l'arbre en acier sont utilisés comme témoin pour comparer avec celles de la fonte GS.

*** ACIE:**

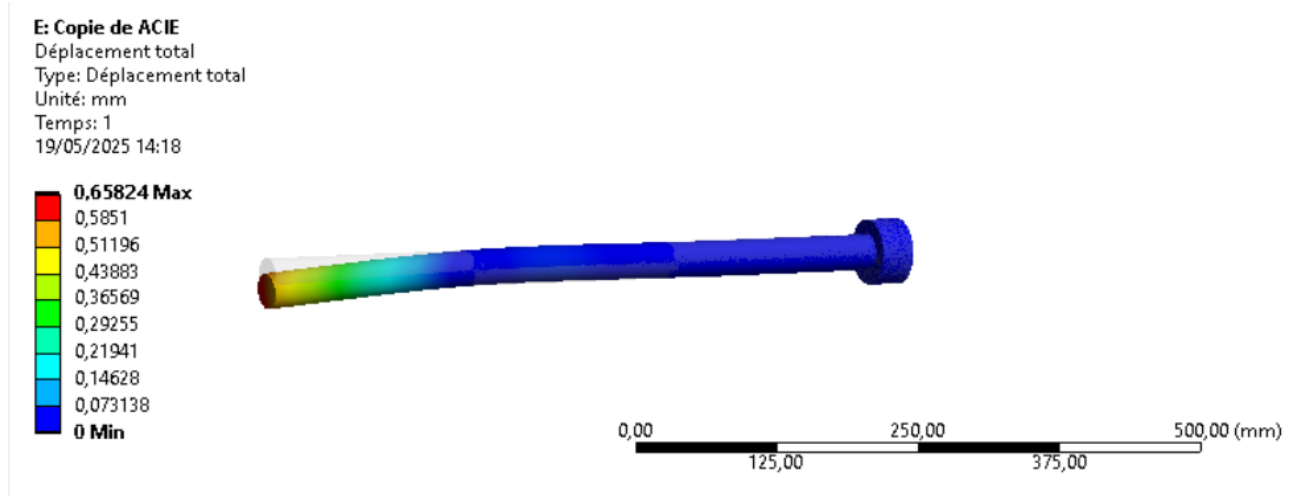


Figure IV.11. Déplacement total de l'acier.

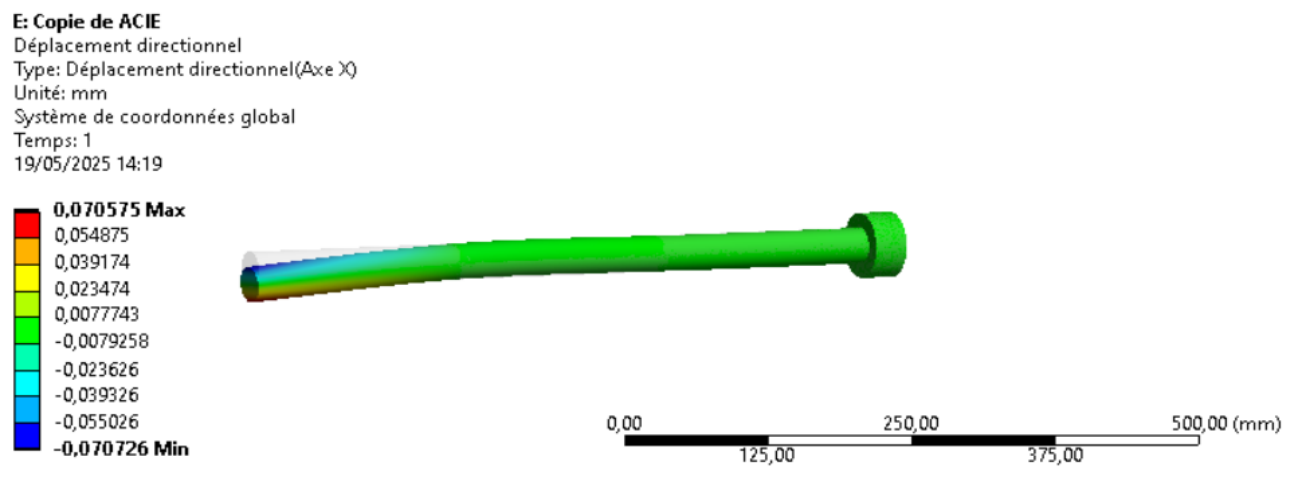


Figure IV.12. Déplacement directionnel (Axe X) de l'acier.

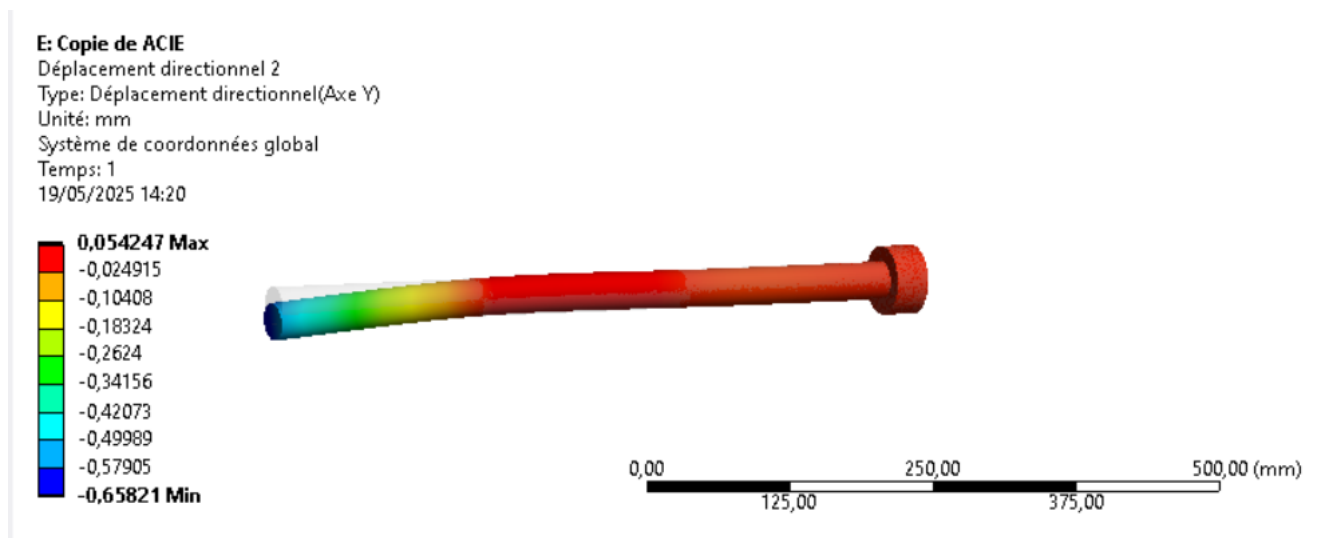


Figure IV.13. Déplacement directionnel(Axe Y) de l'acier.

E: Copie de ACIE

Déplacement directionnel 3
Type: Déplacement directionnel(Axe Z)
Unité: mm
Système de coordonnées global
Temps: 1
19/05/2025 14:21

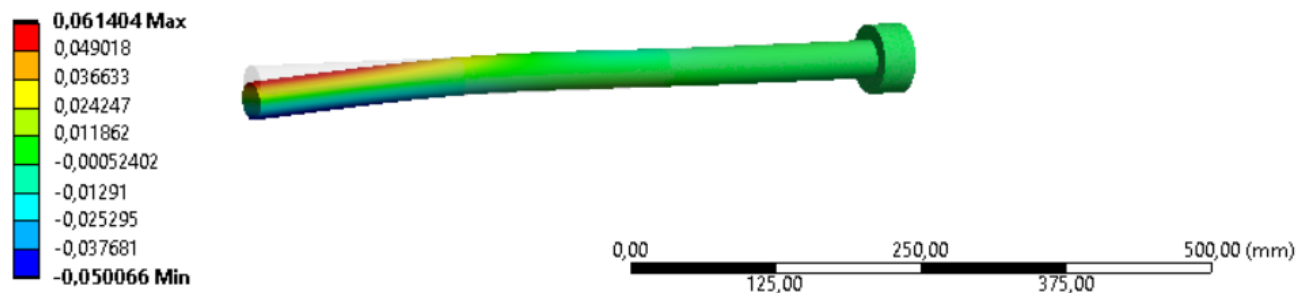


Figure IV.14. Déplacement directionnel (Axe Z) de l'acier.

E: Copie de ACIE

Déformation élastique équivalente
Type: Déformation élastique équivalente
Unité: mm/mm
Temps: 1
19/05/2025 14:21

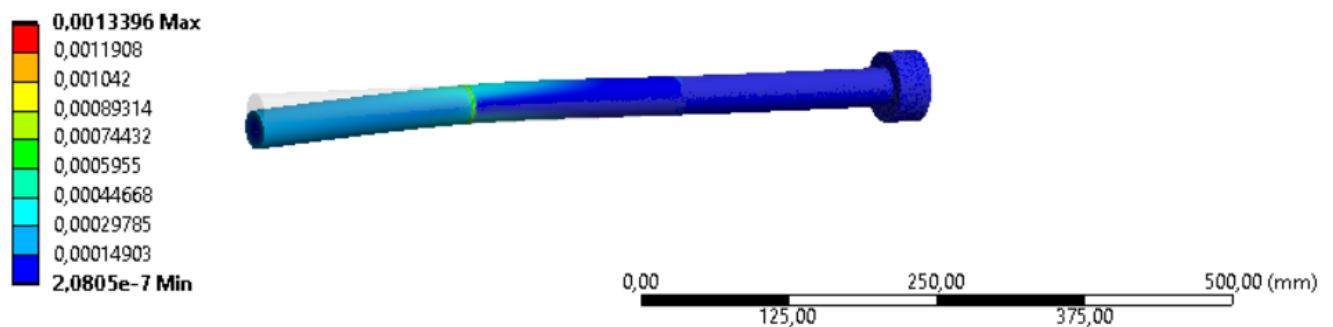


Figure IV.15. Déformation élastique équivalente de l'acier.

E: Copie de ACIE

Contrainte équivalente
Type: Contrainte équivalente (von Mises)
Unité: MPa
Temps: 1
19/05/2025 14:22

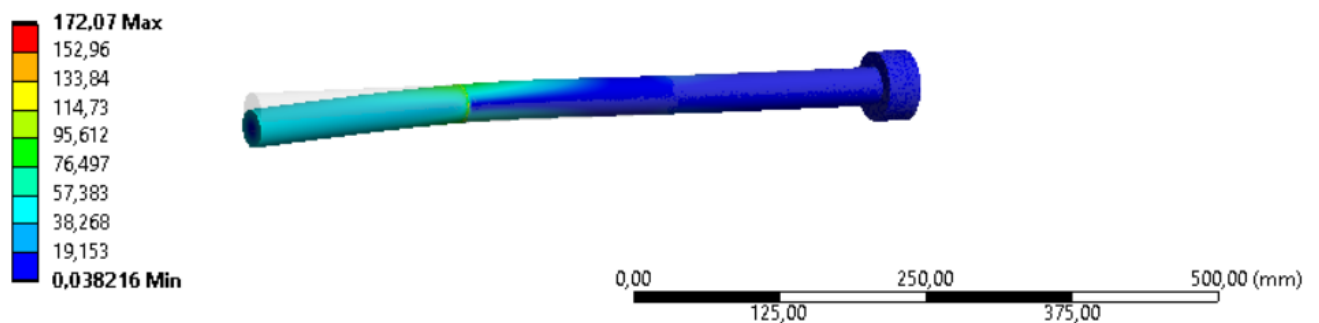


Figure IV.16. Contrainte équivalente de l'acier.

✓ Analyse et discussion des résultats

Les résultats de la simulation montrent que l'arbre en acier de l'éolienne subit un déplacement total maximal de 0,658 mm, concentré à l'extrémité libre, ce qui est attendu sous l'effet d'un couple et d'une force radiale. Le déplacement directionnel selon l'axe X est faible ($\pm 0,07$ mm), indiquant une faible influence axiale. L'essentiel de la flexion se produit dans le plan Y, avec un déplacement allant jusqu'à -0,658 mm, dû à la force radiale appliquée. Le déplacement selon l'axe Z reste limité (max 0,061 mm), confirmant une flexion principalement dans le plan XY. La déformation équivalente maximale est de 0,00134 mm/mm, et la contrainte de von Mises atteint 172 MPa, ce qui reste bien en dessous de la limite élastique typique de l'acier, indiquant que la pièce fonctionne en toute sécurité sous les charges appliquées.

IV.8. Comparaison des résultats de simulation – Fonte GS et Acier

La simulation numérique réalisée sous ANSYS pour les deux matériaux — fonte GS et acier — permet de comparer leur comportement mécanique sous les mêmes conditions de charge. L'arbre en fonte GS présente un déplacement total maximal de 0,7052 mm, légèrement supérieur à celui de l'arbre en acier qui est de 0,658 mm. Cela montre une plus grande rigidité de l'acier.

Concernant les déplacements directionnels, dans les deux cas, la flexion principale est observée selon l'axe Y avec des valeurs similaires (-0,70518 mm pour la fonte GS contre -0,658 mm pour l'acier). Les déplacements selon l'axe X sont faibles dans les deux cas (0,073954 mm pour la fonte GS et $\pm 0,07$ mm pour l'acier), et ceux selon l'axe Z sont négligeables, bien que légèrement plus marqués pour l'acier (0,061 mm).

La déformation équivalente maximale est légèrement plus élevée pour la fonte GS (0,0014333 mm/mm) que pour l'acier (0,00134 mm/mm), ce qui reflète une plus grande ductilité de la fonte, mais aussi une résistance mécanique inférieure.

Enfin, les contraintes de von Mises atteignent 169,47 MPa pour la fonte GS et 172 MPa pour l'acier, toutes deux en dessous des limites élastiques respectives des matériaux, indiquant un fonctionnement sûr. L'acier reste néanmoins plus adapté aux conditions de charge élevée ou dynamique.

Tableau IV.1: comparatif des résultats.

Paramètre	Fonte GS	Acier	Unité	Observation
Déplacement total max	0,7052	0,658	mm	Acier plus rigide
Déplacement directionnel Y	-0,70518	-0,658	mm	Flexion dominante Y
Déplacement directionnel X	0,073954	0,07	mm	Faible dans les deux cas
Déplacement directionnel Z	0,000054	0,061	mm	Acier légèrement plus affecté
Déformation équivalente max	0,0014333	0,00134	mm/mm	Fonte plus ductile
Contrainte de von Mises max	169,47	172	MPa	Tous deux en dessous de la limite élastique

IV.9. CONCLUSION

Les résultats montrent que l'acier possède de meilleures propriétés mécaniques globales que la fonte GS. Il présente une plus grande rigidité, une meilleure résistance aux déformations, et une tenue plus homogène aux contraintes. Néanmoins, la fonte GS reste un matériau viable, surtout en termes de coût et de facilité de mise en œuvre, pour des applications où les charges sont modérées et bien définies. Le choix final dépendra des exigences de performance, des conditions de service et du budget alloué.

Conclusion Générale

Ce travail a permis d'explorer en profondeur les propriétés mécaniques et le comportement de la fonte à graphite sphéroïdal (GS), ainsi que sa comparaison avec d'autres matériaux clés comme l'acier dans des applications spécifiques, telle que l'arbre de boîte de vitesses d'éolienne. Les analyses menées, qu'elles soient théoriques, expérimentales ou numériques par simulation (ANSYS), ont mis en lumière les avantages et les limites de la fonte GS en termes de rigidité, de déformation et de résistance aux contraintes.

En particulier, nous avons pu constater que la fonte GS, bien que présentant une ductilité supérieure, affiche une rigidité légèrement inférieure à celle de l'acier dans les conditions de charge étudiées. Cependant, ses propriétés mécaniques restent largement suffisantes et sécuritaires pour l'application visée, avec des contraintes de von Mises bien en deçà des limites élastiques des matériaux. Ces découvertes confirment la pertinence du choix de la fonte GS pour ce type de composant, offrant un compromis intéressant entre performance, coût et facilité d'usinage.

Pour les perspectives futures, il serait pertinent de approfondir l'étude des phénomènes de fatigue et de propagation de fissures sur la fonte GS sous des cycles de charge prolongés, ou d'explorer l'impact de différents traitements thermiques sur ses propriétés mécaniques. De plus, une analyse coût-bénéfice plus détaillée des procédés de fabrication pour les deux matériaux pourrait apporter des informations précieuses pour des choix industriels. Ce domaine d'étude reste riche en possibilités, contribuant à l'optimisation des matériaux pour des applications industrielles exigeantes et durables.

REFERENCE

- [1] D. A. Spera, Wind turbine technology, 2ème ed.: Asme Press, 2009.
- [2] N.Cherfia. Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens, Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2010.
- [3]T. Goyne, Y. Plays, P. Lepourry, and J. Besse, Initiation à l'aéronautique, 6ème ed.:Cepadues, Collection Fact, 2010 .
- [4] S.Bencharif .Variation des paramètres mécaniques pour l'optimisation du rendement d'une éolienne, mémoire Master, université Mohamed Khider de Biskra, Algérie juin 2013.
- [5] M.Krikeb. Modélisation, Simulation et Commande d'une Eolienne Contrarotative, mémoire de magistère, université 20 aout 1955 , Algérie 2012 .
- [6]M. Hecht, J.C. Margerie, Les premiers stades de la solidification des alliages de type fontes, Mémoire scientifiques revue de métallurgie, n°5, p 325-338, 1971
- [7]S.Bencharif .Variation des paramètres mécaniques pour l'optimisation du rendement d'une éolienne, mémoire Master, université Mohamed Khider de Biskra, Algérie juin 2013.
- [8]centre de développement des énergies renouvelables.
- [9]C.bontron . Journaliste et envoyée spéciale en chine. « En chine les terre rare tuent les villages ». juillet 2012.
- [10]J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, Wind energy explained, 2ème ed.: John Wiley & Sons, 2009.
- [11] J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Gründling, A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System », Santa Maria, RS, Brazil, 2015, pp. 734-737
- [12] Y Zou, Malik. E, E. Senior, Y. Sozer, « Simulation Comparisons and Implementation of Induction Generator Wind Power Systems », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, No. 3, June 2013
- [13] A. Gaillard, « Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010
- [14] J. F. Manwell and J. G. McGowan, Wind Energy Explained Theory, Design and Application Second Edition, University of Massachusetts, USA, 2009, pp. 92-145
- [15] Marc Rapin, Jean Mark Noël, Energie Éolienne Principes, Études de Cas, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Paris, 2010, pp 111- 114
- [16] Eric Haut, Wind turbine,' Fiindamentals, Technologies, Applications, Economies, 2nd Edition, Kraill ing, Germany, 2005, pp. 67-79
- [17]ASM Specialty Handbook - Cast Irons. Ed J.R. Davis, 1996

- [18]M. JACQUES BOURDIE le lundi 18 décembre 2017.
- [19]-MICHEL GEIER. Métallurgie de fonderie. Tome 1. Editions Eyrolles 1976.
- [20]Norme NF EN ISO 945-1, Microstructure des fontes – Partie 1 : Classification du graphite par analyse visuelle. AFNOR, 2009
- [21]R. Källbom et al., On the solidification sequence of ductile iron castings containing chunky graphite. Materials Science and Engineering, A 413, 2005, pp. 346-351.
- [22]U. de la Torre, J. Lacaze and J. Sertucha, Chunky graphite formation in ductile cast irons: effect of silicon, carbon and rare earths. International Journal of Materials Research, 107.11, 2016, pp. 1041-1050.
- [23]R. Ghergu, L. Magnusson Åberg and J. Lacaze, A possible mechanism for the formation of exploded graphite in nodular cast irons. Materials Science Forum, Vol. 790, 2014, pp. 435-440.
- [24]-Jean-Claude MARGERIE. Centre français d'exploitation. Techniques de l'ingénieur, traité matériaux métalliques. M 380.
- [25] B.F. Brown and M.F. Hawkes, Kinetics of graphitization in cast irons. AFS Trans., 1951. 59, pp. 181-200.
- [26] Z. Jiyang, Colour metallography of cast iron, Chapter 5-I: White Cast Iron. China Foundry, 2009, pp. 337-349.
- [27] G.S. Jayaraman, R.D. Maier and J.F. Wallace, Spheroidisation of graphite nodules in malleable iron. AFS Trans., 1978. 52, pp. 113-124.
- [28] G.S. Jayaraman, R.D. Maier and J.F. Wallace, Processing, structure and properties of spheroidal graphite malleable iron. AFS Trans., 1979. 87, pp. 299-322.
- [29] S. Parent-Simonin, C. Moreaux, and J. C. Margerie, Influence de l'atmosphère de recuit sur la structure des fontes malléables. Revue de Métallurgie, 74, 1977, pp. 537-543.
- [30] M. Pirnat, P. Mrvar and J. Medved, A thermodynamic and kinetic study of the solidification and decarburization of malleable cast iron. Materials and technology, 45, 2011, pp. 529-535.
- [31]R. Jday, caractérisation microstructurale du graphite sphéroïdal formé lors de la solidification et à l'état solide, Thèse Doctorale, Université de Toulouse, (2017)
- [32]H. Morrogh and W.J. Williams, Graphite Formation in Cast Irons and in Nickel-Carbon and Cobalt-Carbon Alloys. Journal of the Iron and Steel Institute, 1947. 155: p. 32137
- [33] Laplanche, Les fontes et leurs traitements thermiques, 1re éd., Paris: PYC EditionDesforges, 1976.
- [34]W. Crafts, Inoculating alloys consisting of Si Al Ca Ba Mn Zr Fe, United states Patent, 1966

- [35] R. Elliott, Cast iron technology, University of Michigan: Butterworths, 1988.
- [36] M. Hecht, J.C. Margerie, Les premiers stades de la solidification des alliages de type fontes, *Mémoire scientifiques revue de métallurgie*, n°5, p 325-338, 1971.
- [37] J. LACAZE, Formation des structures dans les fontes ferrito-perlitiques à graphite sphéroïdal : approches expérimentales, modélisation et simulations numériques. *La revue de Métallurgie – CIT / Science et Génie des Matériaux*, vol. 93, n°5, p 641-655, 1996.
- [38] P. Dierickx, Etude de la microstructure et des mécanismes d'endommagement de fontes GS ductiles. Influence des traitements thermiques de ferritisation. Thèse Génie des matériaux: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, p210, 1996
- [39] U. H. Udomon and C. R. Loper Jr, Comments concerning the interaction of rare earths with subversive elements in cast irons. *AFS Trans.*, 1985. 93, pp. 519-522.
- [40] C. V. White, R. A. Flinn and P. K. Trojan, Correlation of percent nodularity with Mg-Ce content – Section thickness and mechanical properties of ductile iron. *AFS Trans.*, 1983. 64, pp. 549- 558.
- [41] S. V. Subramanian, J. Qichuan, S. Thangirala, G. R. Purdy, D. A. R. Kay, Rare earths in ductile iron production: a critical review. Ductile Iron Society, Research project n°27, 1996.
- [42] G.S. Jayaraman, R.D. Maier and J.F. Wallace, Spheroidisation of graphite nodules in malleable iron. *AFS Trans.*, 1978. 52, pp. 113-124.
- [43] G. X. Sun and C. R. Loper Jr., Graphite flotation in cast iron. *AFS Trans.*, 1983. 91, pp. 841-854.
- [44] K. Theuwissen, J. Lacaze and L. Laffont, Structure of graphite precipitates in cast iron. *Carbon*, 96, 2016, pp. 1120-1128.
- [45] K. Theuwissen, Etude de l'influence des impuretés et des éléments à l'état de traces sur les mécanismes de croissance du graphite dans les fontes. thèse INP Toulouse, 2013.
- [46] T. Skaland, Nucleation mechanisms in ductile iron. *Proc. AFS Cast Iron Inoculation Conference*, 2005, pp. 13-30.
- [47] Y. Igarashi and S. Okada, Observation and analysis of the nucleus of spheroidal graphite in magnesium-treated ductile iron. *International Journal of Cast Metals Research*, 11, 1998, pp. 83-88.
- [48] M. Colombié, *Matériaux métalliques*, Les référentiels Dunod (1994).
- [49] R. Langevin, *Guide d'auto-apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique*, Perform (2015).
- [50] B. Mathieu, Contribution à l'étude et au développement de nouvelles poudres de fonte, Thèse de Doctorat, Université Polytechnique de Montréal, (2016).
- [51] CHALESF .WALTON 1983 Manuel des fontes moulées page : 227-232

- [52] Technique de l'ingénieur M410-page 11,12,13.
- [53] R-BARTON Importance et influence dans les fontes à graphite sphéroïdale
- [54] G. de Smet, La pratique des traitements thermiques des métaux industriels, Dunod, Paris, (1972).
- [55] M. Geier, Métallurgie de fonderie T1, édition Eyrolles, (1978).
- [56] S. Karsay, principe de base de la métallurgie de la FGS : production de la fonte GS, point de la technique à ce jour, qit-fer et titan Inc. Montréal, Canada (1976).
- [57] [www. Sorelmetal.com](http://www.Sorelmetal.com).
- [58] M. Geier, Métallurgie de fonderie T2, édition Eyrolles, (1978).
- [59] H. Le Breton, Manuel pratique du fondeur de fonte, Dunod, (1962).
- [60] H.BRETON PARIS 1966 Manuel des fontes moulées page : 227-232.
- [61] Précis de fonderie tome 2 pierre broquet 1978 page 99 à 104
- [62] R. Quatremer et J. P.Trotignon. Précis de construction mécanique, T1, NathanAfnor, 5ème édition.
- [63] M. I. Boulifa, Effet des éléments d'alliage sur la structure et les propriétés des fontes ADI, Thèse de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, (2011).
- [64] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). Wind Energy Explained: Theory, Design and Application (2nd ed.). Wiley.
- [65] Eriksson, S., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2008). Evaluation of different turbine concepts for wind power. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(5), 1419-1434.
- [66] A. Drihem, Conception et simulation du comportement d'une éolienne à des variations de certains paramètres, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar - Annaba, Département de Génie Mécanique, Algérie, 2017.
- [67] A. E. Kabouia, L'effet de cuivre sur les propriétés mécaniques des fontes à graphite sphéroïdal, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar - Annaba, Département de métallurgie et génie des matériaux, Algérie, 2019/2020.