

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Electromécanique

Présenté par :

- GOST Khalifa
- MESAI MOHAMMED Abdelbasset
- TRILLI Abde Raouf

Intitulé :

**Etude et simulation de fabrication d'une aube
en super alliage**

Soutenu le 05/06/2024.

Devant le jury composé de :

Dr. MEZIANE Assia	Président	Université Echahid Hamma Lakhdar
Dr. KHECHANA Mohammed	Encadreur	Université Echahid Hamma Lakhdar
Dr. LARGOT Soulef	Examineur	Université Echahid Hamma Lakhdar

Année académique : 2023/2024



Remerciements

Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissante m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur

Dr : KHECHANA Mohammed, Docteur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'ElOued, pour avoir dirigé ce travail.

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

À mes très chères sœurs et à ma grande famille.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime

À vous.





Abstract
Résumé
الملخص

Résumé

L'aspect d'une turbine à gaz (vitesse, poussée,...) est étroitement lié à la composition des aubes. La réussite de la production de l'aube repose sur la sélection du matériau brut et les diverses méthodes utilisées. Dans une turbine à gaz, les aubes sont soumises à des conditions de fonctionnement extrêmement exigeantes : Il y a une température extrêmement élevée, une force centrifuge élevée due aux vitesses de rotation élevées, des effets d'abrasion par les gaz chauds à grande vitesse et des phénomènes de vibration qui peuvent entraîner des dommages tels que l'impact, la fissure, l'usure, la destruction du revêtement protecteur et la dégradation de la microstructure.

Il est ainsi évident que les aubes sont les composants les plus importants d'une turbine à gaz. Leur complexité géométrique délicate les rend difficiles à modéliser et à fabriquer, ce qui rend très crucial de choisir les procédés de fabrication appropriés.

Mots-clés: Turbine à gaz, les aubes, Les super alliages , CATIA V5

Abstract

The appearance of a gas turbine (speed, thrust,...) is closely related to the composition of the blades. The success of the production of the blade depends on the selection of the raw material and the various methods used. In a gas turbine, the blades are subjected to extremely demanding operating conditions: There is an extremely high temperature, high centrifugal force due to the high rotational speeds, abrasion effects by hot gases at high speeds, and vibration phenomena that can lead to damage such as impact, cracking, wear, destruction of the protective coating and degradation of the microstructure.

It is thus obvious that blades are the most important components of a gas turbine. Their delicate geometric complexity makes them difficult to model and manufacture, making it very crucial to choose the appropriate manufacturing processes.

Keywords: Gas turbine, blades, Super alloys, CATIA V5

المخلص

ترتبط خصائص التوربينات الغازية ارتباطاً وثيقاً بمادة الشفرات. يكمن نجاح تصنيع الشفرة في اختيار الحصول على المادة الخام والعمليات المختلفة المطبقة. في التوربينات الغازية، تكون ظروف تشغيل الشفرات صعبة للغاية: درجة الحرارة العالية، قوة الطرد المركزية الناجمة عن سرعة الدوران، فهي تتعرض لتأثير التآكل بواسطة الغازات الساخنة، وكذلك ظواهر الاهتزاز التي يمكن ان تسبب ضرراً مثل : التآكل، تدمير الطلاء الواقي و تدهور البنية المجهريّة.

لذلك من الواضح ان الشفرات تقدم نفسها على انها أهم الأجزاء في التوربينات الغازية. تتميز بتعقيد هندسي دقيق مما يجعل نمذجتها وتصنيعها امراً صعباً للغاية و بالتالي فان اختيار عمليات التصنيع مهم للغاية.

الكلمات الرئيسية: توربينات الغاز ، شفرات ، سبائك سوبر ، CATIA V5.



Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Table des matières


Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

a

Chapitre I :	
Recherche bibliographique sur la fabrication des aubes en super alliage	
I.1.Introduction	3
I.2. Définition des super alliages	3
I.2.1. Historique du développement des superalliages	3
I.2.2. Microstructure et rôle des éléments d’alliage	5
I.2.3. Les superalliages à base de nickel monocristallins	6
I.2.3.1. Évolution des superalliages	7
I.2.3.2. Les différents types des superalliages à base de nickel	8
I.2.4. Composition chimique des superalliages	9
I.2.4.1. Solidification équiaxe	11
I.2.4.2. Modes de renforcement	11
I.3. Les superalliages à base de nickel pour aubes de turbine à gaz	12
I.3.1. Structure d’un superalliage à base de nickel	12
I.3.1.1. Les superalliages monocristallins base de nickel	13
I.3.1.2. Eléments d’alliages	13
I.3.1.3. La matrice austénitique γ	14
I.3.1.4. Phase γ'	15
I.3.1.5. Importance de la phase γ'	15
I.3.1.6. Carbure	16
I.3.1.7. Borures	17
I.4. Caractéristiques général des superalliages	17
I.4.1. Caractéristiques mécaniques	18
I.4.2. Protection contre la corrosion	18
I.5. Les procédés de fabrication des pièces en superalliages	19
I.5.1. Moulages des superalliages	19

I.5.1.1. Facteurs à prendre en compte pour le moulage des superalliages	20
I.5.2. Le forgeage des superalliages	20
I.5.2.1. Processus	21
I.5.2.2. Avantages du forgeage des superalliages	21
I.5.2.3. Applications des superalliages forgés	21
I.5.2.4. Type le forgeage des superalliages	22
I.5.3. Usinage	22
I.5.4. Fabrication additive	23
I.6. Conclusion	23
Chapitre II :	
Exigences en résistance et en fabrication des aubes des turbines à gaz	
II.1.Introduction	25
II.2. Généralité sur Les aubes	25
II.2.1. Les aubes	25
II.2.2. Détail des aubes	25
II.2.3. Le profil d'aube	26
II.3. La fabrication des ailettes	27
II.3.1. Fraisage des aubes de turbines	28
II.3.1.1. Ebauche de brut quelconque 3D	28
II.3.1.2. Usinage en bout d'aube de turbine 5 axes	28
II.3.1.3. Usinage en roulant d'aubes de turbine 5 axes	29
II.3.2. Moulage des aubes de turbine à gaz	30
II.3.2.1.Moulage au contact	30
II.3.2.2. Moulage par projection	31
II.3.2.3. Moulage sous vide	32
II.3.2.4. Moulage à cire perdue	33
II.4. Choix du matériau pour réalisation d'aube	33
Chapitre III :	
Conception et simulation de l'aube	
III. Introduction	36
 Partie A : Conception de l'aube	36
III. 1. Présentation de CATIA V5	36
III.2. Création de l'aube	37

✚ Partie B : Simulation de chargement de l'aube	41
III.1. Analyse	42
III.1.1. Les contraintes	42
III.1.2. Les déformations	42
III.1.3. Les déplacements	43
✚ Partie C : Simulation de la fabrication de l'aube	44
III.1. Création de la pièce brute destinée à la fabrication de l'aube	44
III.2. Choix de l'atelier : Fraisage à commande numérique 5 axes	44
III.3. Définition de la phase d'usinage	45
III.4. Définition de l'opération d'usinage	45
III.5. Opération d'ébauche	45
III.6. Opération de finition	46
III.7. Génération du programme en code ISO	46
III.8. Conclusions	47
Conclusion générale	49
Bibliographique	



Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Page

Chapitre I :		
Recherche bibliographique sur la fabrication des aubes en super alliage		
Figure 1	<i>Les superalliages dans les turboréacteurs aéronautiques.</i>	4
Figure 2	<i>Enjeux Matériaux futurs pour très hautes températures</i>	4
Figure 3	<i>Tableau des principaux éléments périodique des éléments d'alliage de base sur le groupe VIII B.</i>	4
Figure 4	<i>Résistances mécanique et à l'oxydation de différents alliages</i>	5
Figure 5	<i>Microstructure typique d'un superalliage monocristallin (CMSX-4). Image MEB, révélant les cubes γ'-Ni₃Al après attaque électrochimique de la matrice γ (Electrolyte : acide perchlorique 20%, éthanol 70%, éthylène glycol monobutyl éther 10%, 3A, 2V).</i>	5
Figure 6	<i>Microstructure de superalliage selon la température d'utilisation</i>	6
Figure 7	<i>Matériaux au-delà des superalliages monocristallins</i>	6
Figure 8	<i>Le Positionnement des superalliages</i>	7
Figure 9	<i>Évolution des microstructures des aubes de turbine, équiaxe (a), colonnaire(b) et monocristalline (c).</i>	7
Figure 10	<i>Schéma des effets des différents éléments d'alliage des superalliages monocristallins base Ni de 1^{ère} génération</i>	8
Figure 11	<i>Comparaison schématiquement de propriétés mécaniques de superalliages base cobalt et superalliage base Nickel</i>	8
Figure 12	<i>Microstructure typique d'un superalliage base nickel γ/γ' et phases cristallines associées</i>	9
Figure 13	<i>Différentes générations de superalliages et leur variation de composition, d'après W. Ru</i>	10
Figure 14	<i>Tableau périodique des éléments des superalliages base sur le groupe VIII B</i>	10
Figure 15	<i>Textures de grains de coulée d'ailettes d turbine moulées, (a) fonderie conventionnelle (grains équiaxes) ; (b) solidification dirigée (grains colonnaires) ;(c) solidification dirigée+ sélection de grain (mono grain)</i>	11
Figure 16	<i>Particularité du durcissement par γ'</i>	12
Figure 17	<i>Ces deux phases sont mixées sans qu'il y ait rupture de la structure</i>	12
Figure 18	<i>Microstructures dans les superalliages base Ni</i>	13
Figure 19	<i>Diagramme Ni-Al (a) et structures cristallines de la phase γ (b) et γ'(c).</i>	14
Figure 20	<i>Image MET taille de grain austénitique γ & La résistance à la rupture des superalliages austénitique</i>	14
Figure 21	<i>Clichés STEM de super dislocations dans γ'(a) divisée en deux super partielles et (b)</i>	15
Figure 22	<i>Cliché MET Haute Résolution des super partielles qui composent une dislocation [100] dans la direction [01-1].</i>	15
Figure 23	<i>(a) Représentation d'un précipité cohérent γ' dans une matrice γ d'un superalliage à l'état initial et (b) avec une microstructure mise en radeaux</i>	16

	<i>contenant des dislocations aux interfaces. ble vecteur de Burgers et d la distance moyenne entre deux dislocations. nle nombre de pas du circuit de Burgers</i>	
Figure 24	<i>Représentation schématique de formation dans les superalliages base cobalt</i>	16
Figure 25	<i>Particules de carbure et limites de grains de la zone de lame de l'ailette</i>	16
Figure 26	<i>Bande continue des limites des grains et carbures CO</i>	17
Figure 27	<i>Sollicitations thermiques et mécaniques dans un disque de turbine</i>	17
Figure 28	<i>Essais de corrosion dans la cendre à 800°C (ALSTOM)</i>	18
Figure 29	<i>Moulage à la cire perdue des superalliages</i>	19
Chapitre II :		
Exigences en résistance et en fabrication des aubes des turbines à gaz		
Figure 1	<i>Aube d'une turbine à gaz</i>	26
Figure 2	<i>Géométrie du profil</i>	26
Figure 3	<i>Lignes du profil - 1: Corde, 2: Cambrure, 3: Longueur, 4: Ligne médiane</i>	27
Figure 4	<i>Ebauche de brut quelconque</i>	28
Figure 5	<i>Usinage en bout d'aube de turbine 5 axes</i>	29
Figure 6	<i>Usinage en roulant d'aubes de turbine 5 axes</i>	29
Figure 7	<i>Usinage en bout en 5 axes d'une aube de turbine : La finition des pales est réalisée par un usinage en continu</i>	30
Figure 8	<i>Schéma de moulage au contact</i>	30
Figure 9	<i>Chemat de Moulage par projection</i>	31
Figure 10	<i>Schéma de principe de moulage à cire perdue</i>	33
Figure 11	<i>Développement de matériaux d'aube depuis 1940 à notre jour</i>	34
Chapitre III :		
Conception et simulation de l'aube		
Figure 1	<i>Architecteur du logiciel CATIA v5</i>	36
Figure 2	<i>Le profil 65-206 de l'aube</i>	38
Figure 3	<i>Le modèle 3D de l'aube obtenue</i>	41
Figure 4	<i>L'aube Maillée</i>	41
Figure 5	<i>Différents chargements appliqués sur l'aube</i>	41
Figure 6	<i>Distribution des contraintes</i>	42
Figure 7	<i>Distribution des déformations</i>	43
Figure 8	<i>Distribution des déplacements</i>	43
Figure 9	<i>Pièce brute couvre la pièce finie</i>	44
Figure 10	<i>Ouverture de l'atelier d'usinage à commande numérique</i>	44

Figure 11	<i>Réglage de l'opération d'ébauche</i>	45
Figure 12	<i>Simulation de l'usinage de l'aube.</i>	46



Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Page

Chapitre I :		
Recherche bibliographique sur la fabrication des aubes en super alliage		
Tableau 1	<i>Fonction des éléments sur les caractéristiques à chaud des superalliages</i>	9
Chapitre II :		
Exigences en résistance et en fabrication des aubes des turbines à gaz		
Tableau 1	<i>Caractéristiques de moulage au contact</i>	31
Tableau 2	<i>Caractéristiques de moulage par projection</i>	32
Tableau 3	<i>Caractéristiques de moulage sous vide</i>	32
Chapitre III :		
Conception et simulation de l'aube		
Tableau 1	<i>Coordonnées en % du profil de l'aube</i>	37
Tableau 2	<i>Coordonnées au pied de l'aube</i>	38-39
Tableau 3	<i>Coordonnées au sommet de l'aube</i>	39-40



Introduction générale

Introduction générale

Une turbine à gaz est constituée essentiellement de trois parties principales, à savoir : le compresseur, la chambre de combustion et la turbine de détente. Les étages de la turbine de détente sont construits de disques à aubes.

Les aubes installées sur le diamètre d'un disque sont des pièces à géométrie complexes. Leurs profils jouent un rôle primordial sur la vitesse d'écoulement des gaz brûlés. Donc la forme des aubes est responsable sur la vitesse de sortie des gaz de la turbine.

Une aube appartenant à la turbine de détente est exposée aux différentes sollicitations de natures différentes : Cette zone de la turbine à gaz, est la partie la plus chaude, en raison de divers facteurs tels que la température élevée des gaz brûlés souvent supérieure à la température de fusion de quelques alliages, le fluage causé par la force centrifuge, la corrosion à chaud, les contraintes élevées causées par la géométrie complexe et la fatigue vibratoire, les forces induites par les gaz chauds,...

Donc, en plus de la géométrie complexe des aubes, on ajoute d'autres conditions sur le type de matériau qui va supporter toutes ces conditions de travail. Une aube peut être obtenue par coulé, par déformation ou par usinage mais ces conditions de travail ont poussé les industriels à mieux façonner les aubes tout en respectant la géométrie qui autorise une vitesse d'écoulement élevée et le matériau qui est difficilement usinable.

Les industriels ont fait d'énormes progrès pour trouver de nouveaux matériaux tels que les super alliages à base de nickel.

Ce projet est divisé en trois chapitres : Le premier chapitre est consacré à recherche bibliographique sur la fabrication des aubes en super alliage. Dans le deuxième chapitre expose une étude sur les matériaux et méthodes de fabrication des aubes. Le troisième chapitre, est réservé à la simulation d'une aube de turbine et finalement une conclusion générale récapitulera l'essentiel de ce travail.

Chapitre I

**Recherche bibliographique sur la
fabrication des aubes en super alliage**

I.1. Introduction

Depuis une quarantaine d'années, des avancées remarquables ont été réalisées dans le domaine des alliages réfractaires utilisés pour la fabrication des parties chaudes des turbomachines. Le développement de ces machines est influencé par la présence sur le marché d'alliages qui sont mécaniquement et chimiquement résistants à des températures de plus en plus élevées. Effectivement, il est connu que le rendement de la turbine à gaz augmente rapidement en fonction de la température : ainsi, on observe une augmentation de la température d'entrée des gaz de combustion de 1300 à 1500 °C [1], qui est actuellement atteinte dans les turbines performantes. Une telle température est supérieure aux capacités d'exploitation des alliages connus et nécessite un système de refroidissement efficace ; d'où le très grand intérêt de disposer de matériaux résistant à des températures de plus en plus élevées et simplifiant le système de refroidissement. Ces matériaux, qui sont des alliages au chrome à base de nickel, ou de cobalt ou encore d'une combinaison de ces éléments avec le fer, sont appelés superalliages.

I.2. Définition des super alliages

Les superalliages sont des alliages spécialement conçus pour résister à des températures extrêmement élevées. Ils sont des matériaux métalliques qui présentent des caractéristiques mécaniques exceptionnelles dans un large éventail de températures et une excellente résistance à la corrosion et/ou à l'oxydation.

On peut diviser les superalliages en trois familles :

- Alliages à base de fer-nickel-chrome ;
- Alliages à base de nickel ;
- Alliages à base de cobalt.

Leur résistance élevée au fluage est due principalement aux trois facteurs :

- Raidissement de la matrice par addition des éléments : molybdène, tungstène, cobalt, niobium, tantale, vanadium ;
- Présence d'une phase intermétallique finement précipitée ;
- Présence de carbures.

I.2.1. Historique du développement des superalliages

Les superalliages sont des alliages haute température à base de nickel, de cobalt ou de fer qui offrent des propriétés mécaniques et une résistance à la corrosion exceptionnelle. Conçus pour être utilisés à des températures élevées, ils combinent résistance mécanique et stabilité de surface. Utilisés à l'origine dans les moteurs d'avion, leurs applications se sont étendues aux

turbines à gaz industrielles et marines, aux moteurs de fusée, aux réacteurs nucléaires et aux usines chimiques. [2]

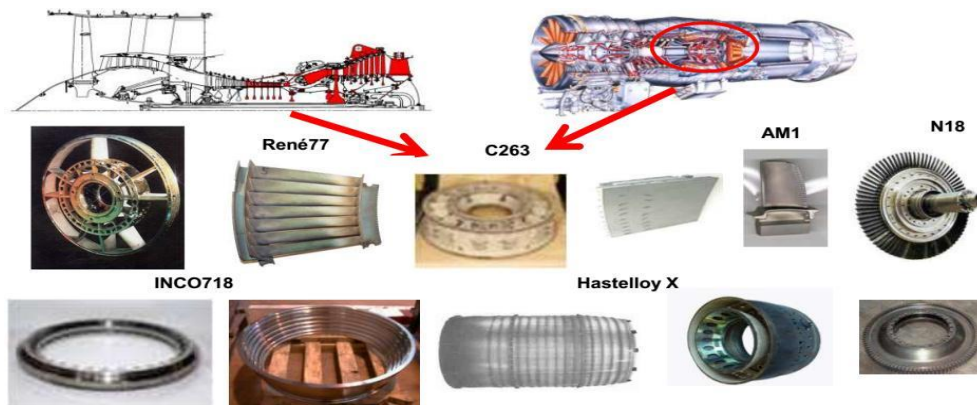


Figure I.1 : Les superalliages dans les turboréacteurs aéronautiques. [2]

Le développement des superalliages à base de nickel a commencé à la fin des années 1920. En France, Chevenard a introduit de l'aluminium et du titane dans un acier à haute teneur en nickel, créant ainsi des précipités de Ni₃Al. Aux États-Unis, des travaux similaires ont été réalisés avec un alliage nickel-chrome 80/20. Les progrès ultérieurs ont porté sur la composition, les méthodes de fabrication et les traitements thermiques, ce qui a conduit à la coulée et à la solidification dirigées et à la création de superalliages. [3]

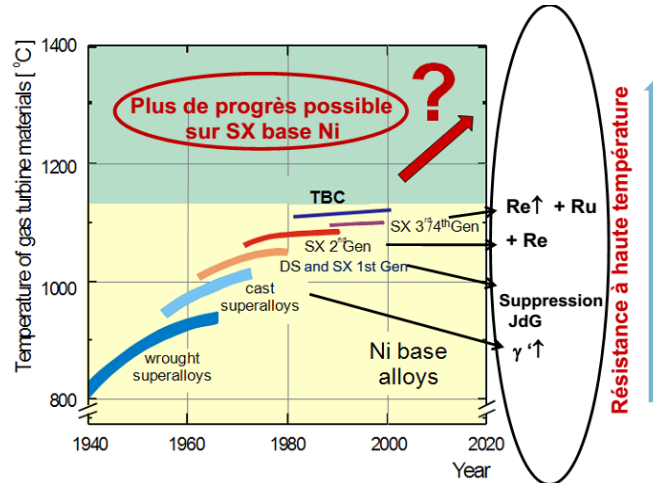


Figure I.2 : Enjeux Matériaux futurs pour très hautes températures. [3]

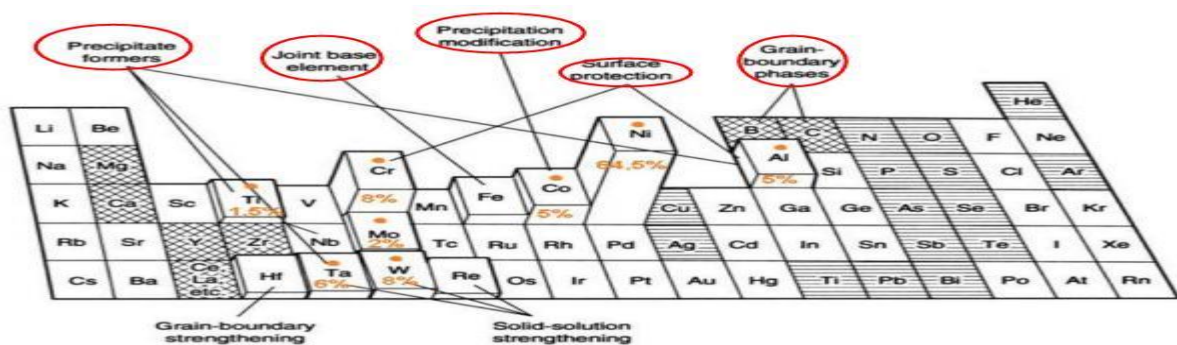


Figure I.3: Tableau des principaux éléments périodique des éléments d'alliage de base sur le groupe VIII B. [3]

Les superalliages à base de nickel, qui font l'objet de notre étude, présentent l'un des meilleurs compromis entre bonne résistance à l'oxydation et bonnes propriétés mécaniques à températures élevées (Figure I.4).[4]

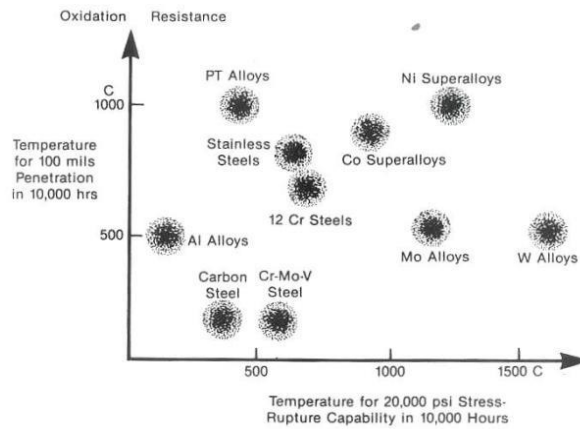


Figure I.4 : Résistances mécanique et à l'oxydation de différents alliages.[4]

Les alliages à base de nickel – phase austénitique γ -Ni (CFC) - sont durcis par des précipités cohérents intermétalliques de type : γ' - Ni_3X ($\text{X} = \text{Al}, \text{Ti}, \text{Ta}$) et par des carbures répartis dans la matrice γ/γ' en volume et aux joints de grains. Le pourcentage des phases γ' améliore la tenue mécanique, ce qui se traduit par une augmentation (jusqu'à 55%) de cette phase dans les alliages les plus avancés, voire de 70% pour les alliages monocristallins.[1]

I.2.2. Microstructure et rôle des éléments d'alliage

Les superalliages à base de nickel ont une matrice austénitique et des précipités de phase Ni_3Al . La solution solide (γ) peut être renforcée par l'ajout d'éléments tels que le molybdène, le tungstène, le rhénium, le chrome et le cobalt, le molybdène, le tungstène et le rhénium augmentant la dureté et le chrome protégeant contre l'oxydation et la corrosion.[2]

Le cobalt renforce la phase gamma et réduit la solubilité de l'aluminium, ce qui augmente la température de solvabilité de la phase gamma Ni_3Al . La formation d'alumine est essentielle. Le titane, le tantale et le niobium durcissent et stabilisent la phase gamma-prime, formant des carbures MC. Le chrome et les éléments lourds peuvent former des phases TCP fragiles.[2]

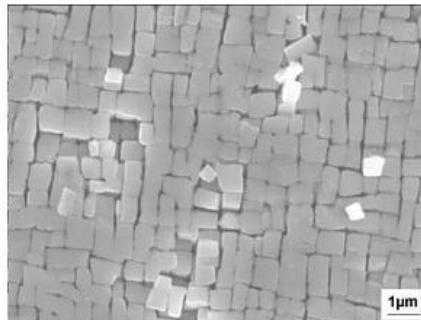


Figure I.5 : Microstructure typique d'un superalliage monocristallin (CMSX-4). Image MEB, révélant les cubes γ' - Ni_3Al après attaque électrochimique de la matrice γ' (Electrolyte : acide perchlorique 20%, éthanol 70%, éthylène glycol monobutyl éther 10%, 3A, 2V).[2]

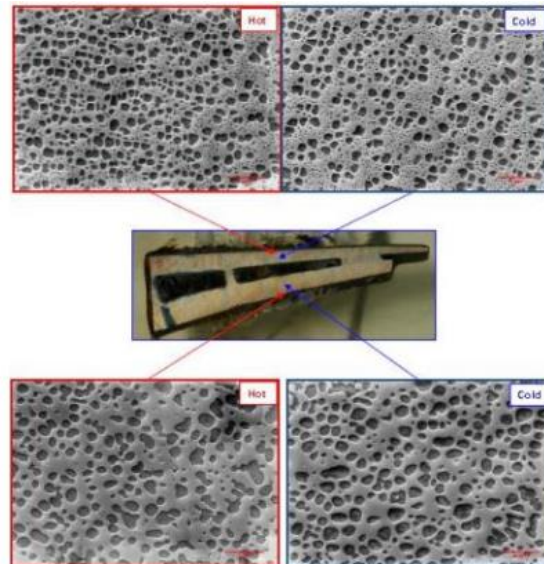


Figure I.6 : Microstructure de superalliage selon la température d'utilisation. [5]

I.2.3. Les superalliages à base de nickel monocristallins

Le processus de solidification directionnelle a permis de créer des lames à grain colonnaire et monocristallin, améliorant la ductilité à haute température et permettant un traitement de remise en solution. Les superalliages monocristallins présentent une bonne résistance au fluage et à la fatigue thermique en raison de leur structure et de leur orientation. Les superalliages monocristallins ont d'excellentes propriétés mécaniques et une stabilité de surface à haute température, ce qui les rend idéaux pour les turbines à gaz. Pour accroître l'efficacité, les températures de fonctionnement doivent être augmentées, ce qui nécessite d'améliorer les propriétés mécaniques des superalliages, ce qui est possible grâce à l'optimisation de la composition et à la solidification dirigée. [6]

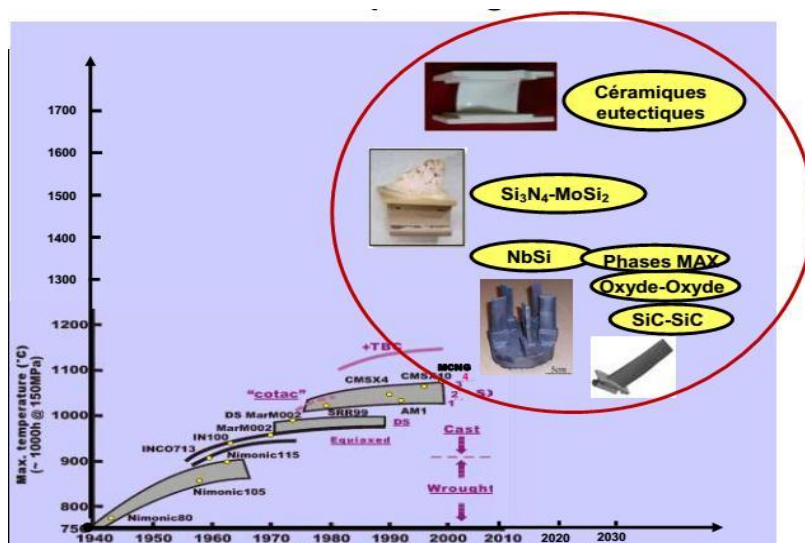


Figure I.7 : Matériaux au-delà des superalliages monocristallins. [6]

I.2.3.1. Évolution des superalliages

Après la Seconde Guerre mondiale, l'industrie du transport aérien s'est développée, introduisant la concurrence et stimulant l'innovation dans le domaine des matériaux, en particulier pour les applications à haute température, ce qui a conduit au développement des superalliages, classés en trois catégories : nickel-fer, cobalt et à base de nickel. [2]

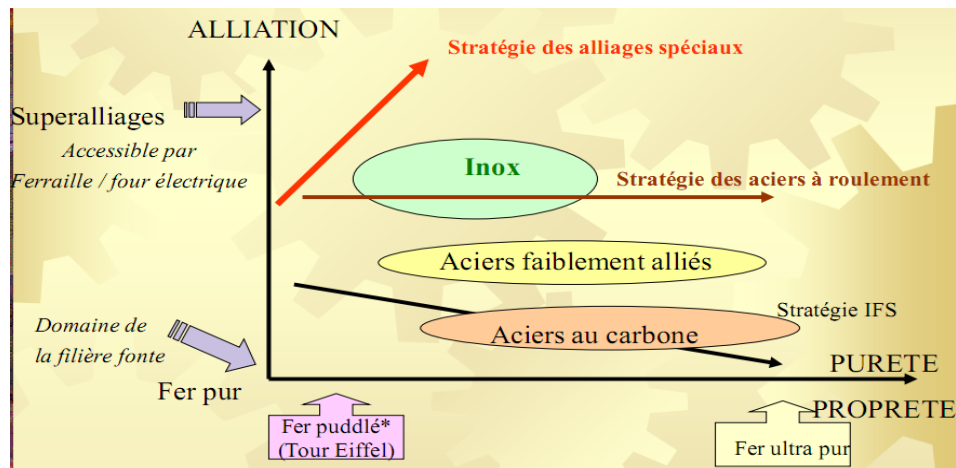


Figure I.8 : Le Positionnement des superalliages. [1]

Le Nimonic 80 est un superalliage à base de nickel avec 20 % de chrome pour la résistance à l'oxydation. Il utilise de petites quantités d'aluminium et de titane pour obtenir des propriétés à haute température grâce au durcissement par précipitation. Les superalliages ont évolué pour combiner davantage d'éléments, avec de nouvelles méthodes de formage apparues dans les années 1960 et 1970. Les superalliages monocristallins, introduits dans les années 1970, réduisent le fluage et les imperfections. Ils ont trois générations, avec des éléments supplémentaires comme le rhénium et le ruthénium qui améliorent les propriétés de fluage. [5]

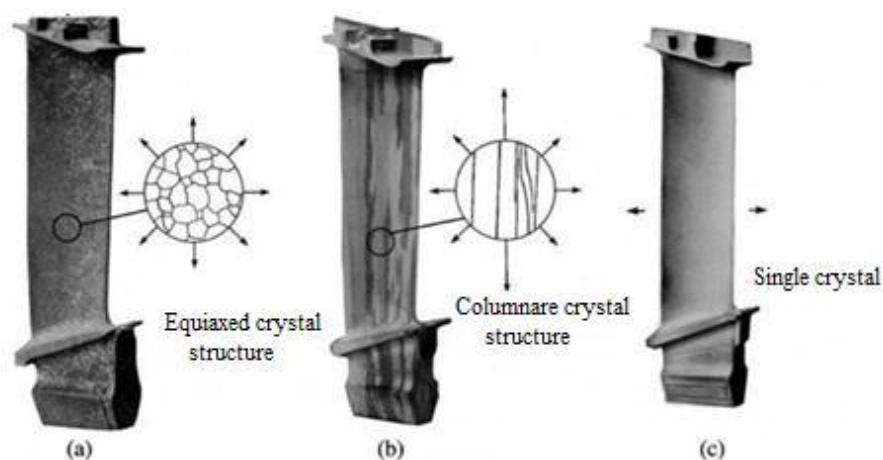


Figure I.9 : Évolution des microstructures des aubes de turbine, équiaxe (a), colonnaire (b) et monocristalline (c). [5]

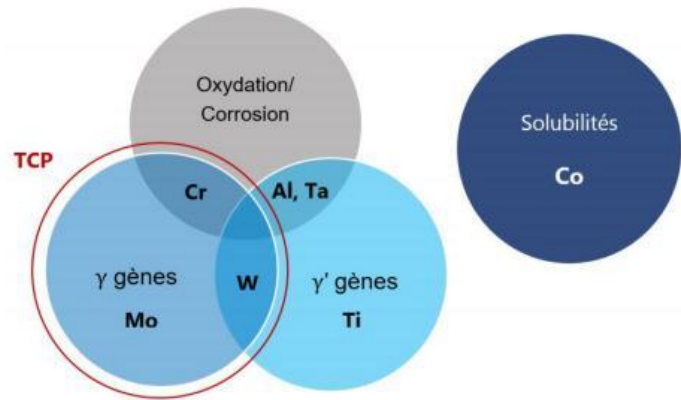


Figure I.10 : Schéma des effets des différents éléments d'alliage des superalliages monocristallins base Ni de 1ère génération. [2]

I.2.3.2. Les différents types des superalliages à base de nickel

Les superalliages réfractaires se répartissent en 3 groupes [7] :

- Les superalliages à base de Cobalt ;
- Les superalliages à base de Fe – Ni;
- Les superalliages à base de Nickel.

a. Les Superalliages à base de cobalt

Les superalliages au cobalt durcissent grâce aux carbures et aux phases intermétalliques, mais moins efficacement que les superalliages au nickel. Au-dessus de 1100°C, ils sont plus résistants que les superalliages de nickel. Pour résister à la corrosion à haute température, ils nécessitent une teneur en chrome plus élevée (25-30%) que les alliages à base de nickel. (Figure I.11).[8]

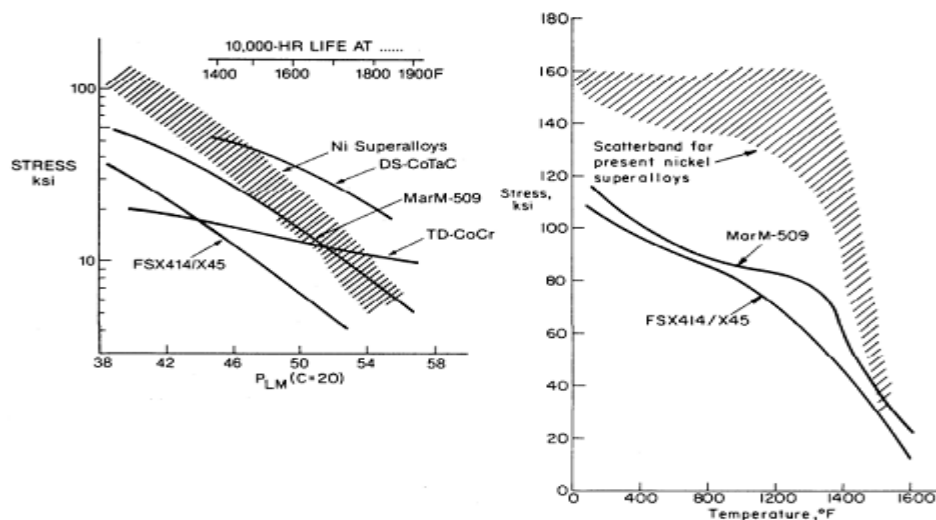


Figure I.11 : Comparaison schématiquement de propriétés mécaniques de superalliages base cobalt et superalliage base Nickel.[7]

<i>Elément</i>	<i>Fonction</i>
Chrome	Résistance à l'oxydation Formation de carbures $M_{23}C_6$ et M_7C_3
Molybdène Tungstène	Durcissement de la solution solide Formation de carbures M_6C et MC
Titane	Formation de carbure TiC Formation de la phase γ' [$Ni_3 (AlTi)$]
Aluminium	Formation de la phase γ' [$Ni_3 (AlTi)$] Résistance à l'oxydation
Cobalt	Durcissement de la solution solide Accroît la température de dissolution de la phase γ'
Bore Zirconium	Augmentation de la ductilité et de la résistance au fluage
Niobium	Formation de Nb et de carbure NbC
Carbone	Formation de carbures MC , M_6C , $M_{23}C_6$, M_7C_3 , Efficace surtout aux températures élevées

Tableau I.1 : Fonction des éléments sur les caractéristiques à chaud des superalliages.[1]

b. Les superalliages à base de Fe – Ni

Incoloy est une marque d'alliages métalliques résistants à la corrosion et aux températures élevées, connus pour leur excellente résistance à la corrosion aqueuse, à l'oxydation, au fluage et à la rupture, ainsi que pour leur facilité de fabrication. [9]

c. Les superalliages à base de Nickel

Les superalliages de nickel, connus sous le nom d'Inconel, sont disponibles en différentes qualités, y compris des alliages super réfractaires pour les températures élevées. Ils peuvent contenir jusqu'à 10 composants et offrent une résistance au fluage et à l'oxydation. Bien que peu de nouveaux alliages monocristallins aient été développés, les alliages établis sont préférés pour leurs propriétés bien caractérisées. [4]

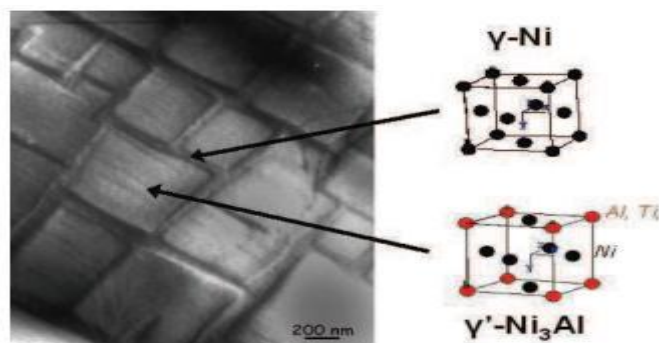


Figure I.12 : Microstructure typique d'un superalliage base nickel γ/γ' et phases cristallines associées.[4]

I.2.4. Composition chimique des superalliages

La composition des superalliages est le résultat d'un compromis entre plusieurs objectifs qui sont :

I.2.4.1. Solidification équiaxe

Lorsque le métal se refroidit lentement sans intervention, la solidification se produit naturellement, donnant une structure avec des compositions variées, conduisant à des propriétés mécaniques limitées et à une durée de vie imprévisible.

Pour les aubages de turbine, qui sont le domaine privilégié d'application de la technique de fonderie mentionnée précédemment, les joints de grains dans les pièces moulées restent des zones de fragilité et des sites préférentiels pour l'apparition et la propagation des fissures, notamment en raison de la fatigue thermique. Ainsi sont apparus au plan industriel respectivement deux autres types de solidification, destinés à minimiser les effets néfastes des joints de grains dans les pièces moulées :

- Dans les années 70, une technique dite de solidification dirigée colonnaire dans laquelle, on oriente tous les joints de grains dans une même direction ;
- Dans les années 80, une technique dite de solidification dirigée monocristalline, dérivée de la précédente et dans laquelle, on supprime totalement les joints de grains.

Ces techniques développées initialement en laboratoire ont trouvé maintenant leur plein essor industriel dans les plus grandes entreprises de fonderie actives sur le marché international.

La figure I.14 : montre trois aubes de turbines : le premier est à texture de grains équiaxes conventionnelle, la seconde est à texture colonnaire, la troisième ne comprend qu'un seul grain.[8]

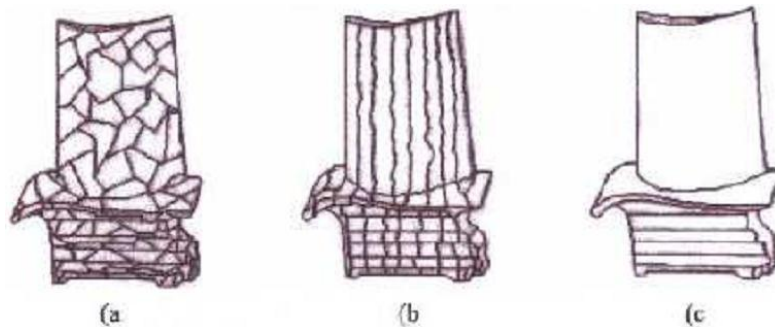


Figure I.15: Textures de grains de coulée d'ailettes de turbine moulées, (a) fonderie conventionnelle (grains équiaxes) ; (b) solidification dirigée (grains colonnaires) ; (c) solidification dirigée + sélection de grain (mono grain).[8]

I.2.4.2. Modes de renforcement

Les superalliages à base de nickel peuvent être renforcés par durcissement par précipitation, impliquant la précipitation de la phase gamma, ou par l'ajout d'autres phases telles que les carbures ou les borures, qui peuvent améliorer le renforcement à basse température mais ont un impact sur le taux de flux et la résistance à la rupture. [8]

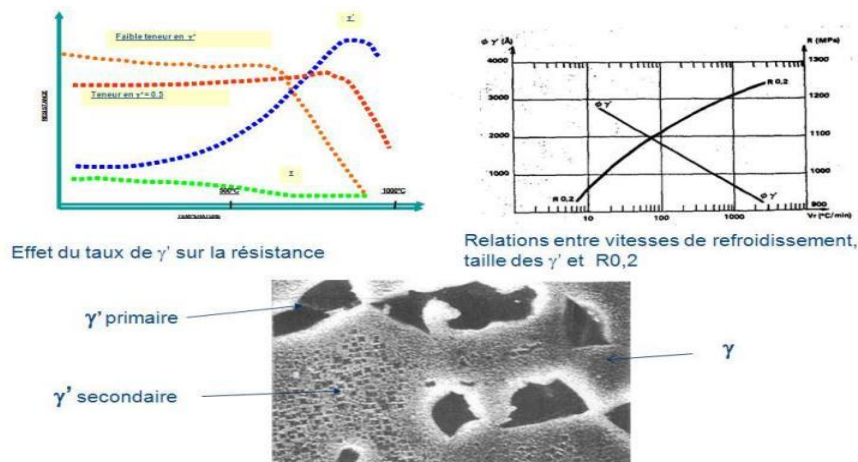


Figure I.16 : Particularité du durcissement par γ' . [10]

I.3. Les superalliages à base de nickel pour aubes de turbine à gaz

Les superalliages monocristallins ont été développés dans les années 1970, éliminant les joints de grains et améliorant la ductilité à haute température. Ils présentent une excellente résistance au fluage et à la fatigue thermique en raison de leur microstructure et de leur orientation. Les superalliages à base de nickel sont couramment utilisés dans les applications à haute température, mais la réduction des concentrations de chrome a entraîné une diminution de la résistance à la corrosion. Le développement de revêtements alumino-formateurs permet d'utiliser les superalliages à des températures supérieures à 950°C sans problèmes de corrosion. L'optimisation de la composition et les techniques de solidification dirigée ont permis d'améliorer les propriétés mécaniques.

I.3.1. Structure d'un superalliage à base de nickel

Les superalliages à base de nickel contiennent des précipités cohérents de la phase ordonnée γ' dans la matrice CFC γ' .

Donc, un superalliage est un solide biphasique :

- Une matrice austénitique : système CFC désordonné ;
- Des précipités formant un système CFC ordonné Ni₃Al.

Ces deux phases sont mixées sans qu'il y ait rupture de la structure.

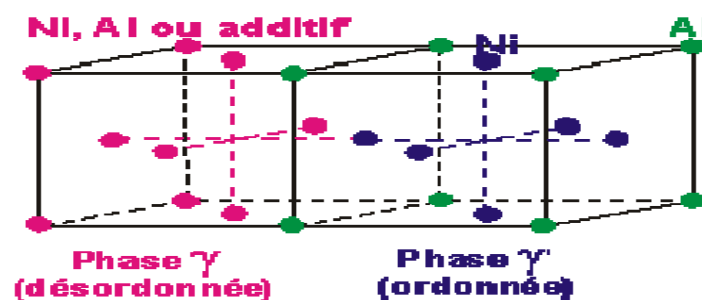


Figure I.17 : Ces deux phases sont mixées sans qu'il y ait rupture de la structure. [12]

Matrice Austénitique (CFC) \rightarrow (γ') Ni-Cr-Al :

- Précipités durcissant cohérents \rightarrow (γ') Ni₃Al,Ti ou γ'' Ni₃Nb ;
- Carbures, borures ... ;
- Phases TCP (Topological Compact Phases): σ, μ ...

I.3.1.1. Les superalliages monocristallins base de nickel

Le principal moyen d'obtenir ces propriétés est de durcir la structure (en précipitant des phases intermétalliques de type Ni₃M {M = Al, Ti, Nb}), ce qui permet de renforcer la matrice en ajoutant des éléments durcissants en solution solide (comme le molybdène ou le tungstène par exemple). De plus, il est essentiel que ces alliages contiennent du chrome afin de renforcer leur résistance à l'oxydation. Cela se fait en formant une couche d'oxyde protectrice de Cr₂O₃, ce qui permet d'obtenir une résistance optimale à l'oxydation avec une concentration de 15 à 30 % de chrome. [13]

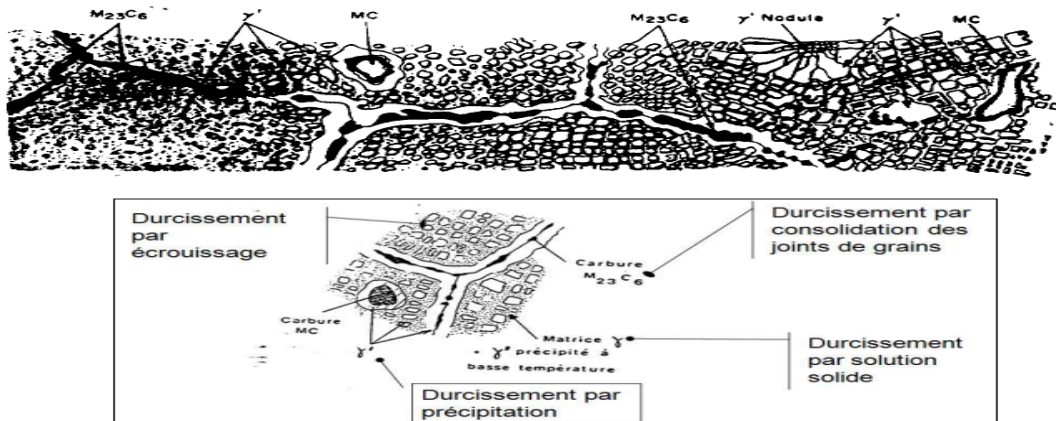


Figure I.18 : Microstructures dans les superalliages base Ni.[13]

I.3.1.2. Eléments d'alliages

Les superalliages à base de nickel monocristallins sont constitués de divers éléments qui offrent chacun des avantages en termes de propriétés. Le nickel est l'élément de base en plus grande quantité. Cela assure l'obtention et la préservation d'une structure cubique face centrée (CFC) (Figure I.19b) jusqu'à la température de transformation. On souhaite avoir cette structure austénitique en raison de son faible coefficient de dilatation. Les caractéristiques mécaniques des superalliages monocristallins sont grandement influencées par le durcissement causé par la présence des précipités γ' , qui présentent une structure cristalline CFC organisée L12 similaire à celle du Ni₃Al (Figure I.19c). La formation de cette phase est due aux éléments appelés γ' gènes tels que Al (Figure I.19a), Ti et Ta. L'aluminium offre une stabilité cristalline exceptionnelle, tandis que le titane et le tantale contribuent à sa stabilité thermique. Selon leur forme, leur

distribution et leur proportion volumique, ces précipités vont être utilisés comme obstacles aux mouvements des dislocations, ce qui améliore la résistance mécanique. [12]

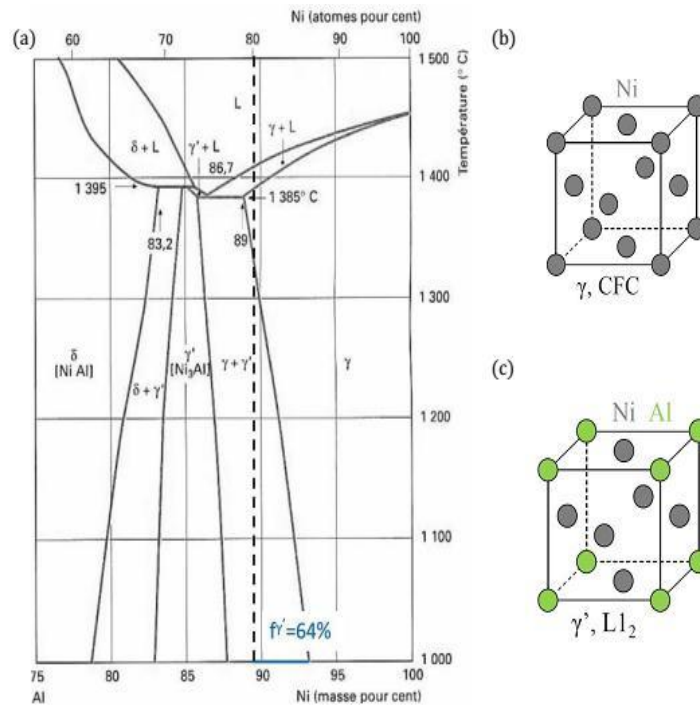


Figure 1.19 : Diagramme Ni-Al (a) et structures cristallines de la phase γ (b) et γ' (c).[12]

1.3.1.3. La matrice austénitique γ

Contient une forte concentration d'éléments en solution solide (Co, Cr, Mo, W) ainsi que d'autres éléments tels que le fer, le titane et aluminium. Le cobalt réduit la solubilité de l'aluminium et du titane dans la matrice et aide indirectement à maintenir de hautes caractéristiques mécaniques à haute température. Le durcissement de la solution solide par le tungstène et le molybdène est dû à leur faible diffusivité, les autres éléments ayant d'avantage tendance à diffuser aux températures supérieures à $0,7 * T_f$. [1]

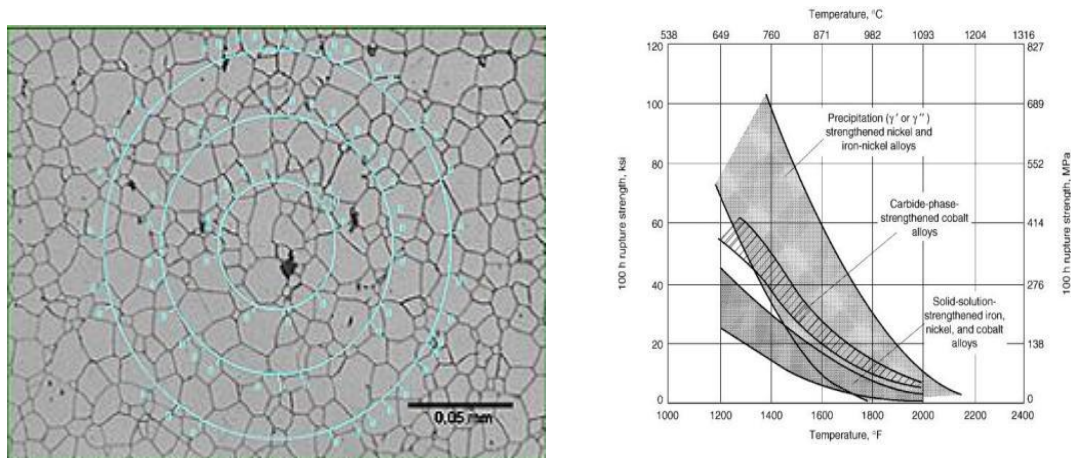


Figure 1.20 : Image MET taille de grain austénitique γ & La résistance à la rupture des superalliages austénitiques. [5]

I.3.1.4. Phase γ'

Principale responsable du durcissement structural des superalliages de nickel, est constituée de précipités intermétalliques de type A3B et de structure CFC, en cohérence avec la matrice austénitique. D'une bonne ductilité, cette phase a tendance à coalescer ("coarsening") aux températures supérieures à $0,7 * T_f$, entraînant une diminution de la résistance au fluage. On retarde le grossissement des précipités γ' et leur transformation en une phase indésirable grâce à une teneur suffisante en niobium et en tantale.[1]

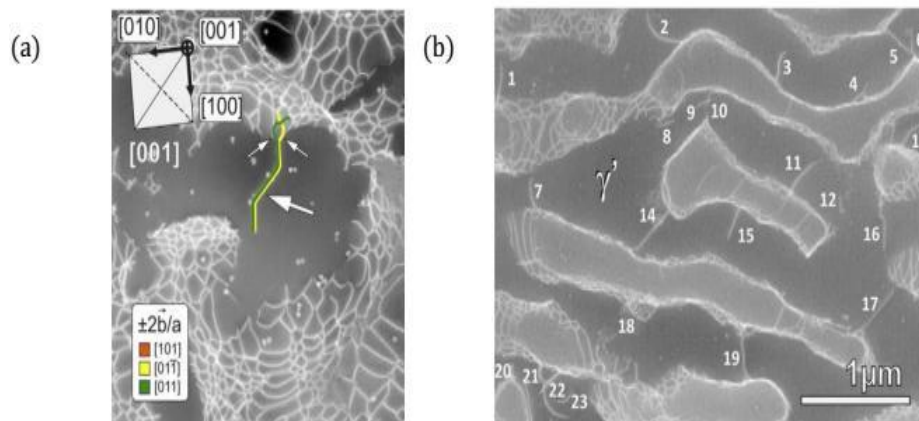


Figure I.21: Clichés STEM de super dislocations dans γ' (a) divisée en deux super partielles et (b) numérotées. [2]

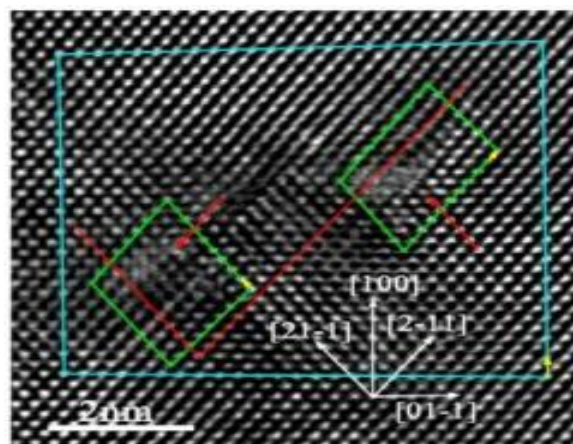


Figure I.22 : Cliché MET Haute Résolution des super partielles qui composent une dislocation $[100]$ dans la direction $[01-1]$. [2]

I.3.1.5. Importance de la phase γ'

Les hautes performances mécaniques des superalliages monocristallins à de base nickel sont étroitement liées à la précipitation de la phase intermétallique γ' .

Effectivement, les dislocations peuvent être utilisées pour cisailer les précipités ou les contourner afin de se déplacer et de déformer le matériau de manière plastique. Le mécanisme qui présente le meilleur rendement énergétique est celui qui est en marche, ce qui est fortement influencé par l'interface, la taille, la distance entre les précipitations et la température. [12]

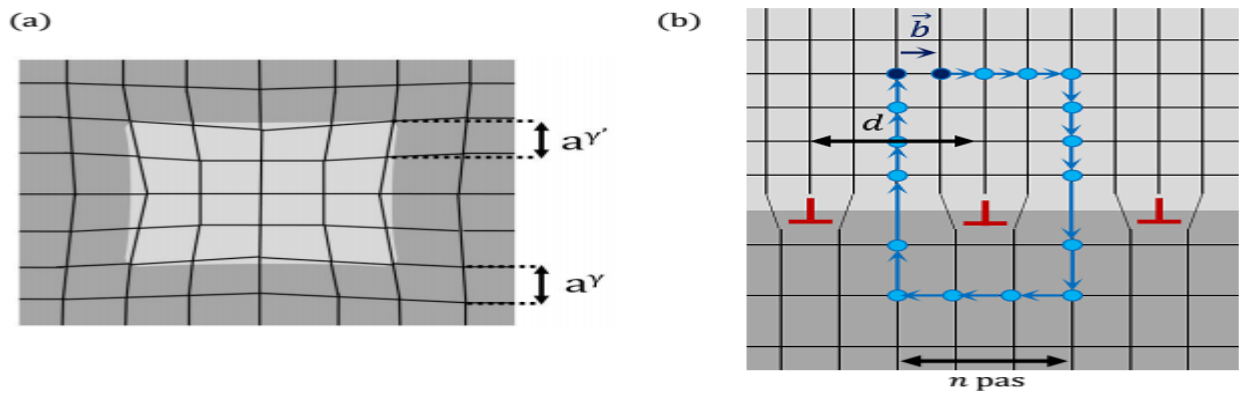


Figure I.23 : (a) Représentation d'un précipité cohérent γ' dans une matrice γ d'un superalliage à l'état initial et (b) avec une microstructure mise en radeaux contenant des dislocations aux interfaces. ble vecteur de Burgers et d la distance moyenne entre deux dislocations. n le nombre de pas du circuit de Burgers.[2]

I.3.1.6. Carbure

En quantité limitée (0,05 à 0,15 % C), ils ont un effet bénéfique sur La résistance à la rupture à haute température, mais leur influence est moindre que celle de la phase γ' .[11]

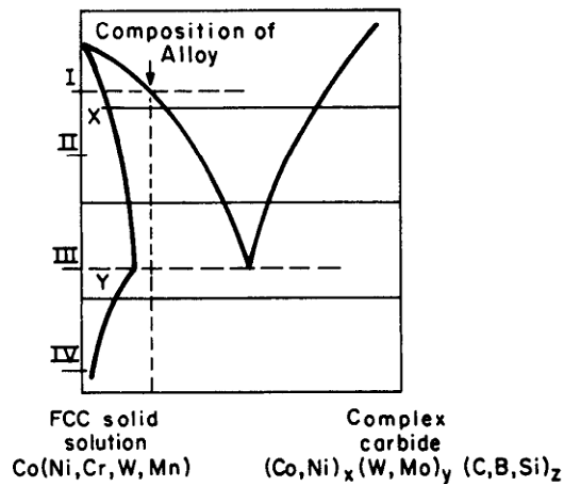


Figure I.24 : Représentation schématique de formation dans les superalliages base cobalt. [11]

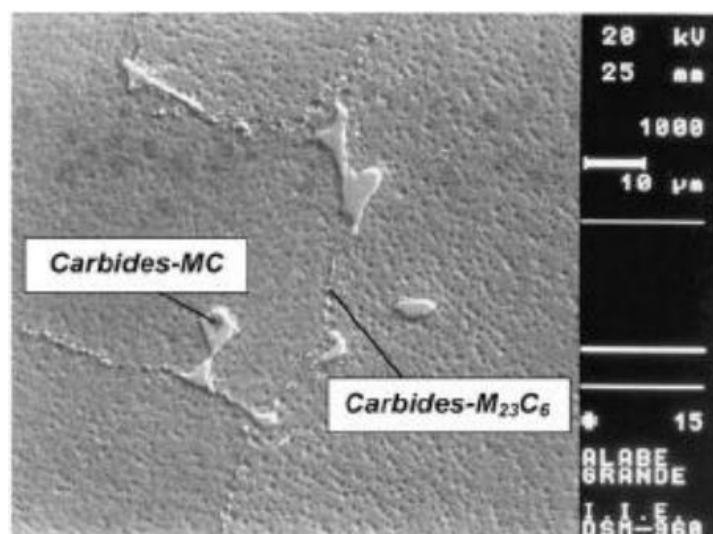


Figure I.25 : Particules de carbure et limites de grains de la zone de lame de l'ailette. [14]

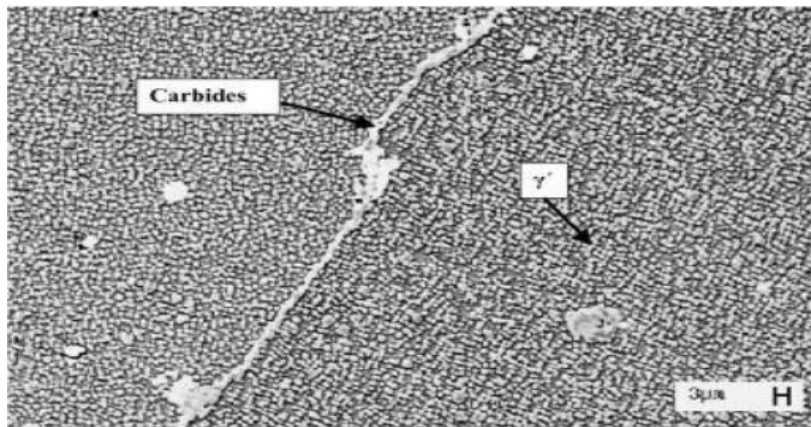


Figure I.26 : Bande continue des limites des grains et carbures CO. [14]

I.3.1.7. Borures

Le bore, présent dans des quantités allant de 50 à 500 ppm (1 partie pour million (10⁻⁶)), joue un rôle crucial dans les superalliages. Le mécanisme de l'action des borures n'est pas encore pleinement saisi, mais il améliore la résistance au fluage et la ductilité des alliages. [15]

I.4. Caractéristiques général des superalliages

On utilise deux catégories de superalliages : les superalliages "base nickel" et "base cobalt" (le mot "base" désigne le métal le plus répandu). En commençant par le nickel pur, un métal qui s'oxyde et s'échappe dès 600°C à 700°C, l'ajout de 20 % de chrome donne naissance à un alliage qui présente une résistance à l'oxydation solide jusqu'à 1000°C, voire plus.

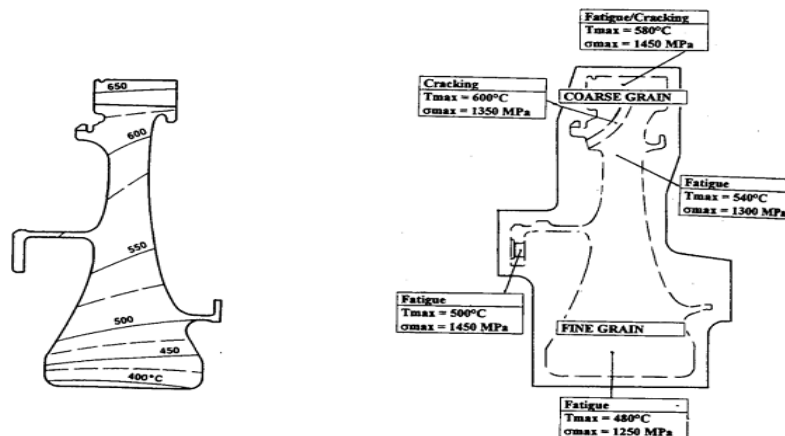


Figure I.27 : Sollicitations thermiques et mécaniques dans un disque de turbine.[1]

Les ajouts d'aluminium améliorent les propriétés mécaniques au-dessus de 1000°C en formant des composés de type Ni₃Al dans une solution solide de nickel-chrome-aluminium. Ce composé a une structure cristalline similaire mais des paramètres plus petits. En ajustant la composition et en ajoutant des éléments tels que le titane, le molybdène et le fer, diverses applications sont possibles au-delà de l'utilisation dans les moteurs à réaction. [15]

I.4.1. Caractéristiques mécaniques

Pour résister à la déformation, les matériaux doivent présenter une élasticité élevée ou une résistance au fluage. Les propriétés peuvent être facilement mesurées, mais la résistance à la fatigue mécanique ou thermique est complexe, impliquant des vibrations, des contraintes cycliques et la corrosion. Pour prévoir la défaillance finale, il faut comprendre la fatigue soudaine, la vitesse de propagation et la ténacité. La sélection des matériaux et les conditions de traitement doivent tenir compte des propriétés associées, telles que les compromis entre la limite d'élasticité et la résistance ou la taille des grains et la résistance à la fatigue. [11]

I.4.2. Protection contre la corrosion

Les phénomènes d'oxydation et de corrosion sont dus à la présence d'oxygène et de polluants (Na, Ca, SO₂, SO₃) pouvant provenir des carburants ou présents dans l'air, en particulier, en atmosphère marine (NaCl), et se présentent sous deux formes :

- Au-delà de 750 à 800°C, l'oxydation/corrosion type I sous forme de couche d'oxydes. Un revêtement à base d'alumine, Al₂O₃, assure une protection efficace ;
- Entre 550 et 750°C, la corrosion type II, où les dépôts de sels peuvent former avec le nickel ou le cobalt de l'alliage des composés eutectiques à bas point de fusion empêchant la création d'une couche d'oxydes protectrice Al₂O₃/Cr₂O₃ et conduisant à une corrosion en cavernes. Le dépôt préalable de couches protectrices à base d'oxyde chrome Cr₂O₃ permet d'atténuer ce phénomène.

L'amélioration de la tenue des alliages peut s'obtenir soit par augmentation de la teneur superficielle en Al et/ou Cr (par cémentation solide ou par diffusion en phase vapeur), soit par des revêtements de matériaux céramiques (jouant un rôle de barrière thermique et à base de zircone) ou d'alliages spéciaux réalisés par projection plasma basse pression, les plus usités étant actuellement MCrAlY (M étant Ni ou Co, l'addition d'yttrium augmentant l'adhérence de la couche d'oxydes).[1]

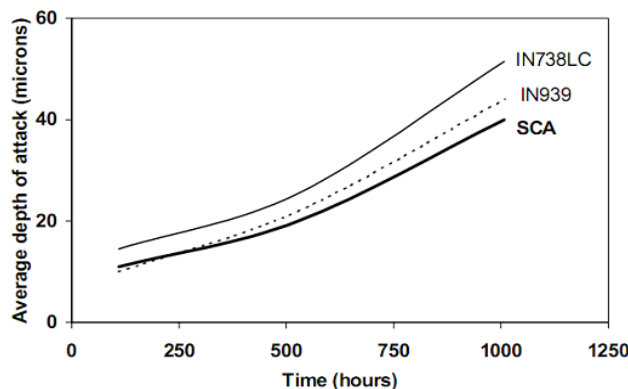


Figure I.28 : Essais de corrosion dans la cendre à 800°C (ALSTOM).[16]

I.5. Les procédés de fabrication des pièces en superalliages

La fabrication de pièces en superalliages nécessite des techniques et des procédés spécifiques en raison de leurs propriétés uniques et de leurs exigences de performance élevées. Parmi les procédés les plus courants, on trouve :

I.5.1. Moulages des superalliages

Les superalliages sont des alliages métalliques qui présentent des propriétés exceptionnelles à haute température, telles que [8]:

- Résistance élevée
- Résistance à la corrosion
- Résistance à l'oxydation
- Ductilité
- Tenacité

Ces propriétés font des superalliages des matériaux de choix pour des applications critiques dans des domaines tels que :

- Aéronautique (moteurs d'avions, turbines à gaz)
- Espace (fusées, navettes spatiales)
- Production d'énergie (turbines à gaz, turbines à vapeur)
- Industrie chimique (réacteurs chimiques, échangeurs de chaleur)
- Industrie pétrolière et gazière (forages, pompage)

Le moulage est une technique de fabrication couramment utilisée pour produire des pièces en superalliages. Parmi les procédés de moulage les plus utilisés pour les superalliages, on trouve:

- ❖ **Moulage à la cire perdue:** Ce procédé permet de réaliser des pièces complexes avec une grande précision dimensionnelle. Il est particulièrement adapté aux superalliages à base de nickel, qui sont difficiles à usiner.



Figure I.29 : Moulage à la cire perdue des superalliages[5].

- ❖ **Moulage en coquille** : Ce procédé est plus simple et moins coûteux que le moulage à la cire perdue, mais il produit des pièces moins précises. Il est souvent utilisé pour les superalliages à base de fer, qui sont plus faciles à usiner.
- ❖ **Moulage par centrifugation** : Ce procédé est utilisé pour produire des pièces tubulaires, telles que les aubes de turbine.

Le choix du procédé de moulage dépend de la géométrie de la pièce, des propriétés souhaitées du matériau et des contraintes de coût[11].

I.5.1.1. Facteurs à prendre en compte pour le moulage des superalliages

La fabrication de moulages en superalliages présente plusieurs défis, notamment :

- ❖ **Haute température de fusion** : Les superalliages ont des points de fusion élevés, ce qui nécessite des fours et des outils spéciaux.
- ❖ **Réactivité chimique** : Les superalliages peuvent réagir avec les matériaux du moule, ce qui peut entraîner des défauts de surface.
- ❖ **Formation de fissures** : Les superalliages sont sensibles à la formation de fissures pendant le refroidissement, ce qui nécessite des techniques de solidification contrôlées.

Pour surmonter ces défis, les fondeurs de superalliages utilisent une variété de techniques, telles que [6]:

- ❖ **Revêtements de moule** : Les revêtements de moule peuvent protéger le moule de la réaction avec l'alliage fondu.
- ❖ **Refroidissement lent** : Un refroidissement lent peut aider à réduire la formation de fissures.
- ❖ **Traitement thermique** : Un traitement thermique après moulage peut améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage.

Le moulage des superalliages est un processus complexe qui exige une expertise et un savoir-faire considérables. Cependant, les pièces en superalliages moulées peuvent offrir des performances exceptionnelles dans des environnements difficiles, ce qui fait d'elles des matériaux essentiels pour une large gamme d'applications industrielles[10].

I.5.2. Le forgeage des superalliages

Le forgeage est un procédé de fabrication crucial pour les superalliages, permettant de les mettre en forme et d'optimiser leurs propriétés mécaniques pour des applications exigeantes.

I.5.2.1. Processus

- ❖ **Préparation du matériau:** Les superalliages sont généralement obtenus sous forme de lingots ou de billettes par fusion. Avant le forgeage, la pièce est chauffée à une température adéquate, généralement entre 1000°C et 1200°C, pour la rendre malléable[11].
- ❖ **Déformation plastique:** La pièce chauffée est ensuite soumise à une force de compression intense, appliquée par des presses hydrauliques ou des marteaux puissants. Cette déformation plastique modifie la microstructure du matériau, en affinant les grains et en alignant les fibres, ce qui améliore considérablement sa résistance mécanique et sa ductilité.
- ❖ **Traitement thermique:** Après le forgeage, la pièce subit un traitement thermique spécifique, comprenant généralement un recuit de stabilisation et un vieillissement. Ces étapes visent à stabiliser la microstructure et à optimiser les propriétés mécaniques du superalliage, en favorisant la précipitation de phases durcissantes intermétalliques[1].

I.5.2.2. Avantages du forgeage des superalliages

- ❖ **Amélioration des propriétés mécaniques:** Le forgeage renforce considérablement la résistance à la traction, à la compression, au fluage et à la fatigue des superalliages. Cela les rend idéaux pour des applications critiques dans des environnements à haute température et sous des contraintes mécaniques élevées.
- ❖ **Affinement des grains:** Le processus de déformation plastique pendant le forgeage affine la taille des grains du matériau, ce qui améliore sa ductilité et sa ténacité. Cela permet aux superalliages forgés de mieux résister aux chocs et aux déformations sans se fissurer.
- ❖ **Homogénéisation de la microstructure:** Le forgeage favorise une distribution homogène des éléments d'alliage dans la matrice du matériau, ce qui garantit des propriétés mécaniques uniformes dans toute la pièce.

I.5.2.3. Applications des superalliages forgés

- ❖ **Aéronautique:** Les superalliages forgés sont essentiels pour la fabrication de composants critiques des moteurs d'avion, tels que les aubes de turbine, les disques et les chambres de combustion. Leur résistance exceptionnelle à la chaleur et aux contraintes mécaniques permet aux moteurs de fonctionner à des températures et à des vitesses élevées[12].
- ❖ **Production d'énergie:** Les superalliages forgés sont également utilisés dans les turbines à gaz des centrales électriques, où ils permettent d'améliorer l'efficacité et la durabilité des installations.

- ❖ **Industrie pétrolière et gazière:** Dans l'industrie pétrolière et gazière, les superalliages forgés sont utilisés pour fabriquer des composants pour des environnements extrêmes, tels que des outils de forage et des pompes à haute pression.

I.5.2.4. Type le forgeage des superalliages

- ❖ **Forgeage à matrice ouverte:** Utilise une presse hydraulique ou mécanique pour déformer le métal en forme de matrice.
- ❖ **Forgeage à matrice fermée:** Le métal est confiné dans une matrice pendant la déformation, ce qui permet d'obtenir une meilleure précision et des propriétés mécaniques accrues.
- ❖ **Extrudage:** Force le métal à travers une matrice pour créer des formes profilées longues et minces.

Le forgeage joue un rôle crucial dans la fabrication des superalliages, en leur conférant des propriétés mécaniques exceptionnelles qui les rendent indispensables pour des applications exigeantes dans des domaines tels que l'aéronautique, la production d'énergie et l'industrie pétrolière et gazière. [10]

I.5.3. Usinage

L'usinage des superalliages est très difficile car, ils ont plusieurs propriétés physiques et mécaniques défavorables à l'usinabilité, qui sont :

- Une faible conductivité thermique.
- Un coefficient de dilatation élevé.
- Une écrouissabilité élevée : la limite élastique passe de 200-300MPa, à l'état hyperecroui, à 1500-2000MPa à l'état fortement écroui [10].

En plus de ces caractéristiques, ils conservent leurs propriétés mécaniques à haute température et contiennent un pourcentage élevé de constituants durs et abrasifs (carbures et phase intermétallique comme la phase γ' , qui produisent des usures intenses des outils.

Pour les procédés d'usinage conventionnels : tournage, fraisage, perçage, alésage ; on utilise des outils en carbures (K10 – K20). Cependant, le développement des moyens d'usinage rend intéressant l'usage d'outils de coupe en céramique. Par ailleurs la faible usinabilité des superalliages rend particulièrement avantageux les procédés d'usinage sans enlèvement de copeaux [10].

- **Tournage:** Permet de créer des pièces cylindriques ou coniques avec une grande précision.
- **Fraisage:** Utilise des fraises rotatives pour créer des formes complexes sur des surfaces planes, inclinées ou courbes.

- **Perçage:** Crée des trous cylindriques de différents diamètres et profondeurs.
- **Rectification:** Permet d'obtenir une finition de surface précise et d'améliorer la précision dimensionnelle.

I.5.4. Fabrication additive

- **Impression 3D par fusion de lit de poudre :** Utilise un laser ou un faisceau d'électrons pour fusionner des couches successives de poudre métallique, créant ainsi des pièces complexes avec une géométrie à peu près libre.
- **Dépôt de métal par laser :** Utilise un laser pour déposer du métal en fusion sur un substrat, permettant de réparer ou de créer des pièces nouvelles.

I.6. Conclusion

Les turbomachines sont des machines rotatives composées d'une ou plusieurs séries d'aubages, fixées alternativement sur le stator et sur le rotor.

Les turbomachines thermiques permettent la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique par l'intermédiaire d'un fluide de travail.

Les ailettes de turbine à gaz sont fabriquées par superalliages comme superalliages à base de nickel.

Le matériau étudié est un superalliage monocristallin base nickel dont sa principale utilisation correspond aux aubes de turbomachines impliquant donc des sollicitations de fluage à haute température. Il est ainsi important de comprendre son comportement mécanique à haute température afin de prévoir sa durée de vie et d'envisager des pistes d'amélioration.

Les superalliages contiennent d'autres éléments (Co, Cr, Mo, W, Fe, Al, Ti, Ta) pour qu'il fonctionne à des températures élevées

Les superalliages à base de nickel contiennent des précipités cohérents de la phase ordonnée γ' CFC, dans la matrice γ CFC.

Chapitre II

**Exigences en résistance et en
fabrication des aubes des
turbines à gaz**

II.1. Introduction

Les produits mécaniques prennent chaque jour une place de plus en plus importante, que ce soit dans le secteur du transport, de l'énergie, de la communication... Ces produits doivent répondre aux exigences des clients tout en ayant un coût de revient le plus faible possible. Pour garantir leur conformité, il faut que chacune des pièces qui le composent assure des fonctions techniques précises. Ces fonctions sont souvent obtenues par la géométrie des pièces du mécanisme.

II.2. Généralité sur les aubes

Les aubes de turbine et dans la plupart des cas ont des géométries complexes et des surfaces de forme libre. L'optimisation du temps pour le développement de la production et le lancement de la production est un facteur décisif pour la compétitivité. La mesure de la géométrie du produit est nécessaire dans presque toutes les étapes de production et dans chaque étape d'itération. Les données mesurées sont comparées avec les géométries nominales (des données de CAO ou de parties de base).

II.2.1. Les aubes

L'aube est la partie d'une turbine en forme de cuillère ou de pale sur la quelle s'exerce l'action du fluide moteur. Une turbine comporte plusieurs aubes réparties régulièrement sur son pourtour.

Comme une aile, une aube est composée d'un bord d'attaque d'une âme et d'un bord de fuite, et son profil est optimisé pour respecter le domaine d'utilisation de l'étage du compresseur auquel elle appartient. [11][8]

II.2.2. Détail des aubes

Ci-dessous deux sortes d'ailettes avec pied de sapin. A droite l'ailette porte un talon. L'ensemble de ces talons forment une couronne. Face à cette couronne est fixé sur l'anneau extérieur ou les demi-carters un joint abradable, ce qui permet d'améliorer l'étanchéité et donc d'augmenter le rendement de la turbine.



Figure II.1 : Aube d'une turbine à gaz [9].

II.2.3. Le profil d'aube

Les profils NACA sont des formes aérodynamiques pour les ailes d'avions développés par le Comité consultatif national pour l'aéronautique (NACA)[9]. La forme des profils NACA est décrite à l'aide d'une série de chiffres qui suit le mot "NACA".

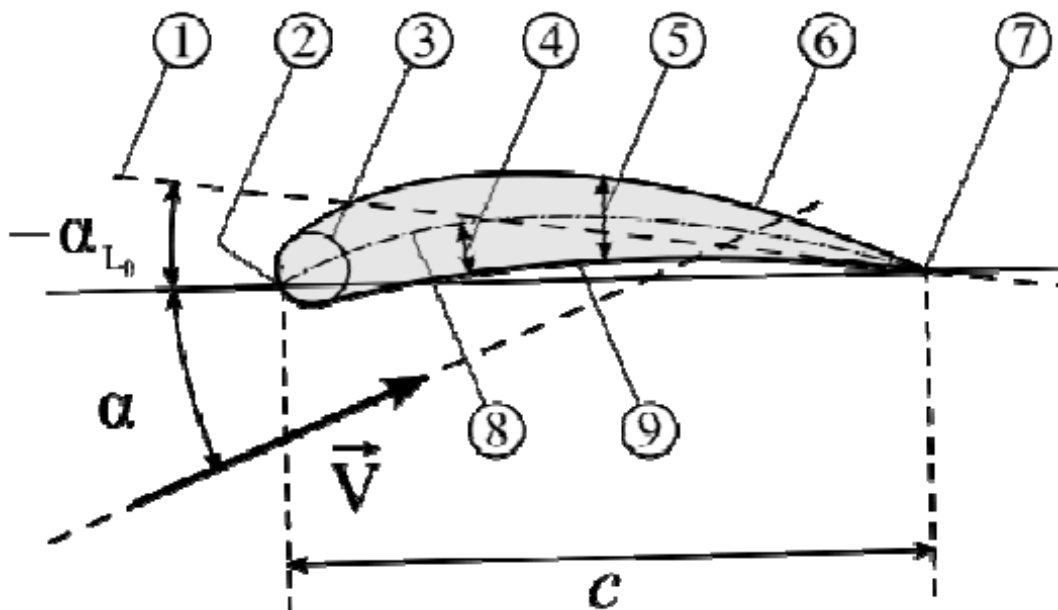


Figure II.2 : Géométrie du profil [12]

1. Ligne de portance nulle;
2. Bord d'attaque ;
3. Cylindre du bord d'attaque;
4. Cambrure;
5. Epaisseur maximale;
6. Extrados;
7. Bord de fuite;
8. Ligne moyenne de cambrure;
9. Intrados.

Les paramètres dans le code numérique peuvent être saisis dans les équations pour générer précisément la section de l'aile et de calculer ses propriétés. Toutes les dimensions en % sont entendues en % de longueur de corde, la droite reliant bord d'attaque et bord de fuite, par rapport au bord d'attaque, sauf lorsque précisé. [13]

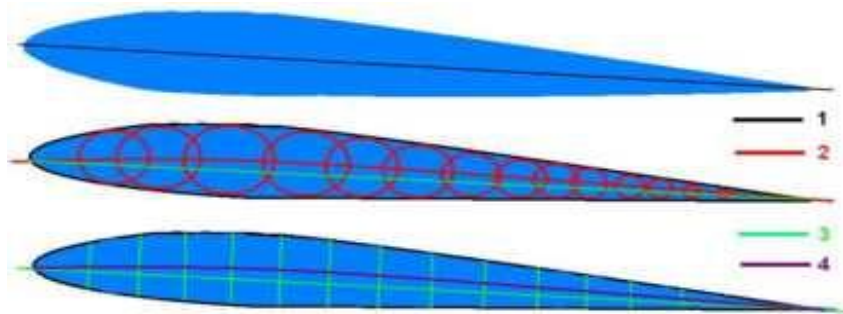


Figure. II.3 : Lignes du profil - 1: Corde, 2: Cambrure, 3: Longueur, 4: Ligne médiane [13]

II.3. La fabrication des ailettes

La compétitivité de l'usinage d'ailette de turbines à gaz et à vapeur est un défi car ces pièces regroupent la plupart des caractéristiques les plus difficiles à usiner :

- L'usinabilité des matières dans lesquelles sont faites les pièces est variable (certaines matières nécessitent des plaquettes spécifiques),
- Des quantités très importantes de matière doivent être enlevées et de bons états de surface doivent être produits (sans effets négatifs sur les aubes, notamment des contraintes résiduelles),
- La forme des pièces est complexe (certaines aubes demandent une programmation FAO avancée avec les meilleures méthodes),
- Les aubes sont sujettes aux vibrations pendant l'usinage (pièces longues et minces qui demandent des outils avec une coupe légère capables d'absorber les vibrations),
- L'efficacité de la production est importante (production de grands volumes),
- Plusieurs outils sont nécessaires et ils doivent être appliqués correctement (du simple surfacage au profilage avec 4 ou 5 axes). [5]

II.3.1. Fraisage des aubes de turbines

Les aubes des turbines sont fraisées avec une précision de forme de l'ordre du centième de millimètre.

II.3.1.1. Ebauche de brut quelconque 3D

La mise en place de l'aube de turbine est réalisée à partir d'une ébauche librement définie ou modifiée. Dans les parties en contre-dépouilles, la stratégie évite automatiquement les trajets à vide. Les conditions de coupe sont constantes grâce à des profondeurs de coupe régulières et à l'avance indépendante des axes de rotation. Grâce à la fermeture des axes de rotation, il est possible d'utiliser des outils de plus grande taille et d'obtenir un débit massif de copeaux. (Figure II.4)

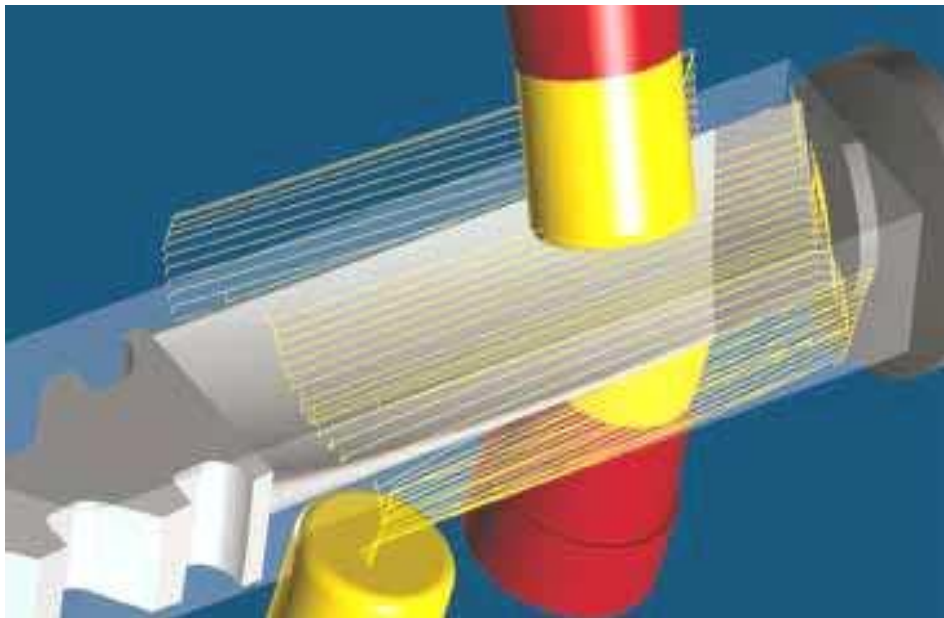


Figure II.4 : Ebauche de brut quelconque [8]

II.3.1.2. Usinage en bout d'aube de turbine 5 axes

Ce cycle permet la finition des surfaces de la pale. Le trajet d'outil hélicoïdal peut être généré comme un usinage simultané 4 axes ou 5 axes. Pour les fraises cylindriques et toriques, l'angle guide est toujours automatiquement corrigé pour ne pas endommager les surfaces et pour que seule la partie coupante de l'outil soit sollicitée.

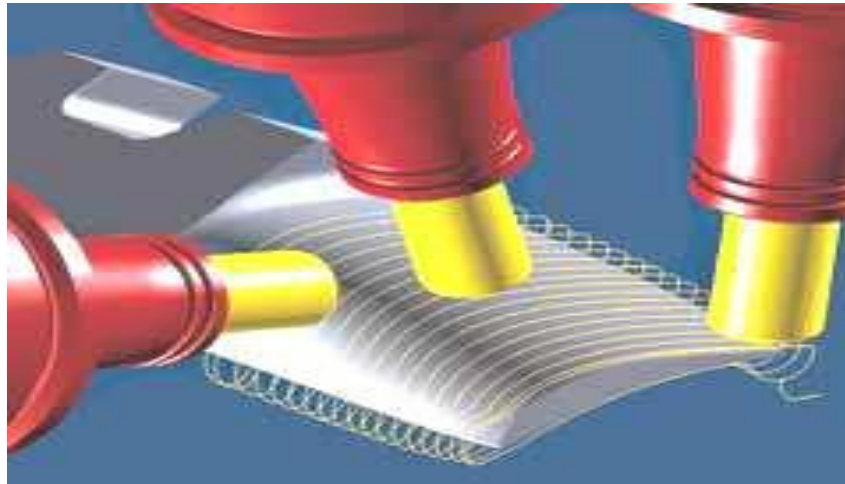


Figure II.5 : Usinage en bout d'aube de turbine 5 axes [8]

II.3.1.3. Usinage en roulant d'aubes de turbine 5 axes

Entre la pale et les surfaces latérales, la partie qui ne peut pas être fraisée avec l'usinage en bout 5 axes, est usinée avec l'usinage des flancs 5 axes. D'excellentes conditions de coupe sont offertes par les angles guides et d'inclinaison latérale. De plus, l'utilisation de l'usinage en roulant pour les flancs 5 axes permet de réaliser rapidement des surfaces latérales légèrement courbées.

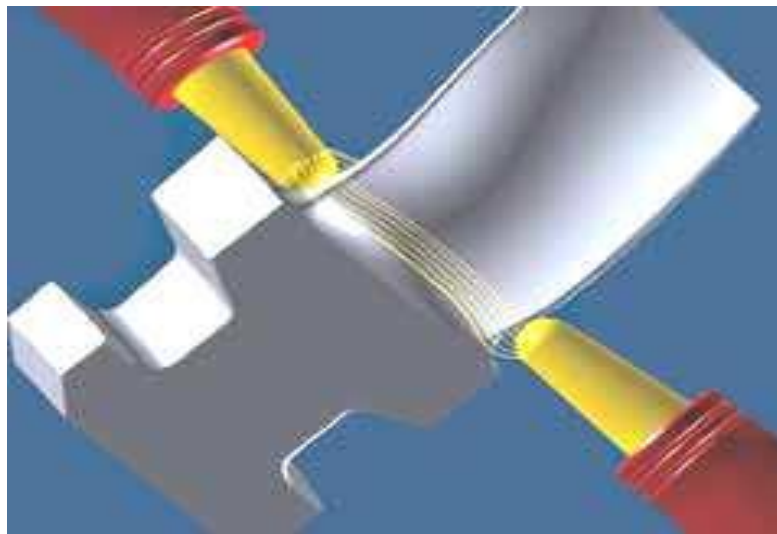


Figure II.6 : Usinage en roulant d'aubes de turbine 5 axes [8]

L'efficacité des moteurs d'avion, des turbines à vapeur ou des turbo chargeurs est influencée par la configuration des aubes de turbines. Il est évident que la tendance se dirige vers les profilés minces en matériaux durs. Les matériaux les plus simples utilisés dans les centres de fraisage de Starrag Heckert sont les aciers fortement alliés. Des alliages à base de titane ou de nickel sont maintenant couramment utilisés dans les machines. En plus de cela, les aubes sont fabriquées en série.

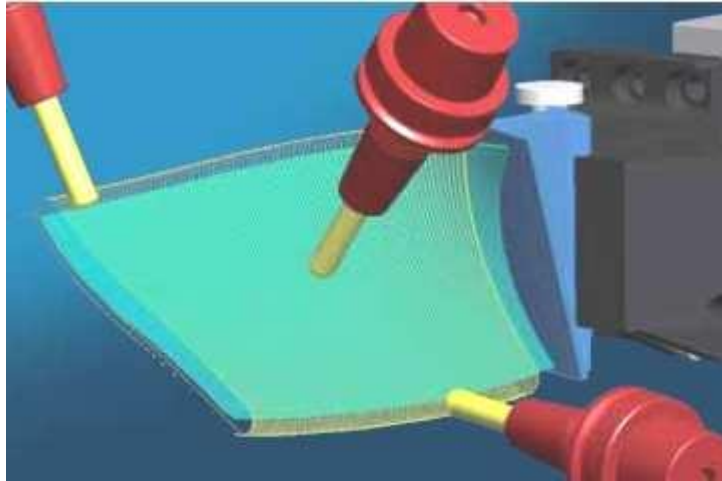


Figure II. 7 : Usinage en bout en 5 axes d'une aube de turbine : La finition des pales est réalisée par un usinage en continu. [11]

Jusqu'à présent, des imperfections se manifestaient à la surface lors de l'usinage : marques de retour, arêtes écrasées ou traces de broutage. Malgré le respect de toutes les tolérances, on pouvait souvent observer sur les anciennes aubes de turbines des « ghostlines » ou des traces de broutage. Jusqu'à présent, il n'était possible d'obtenir une surface aussi parfaite qu'à l'aide d'une opération supplémentaire de meulage, procédé qui est toutefois contesté, car il risque de modifier la géométrie des aubes. Les surfaces d'amenée d'air sont particulièrement sensibles. [14]

II.3.2. Moulage des aubes de turbine à gaz

II.3.2.1. Moulage au contact

a. Principe

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée. [14]

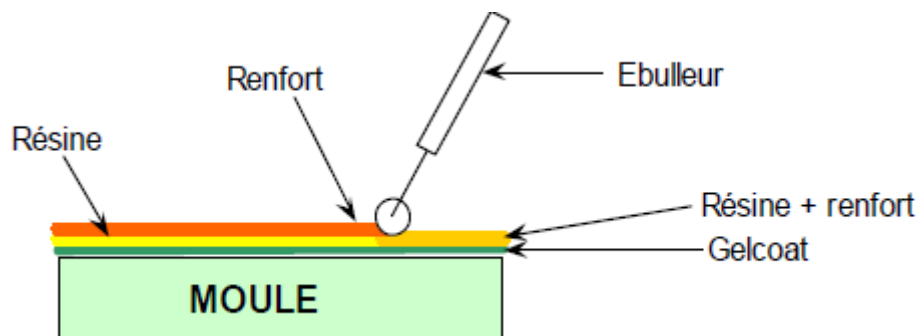


Figure II.8 : Schéma de moulage au contact. [14]

b. Caractéristiques principales

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> • Très larges possibilités de forme. • Pas de limite dimensionnelle. • Une surface lisse, gel coartée (aspect, tenue à la corrosion). • Propriétés mécaniques moyennes à bonnes investissements spécifiques très faibles. • Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne. 	<ul style="list-style-type: none"> • Une seule face lisse. • Nécessité de finition (détourage, percage, etc,..) • Qualité tributaire de la main d'œuvre. • Faible cadence de production par moule. • Espace de travail important. • Conditions de travail médiocres.

Tableau. II.1 : Caractéristiques de moulage au contact. [10]

II.3.2.2. Moulage par projection

a. Principe

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- Un dispositif de coupe - projection du renfort
- Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine

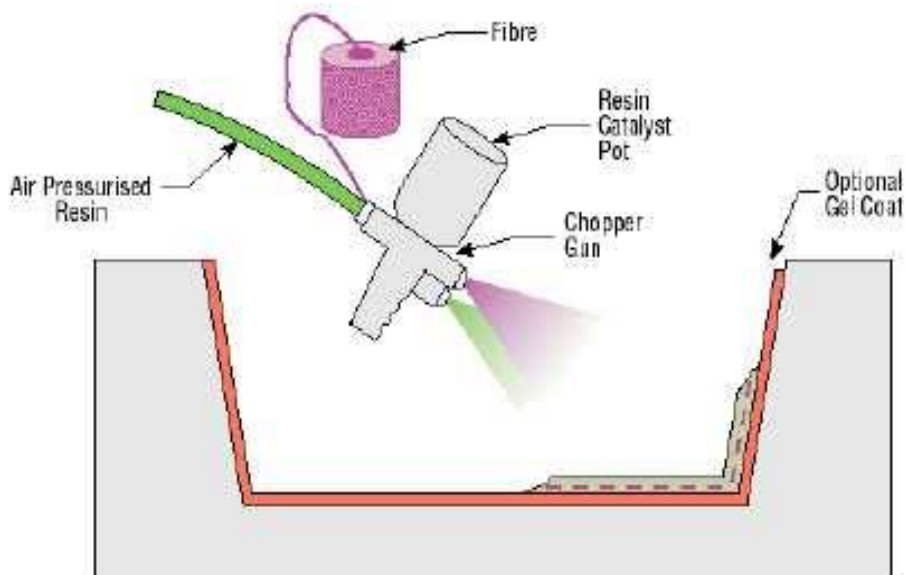


Figure II.9 : Schéma de Moulage par projection [14]

b. Caractéristiques principales

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> • Très larges possibilités de forme et dimensions. • Travail simplifié, suppression de la mise en forme obtenue directement par la projection. • Productivité plus élevée qu'au contact. • Investissements très modérés. • Moules simples, peu onéreux. Rapides à réaliser en interne. 	<ul style="list-style-type: none"> • Une seule face lisse. • Propriétés mécaniques moyenne. • Qualité tributaire de la main d'œuvre. • Conditions de travail très médiocres si absence d'agencements nécessaires.

Tableau. II.2 : Caractéristiques de moulage par projection.[14]

II.3.2.3. Moulage sous vide

a. Principe

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mis en œuvre.

Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort. [15]

b. Caractéristiques principales

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> • Deux faces lisses, éventuellement gelcoatées • Qualité non tributaire de la main d'œuvre. • Qualité constante. • Bonne cadence de production. • Nécessite peu de surface. • Investissement très modérés. • Bonnes conditions de travail et d'hygiène. 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilités de formes plus réduites qu'aucontact. • Mise au point parfois difficile.

Tableau. II.3 : Caractéristiques de moulage sous vide. [16]

II.3.2.4. Moulage à cire perdue

La fonderie cire perdue ou à modèles non permanents est issue des métiers d'art, où la nécessité de reproduire des objets en métal était nécessaire (duplication de sculptures en bronze par exemple).

Ce procédé a rapidement suscité l'intérêt de l'industrie, car il lui permettait d'obtenir des formes extrêmement complexes, difficilement réalisables par des méthodes de fonderie (sable, moule permanent...) ou d'usinage traditionnel. Effectivement, la méthode de la cire perdue implique la création d'un moule céramique (carapace) autour d'une pièce modèle à base de cire. Vidée de la pièce modèle, cette carapace est remplie de métal liquide. Quand le métal se solidifie, on détruit la carapace afin d'obtenir la pièce métallique.

Ce procédé permet ainsi de mouler des pièces pour lesquelles la réalisation d'un moule permanent pour la fonderie serait très complexe et donc coûteuse.

Procédé de précision, les caractéristiques dimensionnelles des pièces, mais surtout d'état de surface sont supérieures aux autres procédés de fonderie.[17]

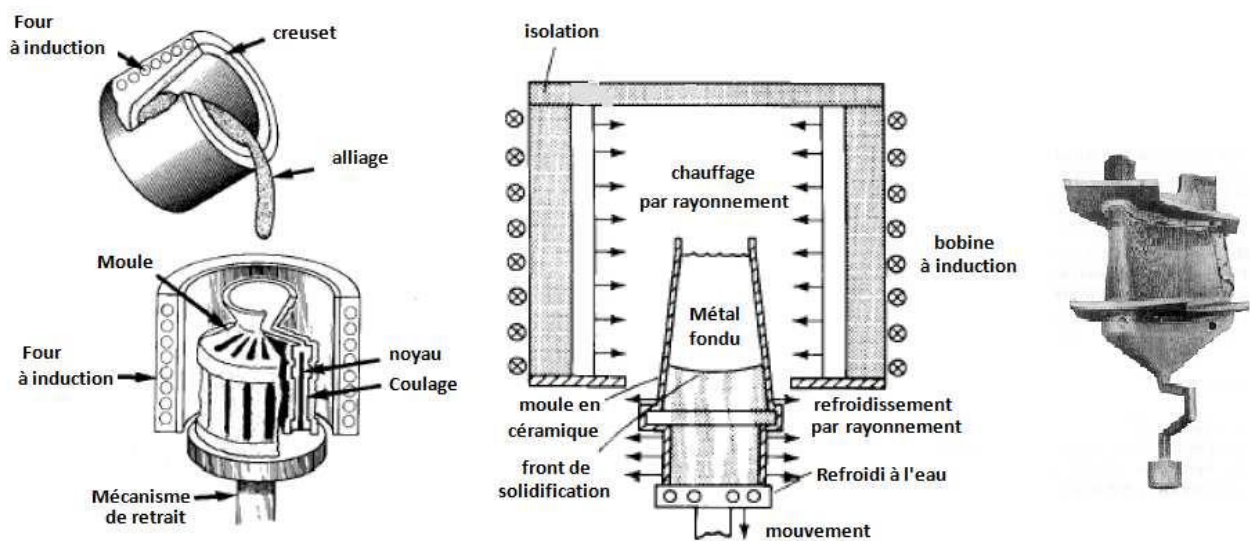


Figure II. 10 : Schéma de principe de moulage à cire perdue. [22]

II.4. Choix du matériau pour réalisation d'aube

Bien qu'il ait connu depuis longtemps que l'augmentation de la température d'entrée de turbine dans les résultats de moteurs aéronautiques dans les moteurs plus efficaces, les limites de fusion des métaux ont certainement restreint ces températures. Par conséquent, différents matériaux et revêtements résistants à la température ont été considérés un certain nombre de plus en plus la température des alliages d'aubes de turbine efficace sont présentés dans la figure .II.11. [18]



Figure II.11 : Développement de matériaux d'aube depuis 1940 à notre jour [13]

Chapitre III

**Conception et simulation de
l'aube**

III. Introduction

La conception et la fabrication des pales jouent un rôle fondamental dans la performance finale du système. Le but est donc de définir, dès la conception, une géométrie de pales performantes et économiquement réalisables.

✚ Partie A : Conception de l'aube

III. 1. Présentation de CATIA V5

CATIA, acronyme de Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée, est un logiciel de CAO mis au point par la société Dassault Aviation pour ses propres activités. Il regroupe un nombre important de modules totalement intégrés dans un seul et même environnement de travail. Ces modules permettent de modéliser une géométrie (CAO), de réaliser des analyses et des simulations (IAO), de mener une étude d'industrialisation (conception des outillages), de générer les programmes de commande numérique pour les machines-outils (FAO), d'établir les plans d'usines ...

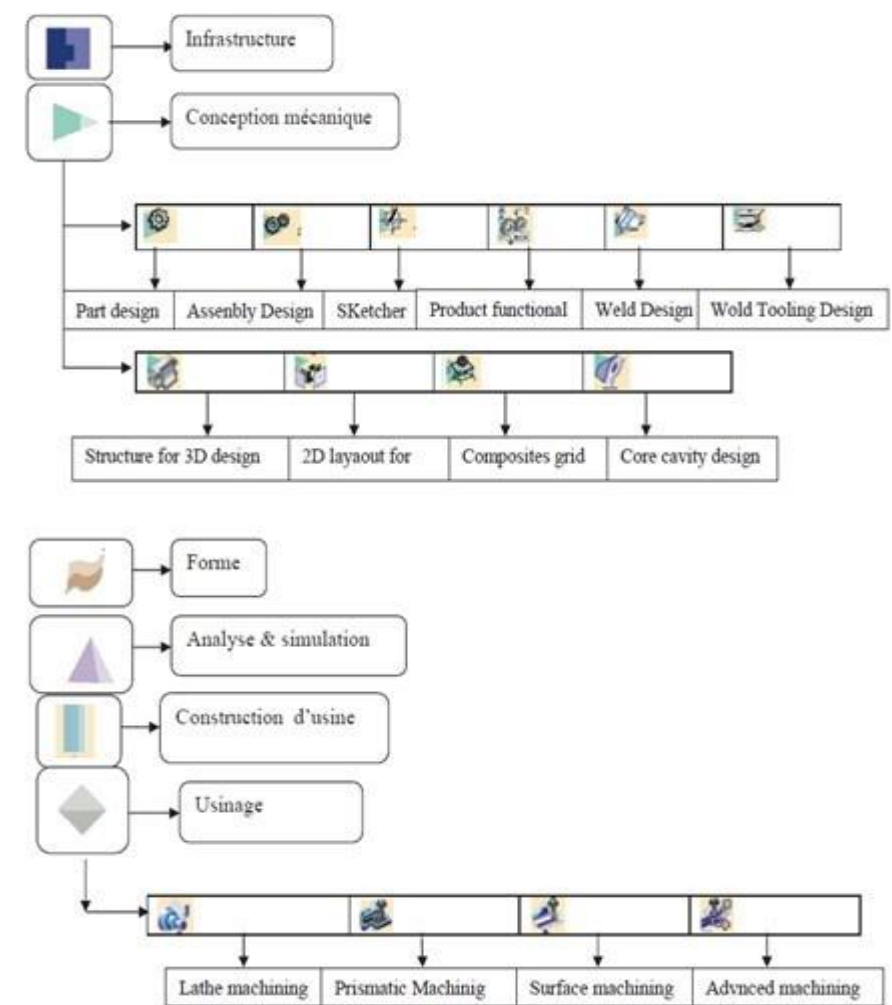


Figure III.1 : Architecteur du logiciel CATIA v5

III.2. Création de l'aube

Le profil de l'aube qu'on choisit est le NACA65206. C'est un profil utilisé pour les vitesses supersoniques. Les coordonnées en % sont données par le tableau suivant Tab.III.1:

N°	x%	y%	N°	x% suite	y% suite
1	1	0	26	0	0
2	0,95009	0,00511	27	0,0054	-0,00424
3	0,90018	0,01027	28	0,00794	-0,00502
4	0,85024	0,01538	29	0,013	-0,00608
5	0,80027	0,02029	30	0,02556	-0,00768
6	0,75028	0,02489	31	0,05061	-0,00993
7	0,70026	0,02907	32	0,07563	-0,01164
8	0,65022	0,03276	33	0,10064	-0,01306
9	0,60016	0,03589	34	0,15061	-0,01523
10	0,55009	0,03836	35	0,20055	-0,01685
11	0,5	0,04003	36	0,25047	-0,01802
12	0,4499	0,04078	37	0,30038	-0,0188
13	0,39981	0,04069	38	0,35029	-0,01922
14	0,34971	0,03982	39	0,40019	-0,01927
15	0,29962	0,03824	40	0,4501	-0,01888
16	0,24953	0,03592	41	0,5	-0,01797
17	0,19945	0,03277	42	0,54991	-0,01646
18	0,14939	0,02869	43	0,59984	-0,01447
19	0,09936	0,0234	44	0,64978	-0,01216
20	0,07437	0,02012	45	0,69974	-0,00963
21	0,04939	0,01625	46	0,74972	-0,00699
22	0,02444	0,0114	47	0,79973	-0,00437
23	0,012	0,00822	48	0,84976	-0,00192
24	0,00706	0,00642	49	0,89982	0,00007
25	0,0046	0,00524	50	0,94991	0,00121
			51	1	0

Tab III.1. Coordonnées en % du profil de l'aube.

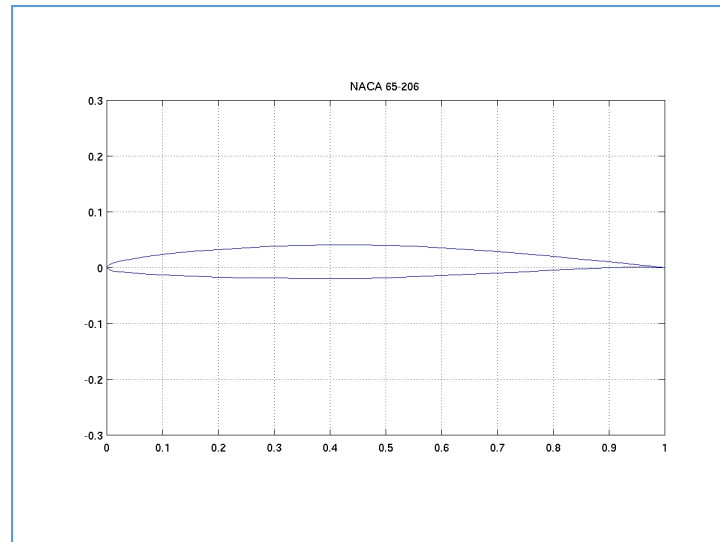


Figure III.2 : Le profil 65-206 de l'aube

Pour une corde de 50mm, on aura les coordonnées au pied ($z=0$ mm) suivantes : Tab III.2

X (mm)	Y (mm)	z=0 (mm)
50,00	0,00	0
47,50	0,26	0
45,01	0,51	0
42,51	0,77	0
40,01	1,01	0
37,51	1,24	0
35,01	1,45	0
32,51	1,64	0
30,01	1,79	0
27,50	1,92	0
25,00	2,00	0
22,50	2,04	0
19,99	2,03	0
17,49	1,99	0
14,98	1,91	0
12,48	1,80	0
9,97	1,64	0
7,47	1,43	0
4,97	1,17	0
3,72	1,01	0
2,47	0,81	0
1,22	0,57	0
0,60	0,41	0
0,35	0,32	0
0,23	0,26	0
0,00	0,00	0
0,27	-0,21	0
0,40	-0,25	0

0,65	-0,30	0
1,28	-0,38	0
2,53	-0,50	0
3,78	-0,58	0
5,03	-0,65	0
7,53	-0,76	0
10,03	-0,84	0
12,52	-0,90	0
15,02	-0,94	0
17,51	-0,96	0
20,01	-0,96	0
22,51	-0,94	0
25,00	-0,90	0
27,50	-0,82	0
29,99	-0,72	0
32,49	-0,61	0
34,99	-0,48	0
37,49	-0,35	0
39,99	-0,22	0
42,49	-0,10	0
44,99	0,00	0
47,50	0,06	0
50,00	0,00	0

Tab III.2 : Coordonnées au pied de l'aube.

L'aube est vrillée avec un angle de vrillage égal 12° et elle est de section décroissante d'échelle 0.7 fois. Les coordonnées au sommet ($z=100$ mm) sont : Tab III.3

X (mm)	Y (mm)	z=100 (mm)
34,24	7,28	100,00
32,49	7,09	100,00
30,74	6,90	100,00
29,00	6,71	100,00
27,25	6,52	100,00
25,50	6,31	100,00
23,76	6,09	100,00
22,02	5,85	100,00
20,29	5,60	100,00
18,55	5,32	100,00
16,83	5,01	100,00
15,11	4,67	100,00
13,39	4,30	100,00
11,68	3,91	100,00
9,98	3,49	100,00
8,28	3,05	100,00
6,59	2,57	100,00
4,91	2,07	100,00

3,23	1,52	100,00
2,40	1,23	100,00
1,57	0,92	100,00
0,75	0,57	100,00
0,35	0,37	100,00
0,19	0,27	100,00
0,12	0,21	100,00
0,00	0,00	100,00
0,22	-0,11	100,00
0,31	-0,11	100,00
0,49	-0,11	100,00
0,93	-0,08	100,00
1,80	0,03	100,00
2,67	0,15	100,00
3,54	0,29	100,00
5,27	0,57	100,00
6,99	0,88	100,00
8,71	1,21	100,00
10,42	1,54	100,00
12,13	1,89	100,00
13,84	2,25	100,00
15,55	2,63	100,00
17,25	3,02	100,00
18,95	3,44	100,00
20,64	3,87	100,00
22,33	4,31	100,00
24,03	4,76	100,00
25,72	5,22	100,00
27,41	5,67	100,00
29,11	6,12	100,00
30,80	6,55	100,00
32,51	6,95	100,00
34,24	7,28	100,00

Tab III.3 : Coordonnées au sommet de l'aube

Le lancement de CATIA est suivi par la sélection de l'atelier **Generative shape design**, on a fait cela pour faciliter l'**importation** des coordonnées du site spécialisé dans les profils : www.AirFoiltools.com, puis grâce à l'importation du fichier de données texte, on passé par Microsof Excel et on a exécuté une macros entre Excel et CATIA pour tracer les coordonnées recalculées des profils. Fig III.3.

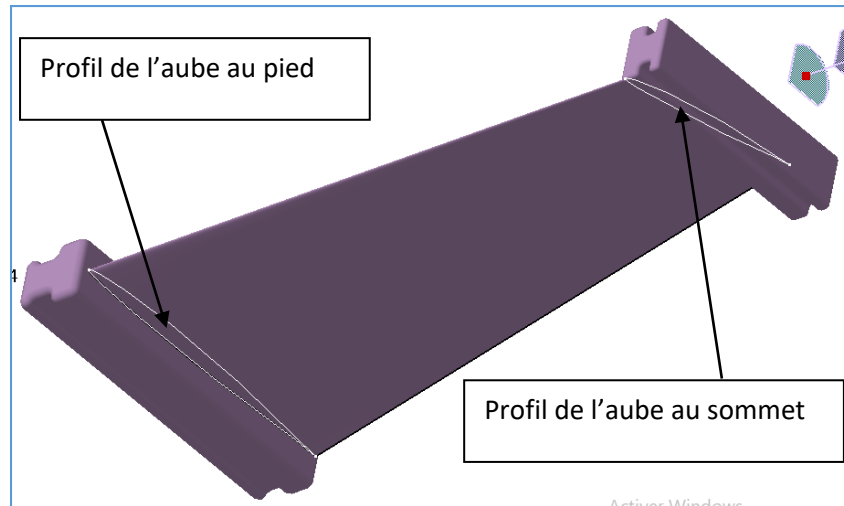


Figure III.3 : Le modèle 3D de l'aube obtenue

Après avoir achevé la conception de l'aube, nous passons à la vérifier sous quelques chargements.

Partie B : Simulation de chargement de l'aube :

La conception de l'aube étant terminée précédemment, on va vérifier sa résistance avec le code ANSYS, pour cela on importe le modèle 3D de l'aube sous le format IGES et on procède en premier lieu à son maillage. Fig III.4.

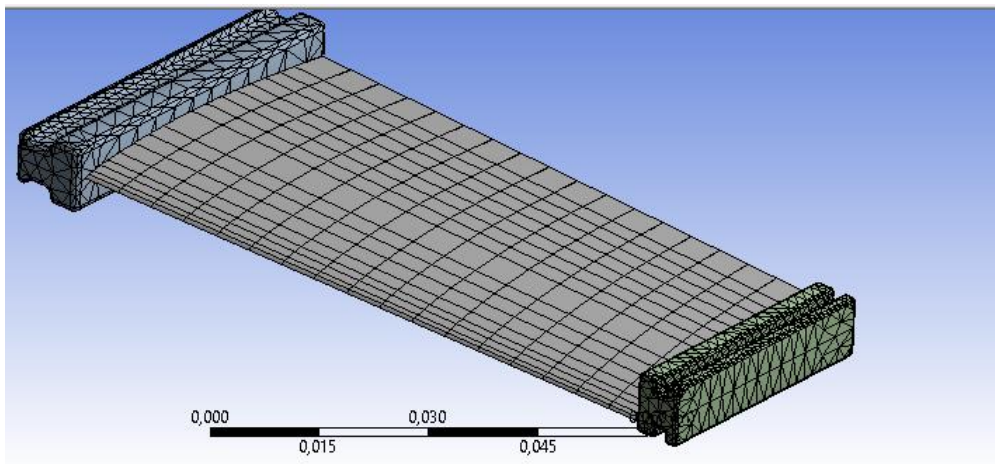


Figure III.4 : L'aube Maillée

Ensuite on applique les chargements suivants : Fig III.5.

1. Une force de 981N dirigée vers le bord d'attaque de l'aube.
2. Un champ de température de 1300°C. (La température de fusion est de 1630°C)
3. Une vitesse de rotation de 2000 tr/mn.

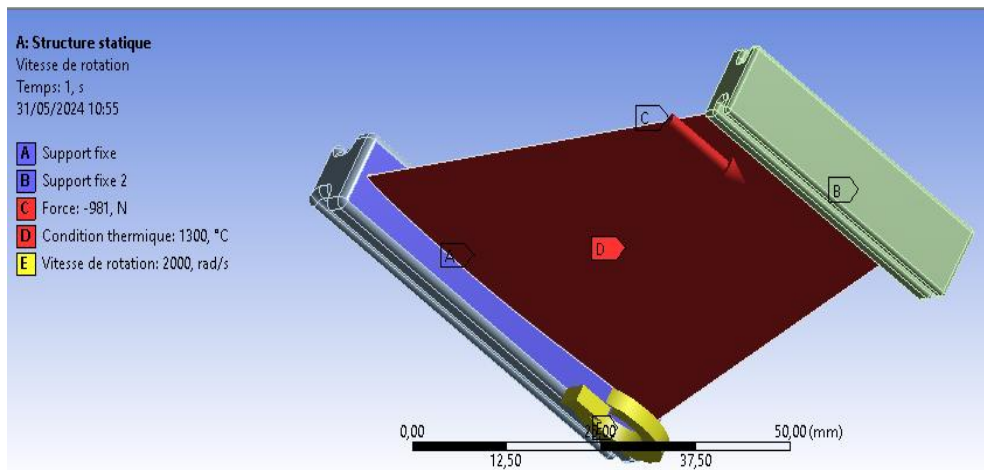


Figure III.5 : Différents chargements appliqués sur l'aube

III.1. Analyse

Après l'analyse par éléments finis, la distribution des contraintes de l'aube est présentée sur la figure III.6.

III.1.1. Les contraintes

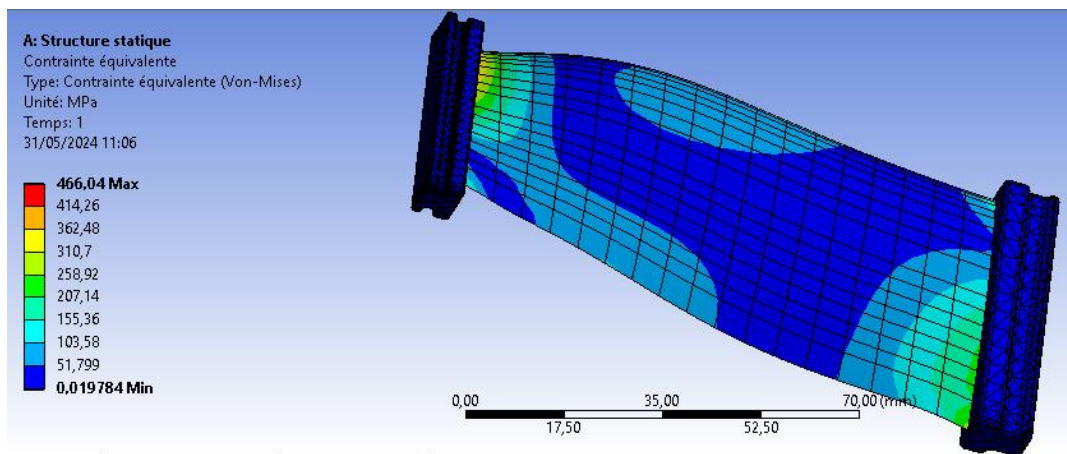


Figure III.6 : Distribution des contraintes

On constate que la zone la plus chargée ne dépasse pas 466.26 MPa. On note que la limite d'élasticité est de 2.9×10^5 MPa.

III.1.2. Les déformations

Les déformations sont liées étroitement aux contraintes par la loi de Hooke généralisée et par conséquent on va trouver une distribution de déformation qui semble beaucoup à celle des contraintes. Pour chaque mm de longueur de l'aube, on quantifie combien de mm elle se déforme. Ici on constate que la valeur max ne dépasse pas 0.0016078 mm par mm. Fig.III.7.

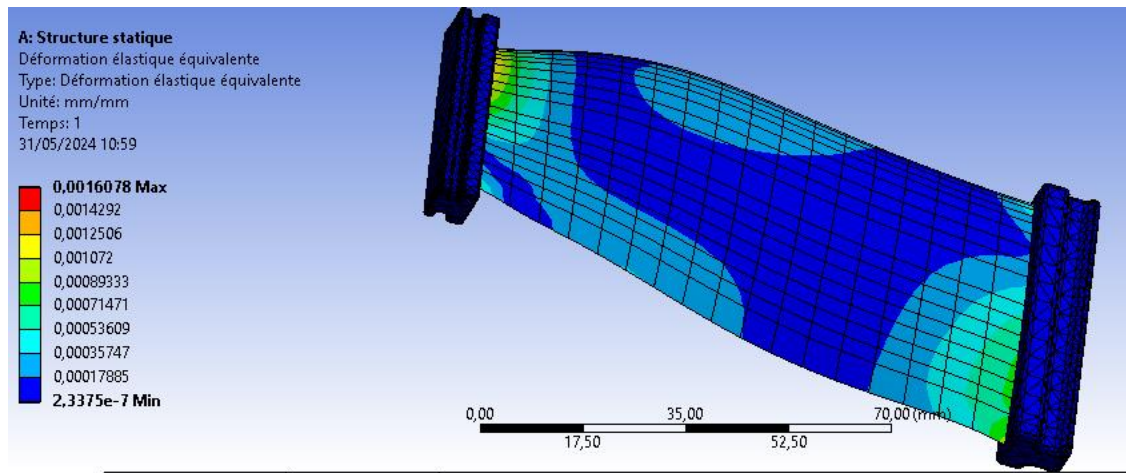


Figure III.7 : Distribution des déformations

III.1.3. Les déplacements

On a fait l'analyse des déplacements pour savoir la flèche max. possible pour chaque portion de l'aube. Fig.III.8.

L'examen des déplacements est basé ici, sur le fait que cette aube sera fixé des deux cotés, s'est à dire au pied et au sommet. Cela nous amène à considérer que cette aube sera simulée comme une poutre encastrée des deux cotés et par conséquent on doit examiner la flèche au milieu. La distribution ci-dessous montre que les zones qui ont subi des déplacements remarquables sont au nombre de deux : une zone sur le bord d'attaque (zone en couleur rouge en haut) et l'autre sur le bord de fuite ((zone en couleur rouge en bas). Mais dans les deux cas, la valeur de déplacement ne dépasse pas 0.11393mm. Cette valeur ne perturbe pas l'écoulement des gaz brulés et ne présente pas un risque sur la structure de l'aube.

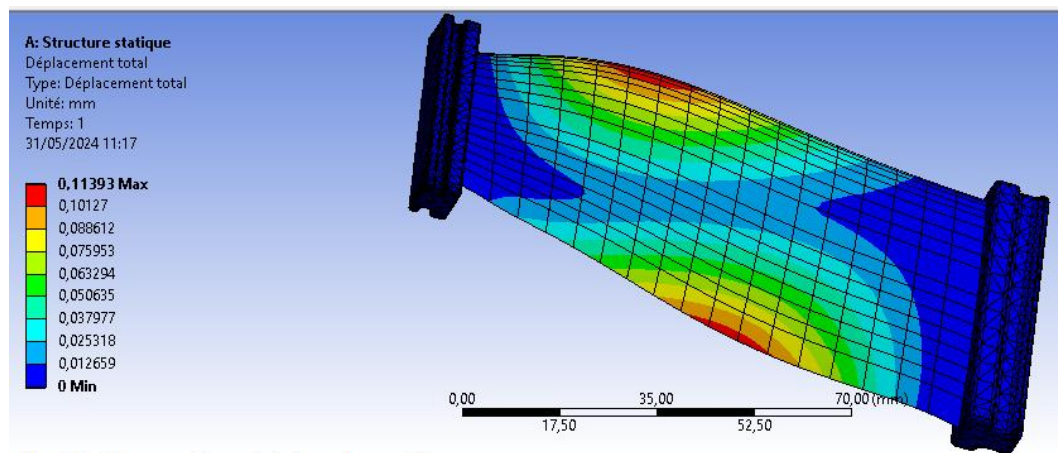


Figure III.8 : Distribution des déplacements

Partie C : Simulation de la fabrication de l'aube

III.1. Création de la pièce brute destinée à la fabrication de l'aube

La conception de la pièce brute est nécessaire pour le commencement de l'usinage, pour cela, on va concevoir un prisme qui couvre la pièce finie (l'aube). Fig.III.9.

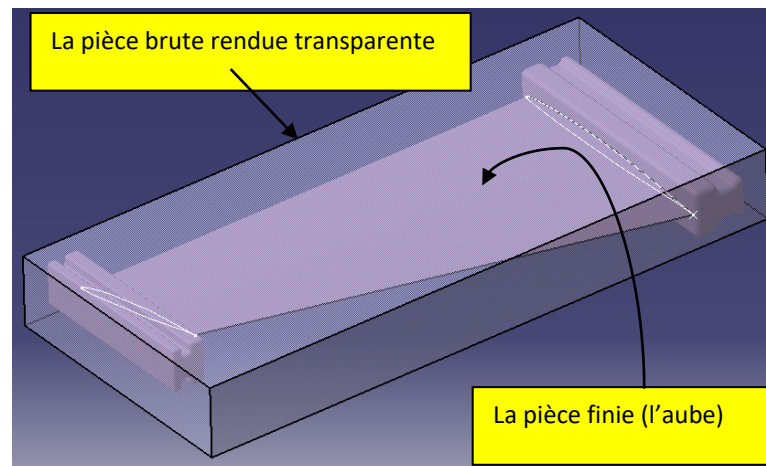


Figure III.9 : Pièce brute couvre la pièce finie

III.2. Choix de l'atelier : Fraisage à commande numérique 5 axes

Après avoir conçu, on passe l'aube à l'atelier de fabrication à commande numérique 5 axes. Fig.III.10.

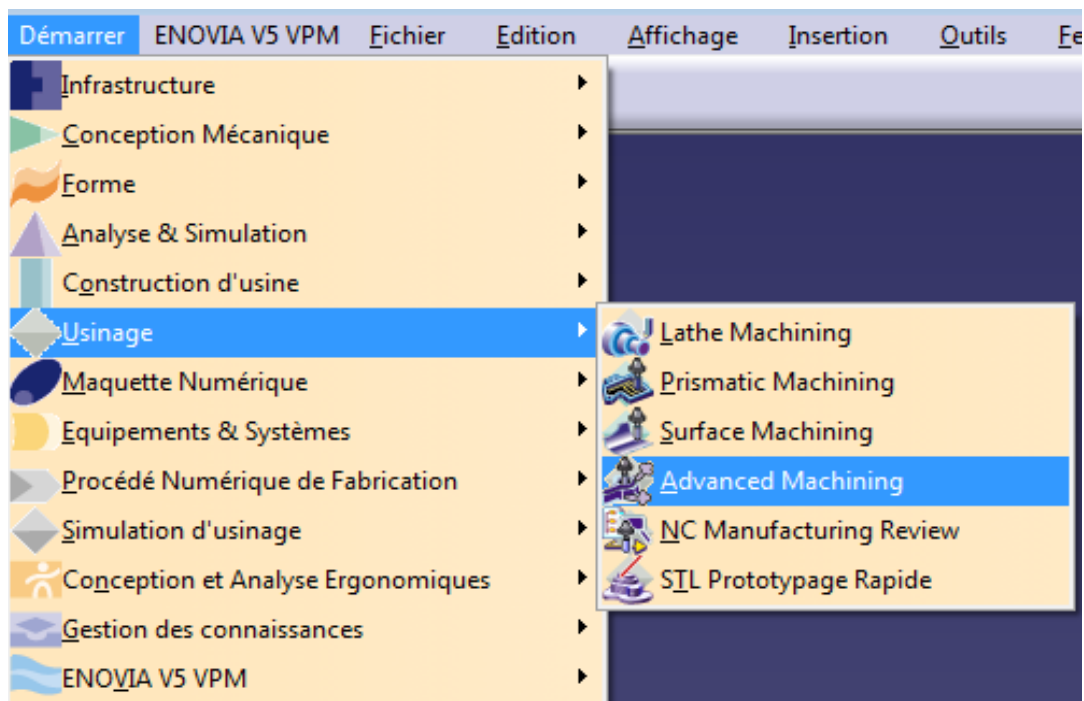


Figure III.10 : Ouverture de l'atelier d'usinage à commande numérique.

III.3. Définition de la phase d'usinage

On va s'intéresser à la simulation de fabrication (fraisage) du profil curviligne de l'aube, c'est-à-dire l'usinage de la surface composée par l'intrados et l'extrados.

III.4. Définition de l'opération d'usinage

Pour l'usinage de l'aube, on fait deux passes, la première pour l'ébauche et la seconde pour la finition de surface.

III.5. Opération d'ébauche

Dans cette opération, on cherche à se débarrasser du maximum de copeaux et d'arriver au voisinage de la surface finale de la pièce finie sans exiger une bonne précision ni un bon état de surface. Pour cela, on identifie la surface de la pièce brute et la surface finie, le type d'outil et on doit fixer encore, les paramètres technologiques, telles que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe. Fig.III.11

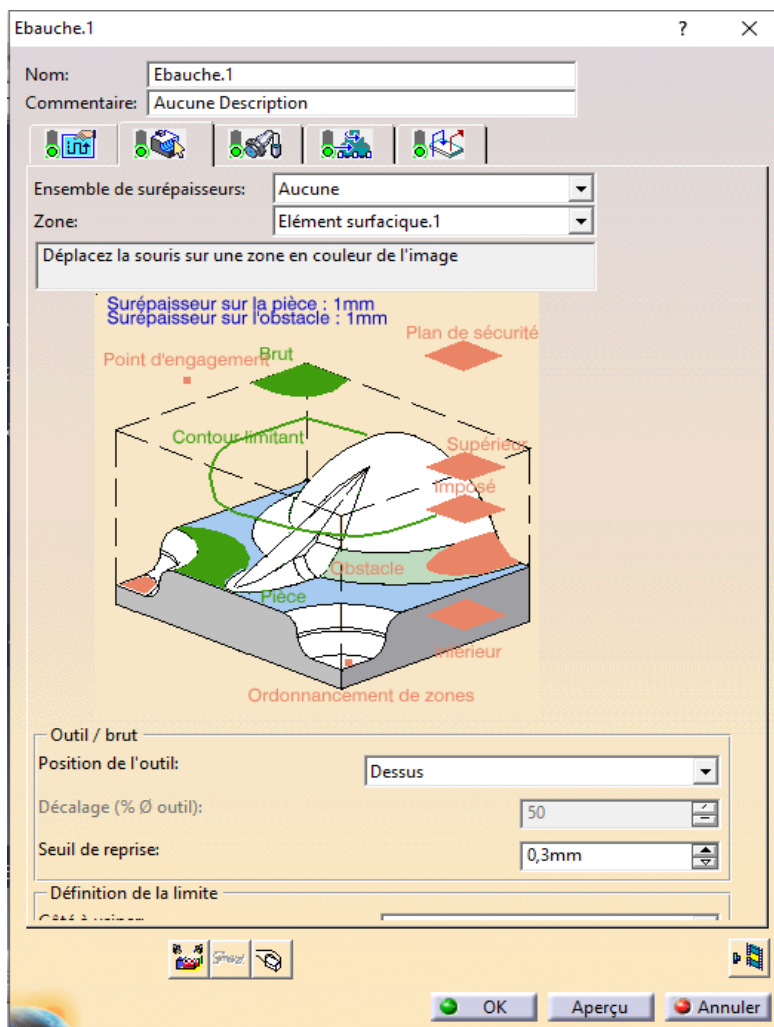


Figure III.11 : Réglage de l'opération d'ébauche

III.6. Opération de finition

Le but de l'opération de finition est d'atteindre la surface finale avec la précision et l'état de surface exigés. Pour cela, on identifie la surface de la pièce la surface finie, le type d'outil et on doit fixer encore les paramètres technologiques, telles que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe relatifs à l'opération de finition

III.7. Génération du programme en code ISO

La création du programme de fabrication repose sur le calcul des trajectoires de l'outil. Le type du post processeur, la table des mots du post processeur et l'émulateur. Le lancement de l'exécution fait apparaître la simulation d'usinage. Le programme obtenu peut être exploité par n'importe quelle fraiseuse à commande numérique. Fig.III.12

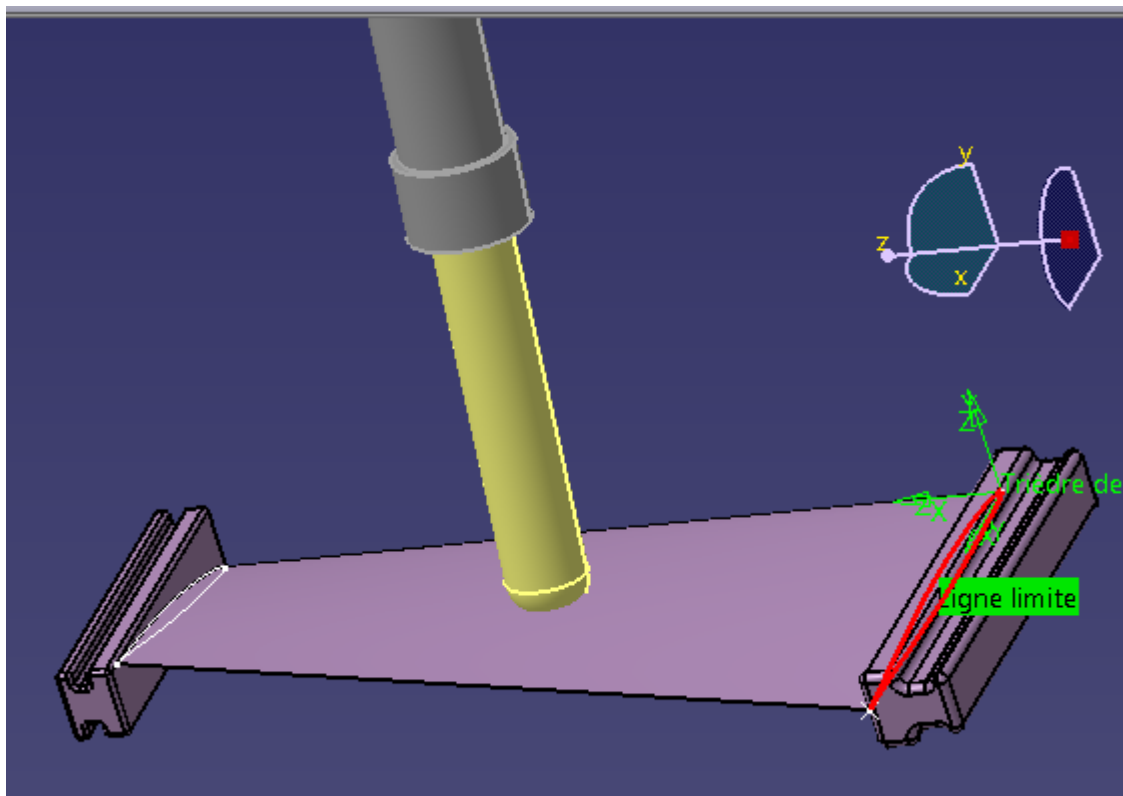
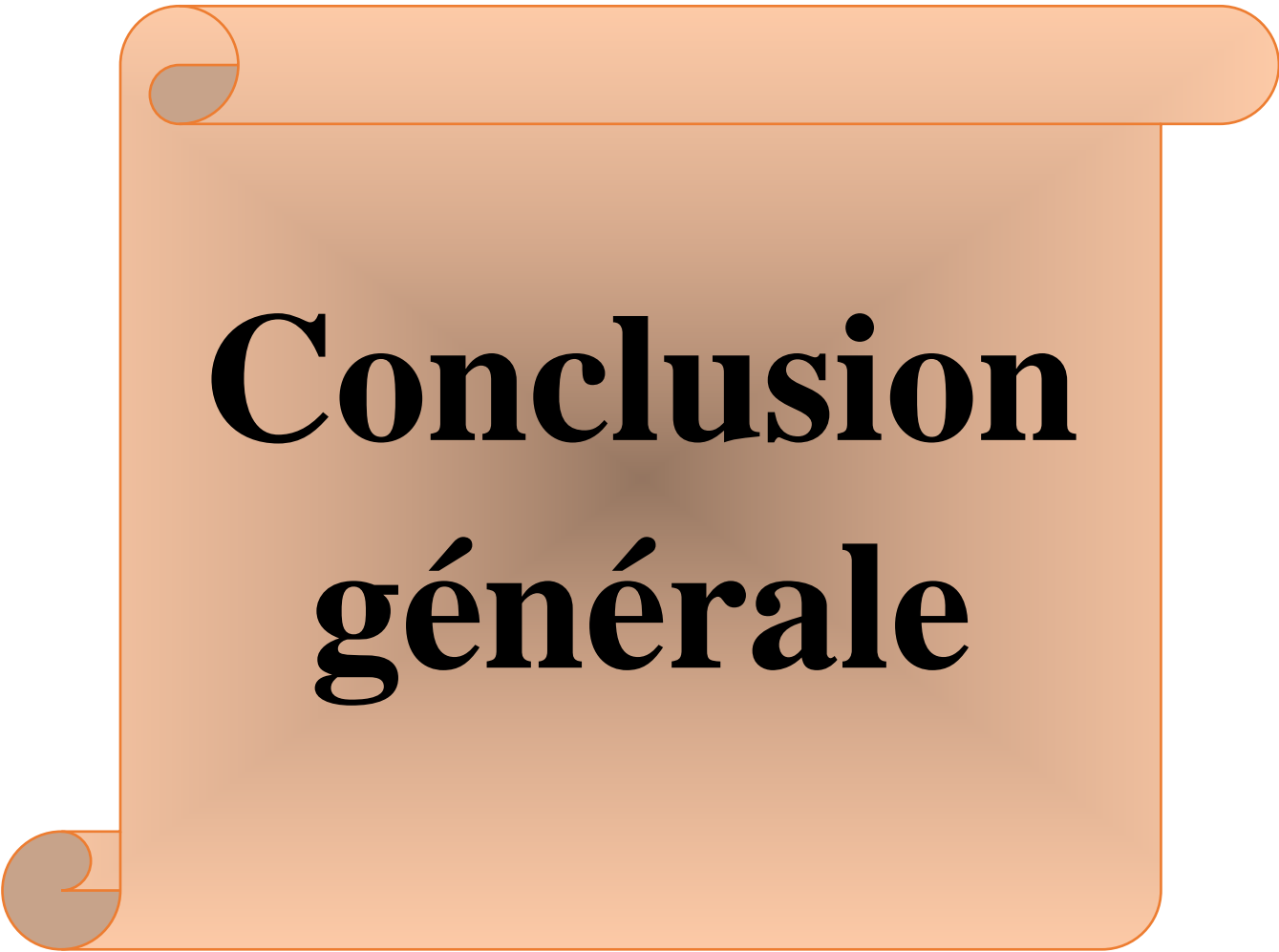


Figure III.12 : Simulation de l'usinage de l'aube.

Le programme ISO obtenu compte un grand nombre de lignes de code et ceci dépend de la précision imposée sur la trajectoire.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié comment, à partir d'un poste de CFAO, on obtient un programme d'usinage de l'aube de turbine sur une machine de production à commande numérique (fraiseuse 5 axes). L'élaboration du programme d'usinage prend en compte la géométrie spécifique de la pièce finie et leur brut, le processus de coupe, les paramètres de la machine et les outils de fraisage utilisés.



Conclusion générale

Conclusion générale

La partie principale de la turbine à gaz est l'aube, qui doit faire face à toutes les contraintes statiques, dynamiques, vibratoires, thermiques et de fatigue. Par conséquent, l'analyse, la conception, la simulation et la production de l'aube d'une turbine à gaz nécessitent diverses compétences.

La sélection du matériau et la taille de l'aube sont les éléments essentiels pour résoudre tous les défis mentionnés précédemment.

Quant à son matériau, il a connu plusieurs évolutions, allant de l'acier qui présenterait de graves problèmes jusqu'aux superalliages à base de nickel monocristallin et récemment les céramiques.

La taille, de son côté, comprend le type de profil, la précision des côtes et l'état de surface, tous ces éléments assurent un débit d'air chaud proche de l'idéal.

Étant donné que la production d'aubes implique plusieurs étapes, ce qui entraîne un processus long et coûteux, il est essentiel de faire appel à des moyens qui permettent d'accélérer ces étapes en utilisant des techniques de conception, de simulation en ce qui concerne le calcul thermomécanique, l'écoulement, la vibration, la fatigue, ainsi que la simulation de fabrication.

Pour cela, nous avons sélectionné le profil NACA65-206, c'est un profil utilisé dans les turbines des avions supersoniques, puis nous avons tracé ce profil et créé l'aube en utilisant le logiciel de CAO, CATIA. Par la suite, nous avons utilisé le logiciel de calcul par éléments finis ANSYS afin d'analyser les domaines de contraintes, de déformations et de déplacements, et de s'assurer que l'aube puisse faire face aux différentes sollicitations appliquées. Ensuite, nous avons retourné sur le logiciel CATIA pour simuler la fabrication de l'aube. Il s'agit du fraisage à commande numérique 5 axes et extraire le programme ISO qui peut être exécuté par la fraiseuse à commande numérique.

Le programme ISO obtenu par cette simulation est compréhensible par une fraiseuse à commande numérique ou un centre d'usinage à grande vitesse. La complexité des formes de l'intrados et de l'extrados de l'aube, ainsi que la section variable et le vrillage de l'aube, rendent indispensable l'utilisation d'un logiciel spécialisé en CFAO.

Enfin, il est nécessaire d'approfondir ce travail en réalisant d'autres études comme l'analyse thermomécanique couplé avec l'analyse vibratoire.



Références
Bibliographies

Références Bibliographies

- [1] Etude de l'effet thermique sur le superalliage Udim et 500 utilisé dans les turbines à gaz, (Gharbi soufyane, 2019), mémoire de fin d'étude master, Université de m'sila.
- [2] B. Ter-Oveanessian-Etude comparative de différents superalliages base Ni pour ressorts de systèmes de maintien-Thèse Doctorat à l'INP Toulouse, 2011
- [3] www.Neonickel.com.
- [4] Anuragh Thakur, Microstructural repenses of Nickel-base cast In-738 Superalloy to a variety of pre-weld heat-treatment, Manitoba :The University of Manitoba, 135 p, (2007).
- [5] Pierre CARON, Superalliages pour turbines : alliages pour aubes et pour disques, GEDEPEON, 19 Juin 2003.
- [6] Fatigue des ailettes de la turbine à gaz (fluage à haute température de l'inconel 738) (souleymane djafer. 2015-2016). Mémoire de fin d'étude master, université de m'sila.
- [7] Jean-Hubert Schmitt, Matériaux A Hautes Performances Matériaux Pour L'énergie Dimensionnement D'une Aube De TURBINE, 09/12/2014.
- [8] B.Daniel, Contribution des techniques neutroniques à l'étude des superalliages monocristallins. Laboratoire de spectrométrie physique Université Joseph Fourier.
- [9] Hal big, Jaskowiak, Kiser, Zhu: Evaluation of Ceramic Matrix Composite Technology for Aircraft Turbine Engine Application. 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the new Horizons Forum and Aerospace Exposition, June 2013.
- [10] LAMA A.Y, SAADOUNI B.E et LOUBZA I : Etude du comportement vibratoire des pièces minces. Application aux aubes, Mémoire de fin d'étude master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2020
- [11] BELKHAMSA, S. ABD ESSELAM, S., "Contribution à l'étude et au calcul des cycles thermodynamiques des turbines à gaz", mémoire d'ingénieur, Université Ouargla, 2008.
- [12] Etude du refroidissement par impact de jets à travers une paroi mince et avec un écoulement cisailant amont : Application aux aubes de turbines ; Présentée par Daniel THIBAUT École doctorale : Sciences pour l'Ingénieur et Aéronautique.
- [13] Etude de l'usure des pastilles de coupe revêtue lors de l'usinage d'un superalliage à base de cobalt fsx-414. (Mr : Kadri hadj. 2015-2016), mémoire de fin d'étude master, université de m'sila.
- [14] Conception d'une aube de turbine à gaz en matériaux composites, (klaa eftikhar, 14/09/2015), mémoire de fin d'étude master, université de batna.

- [15] C. Mons-Traitements thermiques des superalliages-Techniques de l'Ingénieur, traité matériaux métalliques, M1 165-1.
- [16] Antar, Abdelhafid. "Prédiction numérique de l'échange de chaleur autour d'une aube de turbine." (2011).
- [17] BEN AMOR, Y. REZIG, T., "Calcul énergétique d'une turbine à gaz à cycle combiné", mémoire d'ingénieur (Université Mohamed Khider – Biskra, 2010)