
Travail de fin d'études et stage[BR]- Travail de fin d'études : Prédiction des jeux radiaux dans les compresseurs basse pression[BR]- Stage

Auteur : p224875

Promoteur(s) : Salles, Loïc

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master : ingénieur civil mécanicien, à finalité spécialisée en mécatronique

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20452>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège

Faculté des Sciences Appliquées

Prédiction des jeux radiaux dans les compresseurs basse pression

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
master Ingénieur Civil en Mécanique par Hugo PELZER

Promoteur académique : SALLES Loïc

Année académique 2023-2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon maître de stage, François Nicolas, pour son encadrement. L'espace et la liberté qu'il m'a accordé m'ont permis d'explorer et de développer mes compétences de manière autonome. Je le remercie sincèrement pour la confiance qu'il m'a témoignée en me permettant de réaliser mon stage au sein de son service.

Je souhaite également adresser mes remerciements à mon professeur, Salles Loïc, qui a accepté d'être mon promoteur académique.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Volkan, pour son soutien constant, ses conseils avisés et sa présence bienveillante. Sa collaboration et son engagement ont grandement contribué à l'avancement de ce travail et à son aboutissement.

Plus généralement, je tiens à remercier tous les membres du bureau d'étude qui m'ont permis de réaliser mon stage dans une ambiance de travail agréable.

Abstract

Ce rapport présente une méthodologie stochastique pour la prédiction des jeux radiaux dans les compresseurs basse pression, visant à améliorer la fiabilité et les performances des moteurs aéronautiques. En utilisant une approche statistique basée sur la technique de Monte-Carlo, le modèle final permet de mieux estimer l'incertitude des jeux radiaux. L'analyse des facteurs influençant ces jeux, tels que les tolérances, l'ovalisation et les adders, aide à comprendre les variations possibles et propose des pistes pour l'optimisation des processus de conception et de maintenance des moteurs. Cette étude fournit une base pour la gestion des phénomènes aléatoires liés aux jeux radiaux et ouvre des perspectives pour des améliorations futures.

This report presents a stochastic methodology for predicting radial clearances in low-pressure compressors, aiming to improve the reliability and performance of aircraft engines. Using a statistical approach based on the Monte Carlo technique, the final model allows for better estimation of the uncertainties in radial clearances. The analysis of factors influencing these clearances, such as tolerances, ovalization, and adders, helps to understand the possible variations and suggests ways to optimize the design and maintenance processes of the engines. This study provides a foundation for managing random phenomena related to radial clearances and opens up prospects for future improvements.

Table des matières

1	Introduction	4
1.1	Safran Aero Boosters	4
1.2	Objectif du stage	4
1.3	Compresseur basse pression	5
2	Méthodologie de calcul des jeux	9
2.1	Tolérances	10
2.2	Consommations axisymétriques	11
2.3	Adders	11
3	Approche statistique	15
3.1	Tolérances	15
3.2	Ovalisation	18
3.3	Adders	33
3.3.1	Mauvais positionnement des adders	35
3.3.2	Dilatation de l'abradable	36
3.3.3	Variations importantes	38
3.3.4	Distribution des adders	40
4	Modèle final	43
5	Perspectives futures	51
6	Conclusion	52
A	Annexe	53

Chapitre 1

Introduction

1.1 Safran Aero Boosters

Safran Aero Boosters, anciennement Techspace Aero, a été établie le 17 décembre 1987 en tant que filiale de la FN Herstal spécialisée dans la conception de moteurs à réaction pour diverses applications aéronautiques. En 2005, suite à la fusion de Snecma et de Sagem pour former le groupe Safran, Techspace Aero est devenue une filiale à part entière de Safran, consolidant ainsi sa position sur le marché mondial de l’aéronautique et de l’espace. Safran Aero Boosters se distingue par son expertise dans la conception, le développement et la production de composants critiques pour les moteurs d’avions et spatiaux. L’entreprise est spécialisée dans la fabrication de compresseurs basse pression, de pièces de structures, de systèmes de lubrification et de bancs d’essais pour moteurs aéronautiques. Parmi ses principaux produits et services, on compte notamment les compresseurs basse pression pour le moteur LEAP, qui équipe des avions commerciaux tels que l’Airbus A320 NEO et le Boeing 737 Max, ainsi que des composants pour d’autres moteurs, comme le CF34, le Passport, le GEnx et le GE9X. Safran Aero Boosters se positionne comme un leader dans l’innovation technologique et l’excellence opérationnelle. L’entreprise consacre une part significative de ses ressources à la recherche, au développement et à l’intégration de nouvelles technologies dans ses produits et processus de fabrication. En tant qu’acteur clé de l’industrie aérospatiale belge, Safran Aero Boosters contribue de manière significative à l’économie locale et nationale. L’entreprise emploie près de 1 700 personnes, dont une grande partie est basée dans la région de Liège, en Belgique. De plus, ses activités génèrent des retombées économiques positives à travers ses partenariats avec des fournisseurs locaux et ses collaborations avec les autorités régionales et fédérales. Safran Aero Boosters se positionne comme un pilier de l’industrie aéronautique belge et un partenaire stratégique dans le développement de technologies de pointe pour les moteurs d’avions et spatiaux. Avec son engagement envers l’innovation, la qualité et l’excellence opérationnelle, l’entreprise continue de jouer un rôle crucial dans le façonnement de l’avenir de l’aéronautique et de l’espace à l’échelle mondiale.

1.2 Objectif du stage

L’intégration des divers composants d’un CoBP (Compresseur Basse Pression) au sein d’un moteur aéronautique requiert une attention minutieuse afin d’assurer à la fois un assemblage efficace et le bon fonctionnement du système dans des conditions opérationnelles variées. Au cœur de cette intégration se trouve la gestion des jeux entre les pièces en mouvement relatif, une tâche complexe qui dépend de multiples facteurs et qui évolue constamment en fonction des exigences de performances et des contraintes mécaniques.

Le présent rapport de stage s'inscrit dans le cadre de la nécessité de formaliser une méthodologie de dimensionnement des jeux radiaux, essentielle pour garantir la fiabilité et les performances des moteurs aéronautiques. En effet, ces jeux, s'ils ne sont pas correctement définis, peuvent entraîner une dégradation des performances du moteur ou augmenter les risques mécaniques d'endommagement.

Dans cette optique, le stage vise à mettre au point un outil standardisé permettant à la fois de prédire les valeurs de jeux avant les essais et de recalibrer ces valeurs en fonction des observations réalisées pendant et/ou après les essais. Cette démarche s'appuie sur une méthodologie de dimensionnement établie, qui prend en compte à la fois les exigences spécifiques de Safran Aero Boosters et les particularités de chaque projet. L'objectif principal du stage est d'introduire un aspect statistique à la prédiction des jeux radiaux pour prendre en compte les aspects incertains et aléatoires.

1.3 Compresseur basse pression

Avant toute chose, et pour la bonne compréhension de la suite de ce rapport, il est pertinent de revenir sur l'architecture globale d'un moteur classique et celle d'un compresseur basse pression. Sur la Figure 1.1 on peut avoir un aperçu des éléments principaux d'un moteur.

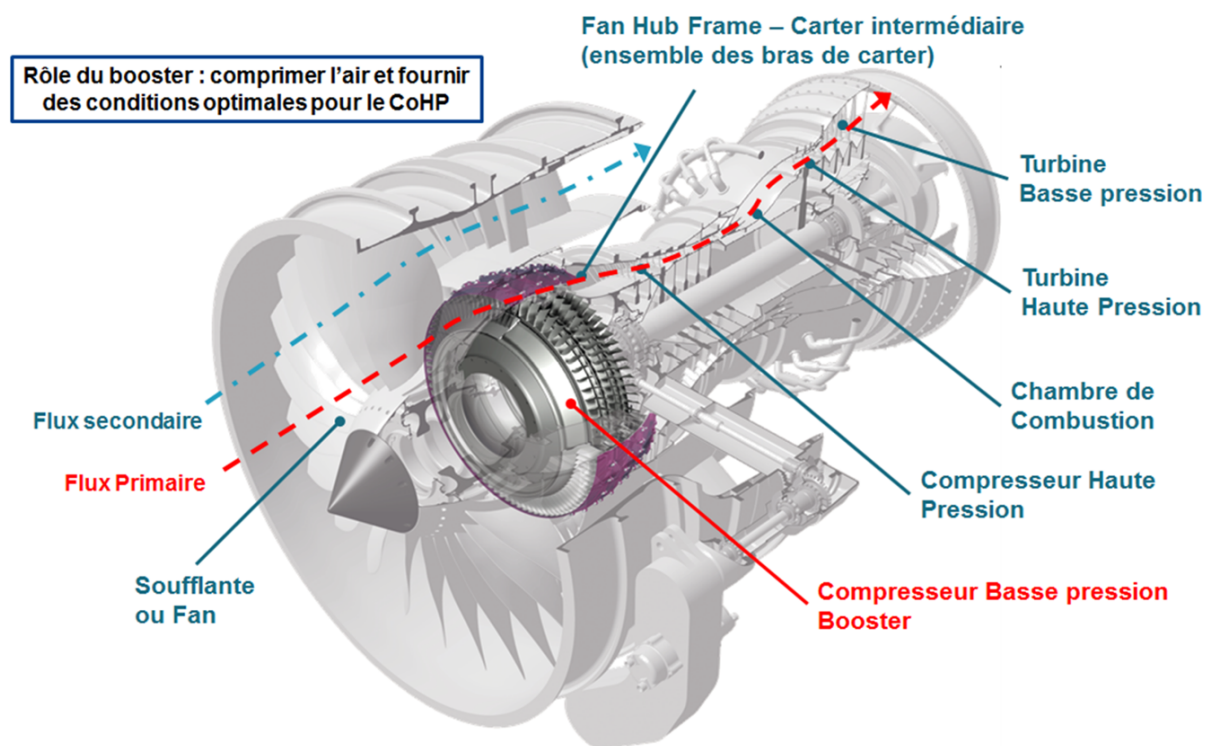


FIGURE 1.1 – Architecture globale d'un moteur classique - Source : Mini Formation [4].

Comme on peut le voir, le compresseur basse pression est situé à l'avant du réacteur, juste derrière les énormes aubes du fan, aussi appelé soufflante. Le rôle de la soufflante est d'assurer la compression initiale de l'air entrant dans le réacteur, ce flux va être séparé en deux. La majeure partie, appelée flux secondaire ou flux froid, contourne toute la partie chaude du réacteur. L'autre partie, appelée flux primaire ou flux chaud, traverse tout le réacteur en passant par le compresseur basse pression, le compresseur haute pression, la chambre de combustion et les turbines haute pression et basse pression. Le rôle des compresseurs est d'aspirer et de comprimer l'air pour l'amener à des vitesses, pressions

et températures optimales à l'entrée de la chambre de combustion. Sur la Figure 1.2 on peut voir une vue éclatée d'un compresseur basse pression.



FIGURE 1.2 – Vue éclatée d'un compresseur basse pression - Source : Mini Formation [4].

On peut voir, au centre le tambour, la pièce rotorique principale du booster, avec ses aubes appelées roues mobiles. Le stator, quant à lui, est composé d'un assemblage de plusieurs pièces. Il dispose également de différentes rangées d'aubes appelées redresseurs. Le rotor aspire et accélère le flux d'air en le déviant par rapport à l'axe du moteur. Les redresseurs redressent le flux dans l'axe et le ralentissent en transformant une partie de sa vitesse en pression. Le flux d'air, étant de plus en plus comprimé, va occuper un volume de plus en plus restreint. C'est pour cette raison que la hauteur des aubes est de plus en plus faible. Sur la Figure 1.3, on peut voir plus en détails la dénomination des différentes pièces du stator et la manière dont elles s'assemblent.

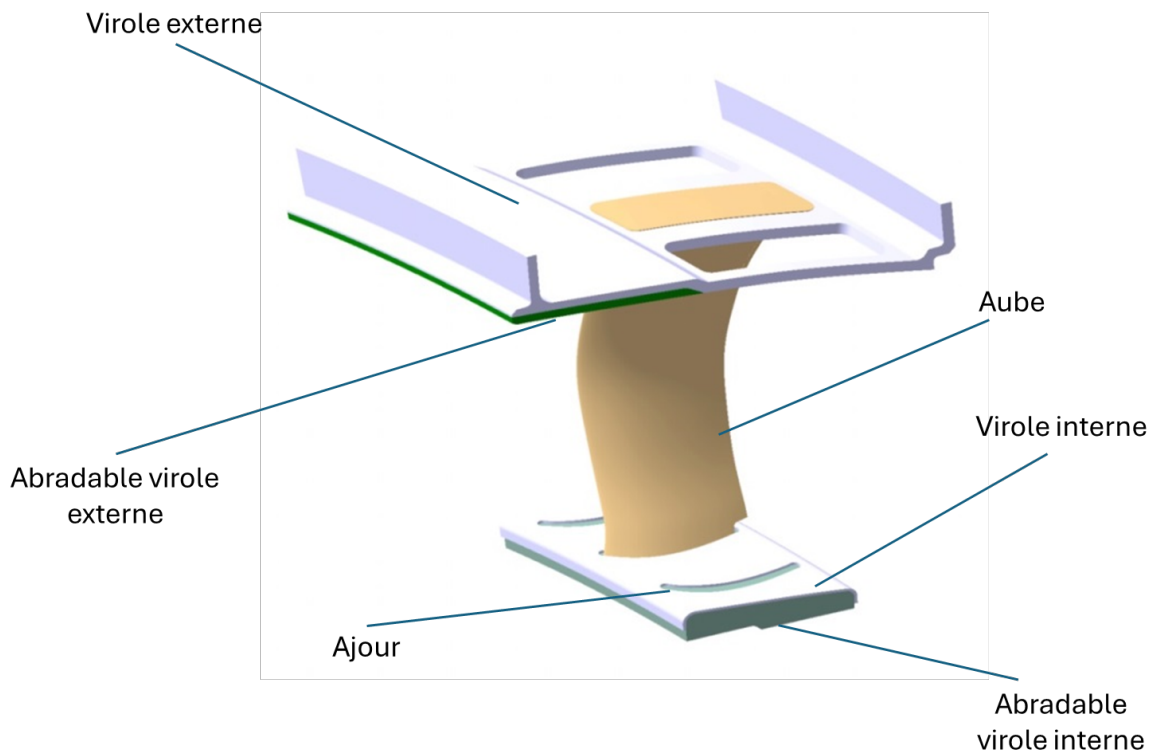


FIGURE 1.3 – Composantes d'un étage du stator - Source : Mini Formation [4].

L'abradable se situe en face des têtes des roues mobiles et au droit des l chettes. Les l chettes sont visibles sur la représentation 3D du booster de la Figure1.4.

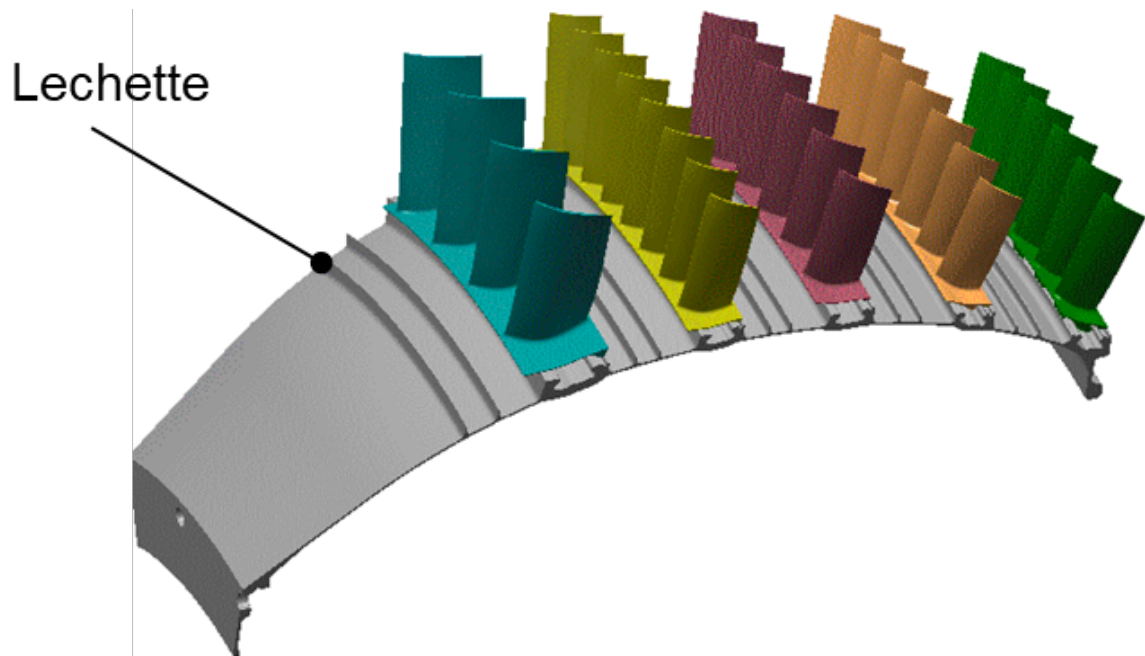


FIGURE 1.4 – L chettes du rotor - Source : Mini Formation [4].

L'abradable est simplement une couche d'un matériaux "sacrificiel" (de type silicone) dont le but est de s'éroder au contact du rotor. En fonctionnement normal, les l chettes viennent donc se planter dans l'abradable de la virole interne et assurent ainsi une certaine étanchéité, empêchant l'air de recirculer. L'abradable au niveau de la virole externe permet de refermer le jeu en ne tenant compte que des cas de fonctionnement normaux. Les

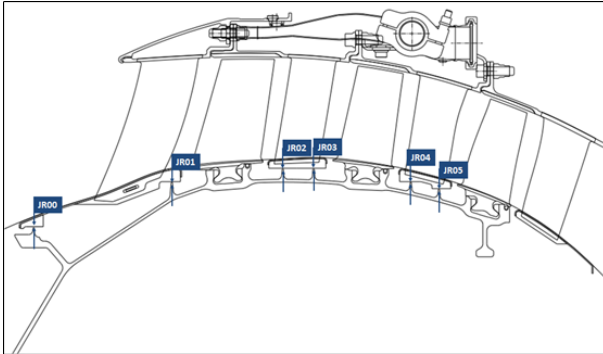
cas de fonctionnement extrêmes sont couvert par l'abradable qui empêche les contact métal/métal.

Chapitre 2

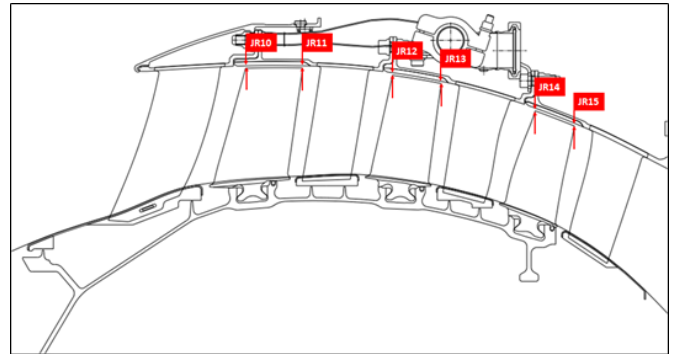
Méthodologie de calcul des jeux

Dans ce chapitre, nous allons rapidement expliquer la méthodologie et les différents paramètres pris en compte pour calculer les jeux. Cette méthodologie est détaillée en profondeur dans le manuel d'études[5]. Les jeux sont séparés en deux grandes catégories : radiaux et axiaux. Nous allons nous intéresser aux jeux radiaux, la méthodologie étant sensiblement la même pour les axiaux. Les jeux radiaux sont eux-mêmes séparés en deux sous-catégories :

- Les **JR0Y** correspondent aux jeux radiaux entre les lèchettes du tambour et les pistes d'abrasable des viroles internes des stators, voir Figure 2.1a.
- Les **JR1Y** correspondent aux jeux radiaux entre les têtes des roues mobiles et les pistes d'abrasable des viroles externes des stator, voir Figure 2.1b.



(a) Jeux radiaux entre les lèchettes du tambour et les pistes d'abrasable des viroles internes des stators.



(b) Jeux radiaux entre les têtes des roues mobiles et les pistes d'abrasable des viroles externes des stator.

FIGURE 2.1 – Dénomination des jeux radiaux - Source : Manuel Interne [3].

Le dimensionnement des jeux radiaux demande de satisfaire plusieurs critères qui sont :

- Assurer la montabilité du booster pour la configuration la plus défavorable
- Limiter la pénétration maximale des parties rotoriques (lèchettes ou roues mobiles) dans l'abrasable pour des conditions "normales" de fonctionnement du CoBP.
- Eviter tout contact métal/métal entre les pièces rotoriques et statoriques pour des conditions "extrêmes" de fonctionnement du CoBP.

Seul le deuxième critère sera détaillé dans cette mise en matière, les principes de dimensionnement restant sensiblement les mêmes d'un critère à l'autre. L'équation permettant de réaliser le dimensionnement des jeux radiaux en conditions "normales" de fonctionnement est la suivante :

$$J_{cold} \geq Tol_{radial} + (Conso_{axi} + Adders)_{PP} - P \quad (2.1)$$

où :

- J_{cold} est le jeu nominal à froid.
- Tol_{radial} est la consommation de jeux induite par les tolérances de fabrication des pièces.
- $Conso_{axi}$ est relatif aux consommations axisymétriques provenant des déformations et déplacements des différents composants.
- $Adders$ se rapporte aux consommations additionnelles.
- PP signifie "Pinch Point", il s'agit du point de fonctionnement pour lequel les consommations de jeux sont maximales (parmi les différents régimes pris en compte). Il s'agit du point dimensionnant pour lequel les critères de dimensionnement doivent être respectés.
- P est la pénétration maximale autorisée dans l'abradable.

2.1 Tolérances

Le premier terme de l'équation générale est celui lié aux tolérances de fabrication sur les dimensions nominales des différentes pièces. Les tolérances à prendre en compte sont établies sur base des chaînes de cotes "moteur". Les chaînes de cotes "moteur" font intervenir l'ensemble des pièces mécaniques permettant de relier les deux extrémités du jeu étudié. Les chaînes sont réalisées sur une coupe 2D du compresseur et de toutes ses pièces d'interfaces. La logique de réalisation de ces chaînes est de repérer le jeu à étudier et de tracer les cotes cheminant d'une extrémité à l'autre de ce jeu en passant par les appuis entre les différentes pièces, comme visible sur la Figure 2.2.

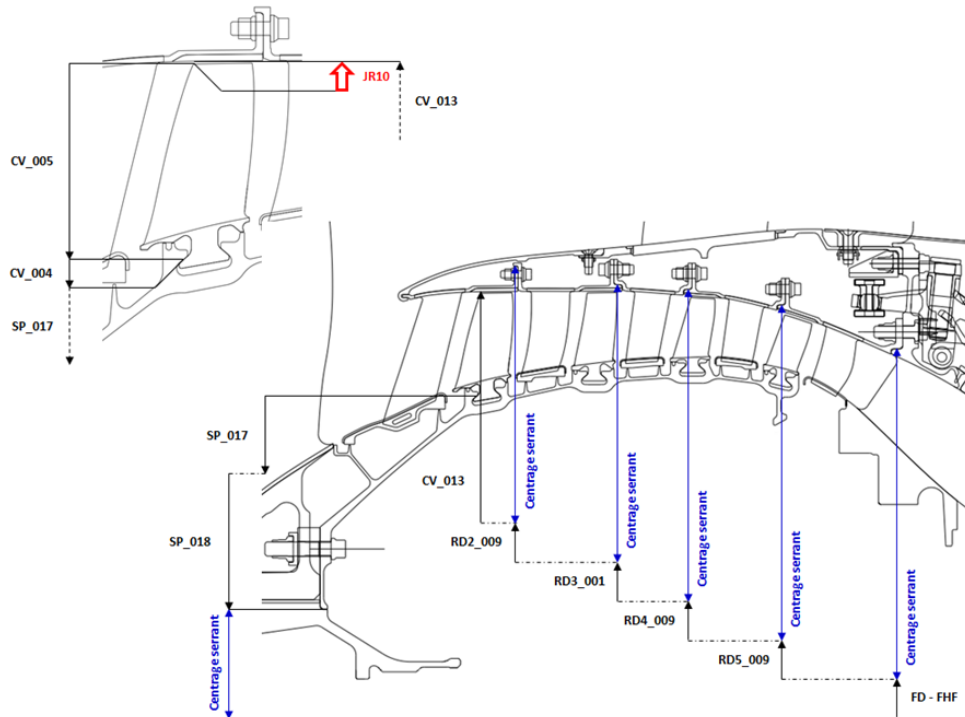


FIGURE 2.2 – Exemple de chaîne de cotes radiale "moteur" (coupe illustrative : Silvercrest) - Source : Manuel Interne [5].

Plusieurs méthodologies sont possibles pour additionner les tolérances relatives aux diverses cotes intervenant dans les chaînes de cotes. La méthode actuellement utilisée, dite "Quadratique TA", consiste à :

- Effectuer la somme arithmétique de toutes les tolérances axiales intervenant dans l'empilage :

$$IT_{axial} = IT_{axial,1} + IT_{axial,2} + \dots \quad (2.2)$$

- En ce qui concerne la partie radiale, effectuer séparément pour le rotor et le stator, la somme arithmétique de la somme arithmétique des tolérances dimensionnelles et de la somme quadratique des tolérances géométriques. Les tolérances dimensionnelles concernent les cotes géométriques (diamètres,...) et les tolérances de forme tandis que les tolérances géométriques portent sur des aspects tels que les concentricités ou les battements. Enfin il faut additionner les tolérances obtenues de manière arithmétique pour obtenir la tolérance radiale globale :

$$IT_{radial} = \left[IT_{radial,1} + IT_{radial,2} + \dots \sqrt{IT_{radial,x}^2 + IT_{radial,y}^2 + \dots} \right]_{rotor} + \left[IT_{radial,1} + IT_{radial,2} + \dots \sqrt{IT_{radial,x}^2 + IT_{radial,y}^2 + \dots} \right]_{stator} \quad (2.3)$$

- Pour obtenir la partie globale, effectuer la somme arithmétique des contributions radiale et axiale projetée :

$$IT_{global} = IT_{radial} + (IT_{axial} \times \tan \alpha) \quad (2.4)$$

où α correspond à l'angle d'inclinaison des pistes d'abradable. Dans le cas des léchettes, les pistes d'abradable sont horizontales ($\alpha = 0$) et il n'y a donc aucune participation de la partie axiale des tolérances.

Notons que, lors du dimensionnement des jeux, uniquement la moitié de l'intervalle de tolérances est prise en compte. Cela correspond à l'écart entre la configuration nominale et le cas le plus défavorable :

$$Tol_{radial} = \frac{IT_{global}}{2}. \quad (2.5)$$

2.2 Consommations axisymétriques

Le terme $Conso_{axi}$ comprend donc les déformations qui sont soit réellement axisymétriques (égales sur toute la circonférence), soit qui se répètent sur toutes les aubes d'un même étage. Les déformations réellement axisymétriques sont déterminées sur base d'un calcul 2D axisymétrique du module complet. Les déplacements qui sont impactés par la géométrie 3D des composants (déformations 3D des aubes) sont déterminés sur base de calculs 3D. Sur base de la coupe 2D, on peut calculer ; la dilatation thermique, l'effet de la force centrifuge, l'effet du champ de pression, des efforts aérodynamiques, des efforts de traction.... Ensuite, grâce aux modèles 3D des aubes, on calcule leurs déformations étant donné que celles-ci sont fortement dépendantes de leurs géométries 3D.

2.3 Adders

Les Adders ou consommations additionnelles englobent tous les phénomènes engendrant des consommations de jeux non axisymétriques et qui n'ont donc pas été pris en compte lors du calcul des consommations axisymétriques. Le terme Adders de l'équation générale peut se décomposer de la manière suivante :

$$Adders = Oval + CdM + B_{résiduel} + DS_{FHF} + J_{roulement} + (Vib_{RM}) \quad (2.6)$$

où :

- $Oval$ = Ovalisation du tambour. La distribution de la masse sur la circonférence du rotor étant non parfaitement axisymétrique, les efforts ne seront pas égaux sur la circonférence, ce qui aura tendance à ovaliser le tambour.
- CdM = Charges de manœuvre. Les déformations sont calculées pour un certain nombre de scénarios de vols définis par l'avionneur. Les calculs prennent en compte des effets extérieurs qui engendrent des accélérations transverses de l'avion (trous d'air, rafales de vent latéral,...).
- $B_{residuel}$ = Balourd résiduel. L'équilibrage du rotor n'est jamais parfait. En effet, il persiste toujours un balourd résiduel qui engendre des consommations de jeux. Les consommations de jeux dues au balourd résiduel vont dépendre du niveau de balourd et du positionnement de ce dernier au sein du moteur, mais également de la position des modes de suspension et des modes de rotor. Ceci explique qu'il n'y a pas une consommation de balourd unique pour tous les régimes de fonctionnement, mais que cette dernière évolue à chaque régime moteur.
- DS_{FHF} = Déformation statique du Fan Hub Frame. Suite aux efforts de poussée, aux effets de la gravité et aux fixations du moteur sur l'avion (bras de reprise de poussée), le carter du moteur va se déformer de manière non axisymétrique, engendrant une déformation non axisymétrique au niveau des stators et donc, des déplacements relatifs rotor/stator.
- $J_{roulement}$ = Jeu de roulement. Le roulement à billes du support de palier peut engendrer un déplacement relatif rotor/stator à considérer lors du dimensionnement des jeux. La valeur du jeu entre les butées amont et aval du roulement est une constante pour tous les cas de charge.
- Vib_{RM} = Comportement dynamique de roues mobiles, ce terme n'intervient que dans le dimensionnement des JR1Y. Une étude séparée des aubes en vibration permet de prendre en compte le mode vibratoire aux différents régimes moteur. La réponse vibratoire des redresseurs n'est pas analysée. En effet, ceux-ci sont fixés avec du silicone à leurs viroles, on considère donc que toutes les vibrations sont absorbées. Dans le cas d'aubes très flexibles, une analyse dynamique NL peut être nécessaire afin de déterminer ce terme. La plupart du temps, c'est le mode 1F qui est dimensionnant pour le calcul des jeux. Un calcul vibratoire de l'aube sous mode 1F à X% de sa limite d'élasticité est réalisé et les déplacements correspondant en tête d'aube sont alors considérés. En effet c'est le mode de vibration de l'aube le plus souvent rencontré en fonctionnement et qui amène les plus grands déplacements aux bord d'attaque et bord de fuite. Le pourcentage de la limite d'élasticité à prendre en compte dépend du contexte dans lequel l'étude est réalisée. Pour un moteur en développement, on détermine le déplacement correspondant à 50% lorsqu'on est proche des zones de croisements dynamiques potentiels identifiées au niveau du diagramme de Campbell, voir Figure 2.3, et à 20% lorsqu'on est hors de ces zones. Pour un moteur en exploitation, on utilise les valeurs d'endurance limite obtenues aux essais.

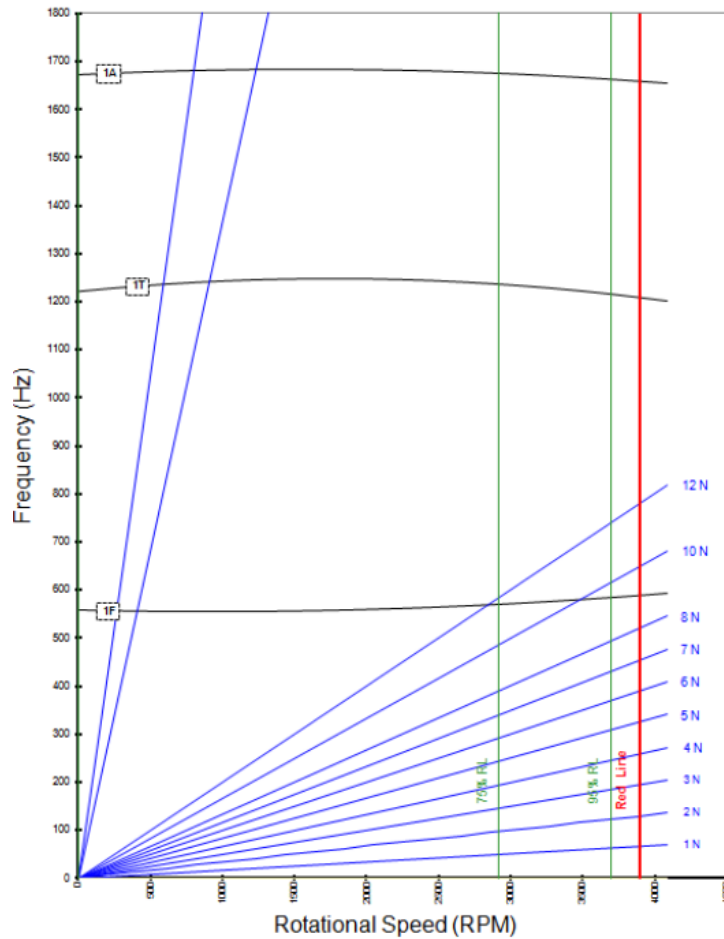


FIGURE 2.3 – Diagramme de Campbell d’une roue mobile du Leap-1A/C. - Source : Rapport de calcul [2].

On constate bien que pour la plage de vitesses de rotation du booster, les premiers modes sont excités par des fréquences très élevées.

Les charges de manoeuvre, l’effet du balourd résiduel et la déformée statique du FHF ainsi que le jeu de roulement nécessitent un modèle complet du moteur. Ce travail ne peut donc pas être effectué chez Safran AB. Les résultats sont des données d’interface qui sont fournies par le motoriste. Ces données nous sont fournies sous la forme de consommations sur 360 degrés pour différentes phases et scénarios de vols, comme visible sur la Figure 2.4.

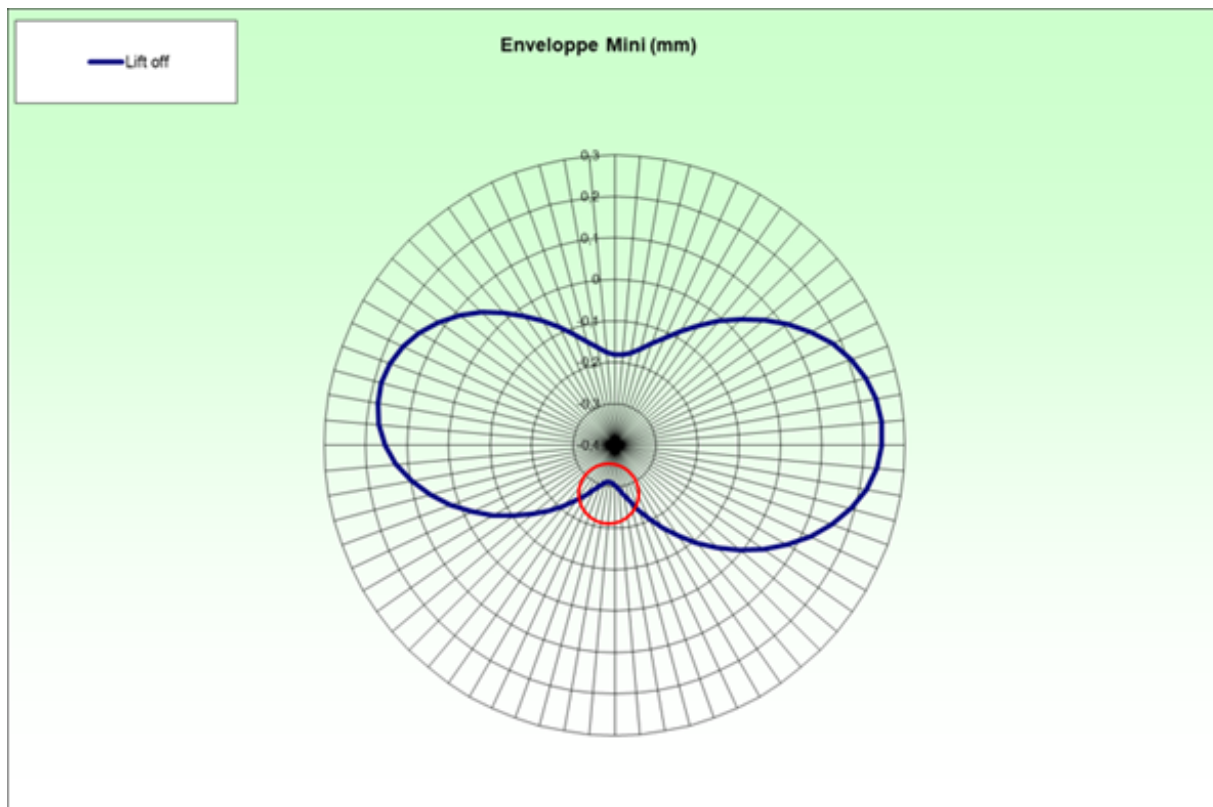


FIGURE 2.4 – Adders Leap-1A/C au régime « Lift-off » - Source : Manuel Interne [5].

L'ovalisation et le comportement vibratoire des roues mobiles sont les seuls sous termes de Adders qui sont directement calculés en interne chez Safran AB. La méthodologie précise du calcul d'ovalisation sera détaillée plus tard dans la Section 3.2.

Chapitre 3

Approche statistique

L'objectif principal du stage est, comme dit précédemment, d'apporter un aspect statistique à la prédiction des jeux plutôt que de sommer linéairement les différents termes, ce qui semble être fort conservatif. Pour ce faire, nous allons essayer de déterminer des distributions statistiques pour nos différents éléments (tolérances, ovalisation, adders,...).

3.1 Tolérances

Nous allons essayer de coller une distribution sur le terme Tol_{radial} sur base de données reprenant les jeux nominaux et leurs dimensions réelles. Des données pour une cinquantaine de moteurs ont pu être récupérées. Ces données se présentent sous la forme de tableaux *Excel* reprenant pour plusieurs cotes ; la cote nominale, la tolérance de cette cote et la cote réelle. Un tel tableau est visible sur la Figure 3.1.

	A	B	C	D	E	F	
1		OF	OP				
2	L362-000-201	402013	200	12:28:20	03-Feb-2015		
3	REF	DIMENSION	ACTUEL	NOMINAL	HI-TOL	LO-TOL	
4	F102-A-R	HT	210,609	210,495	1,252	-1,252	
5	F102-A-R	HT	210,603	210,495	1,252	-1,252	
6	F102-A-R	HT	210,607	210,495	1,252	-1,252	
7	F102-A-R	HT	210,61	210,495	1,252	-1,252	
8	F102-A-R	HT	210,616	210,495	1,252	-1,252	
9	F102-A-R	HT	210,617	210,495	1,252	-1,252	
10	F102-A-R	HT	210,623	210,495	1,252	-1,252	
11	F102-A-R	HT	210,634	210,495	1,252	-1,252	
12	F102-A-R	HT	210,643	210,495	1,252	-1,252	
13	F102-A-R	HT	210,64	210,495	1,252	-1,252	
14	F102-A-R	HT	210,633	210,495	1,252	-1,252	
15	F102-A-R	HT	210,616	210,495	1,252	-1,252	
16	F37-A-R	HT	315,054	314,88	1,252	-1,252	
17	F37-A-R	HT	315,057	314,88	1,252	-1,252	
18	F37-A-R	HT	315,058	314,88	1,252	-1,252	

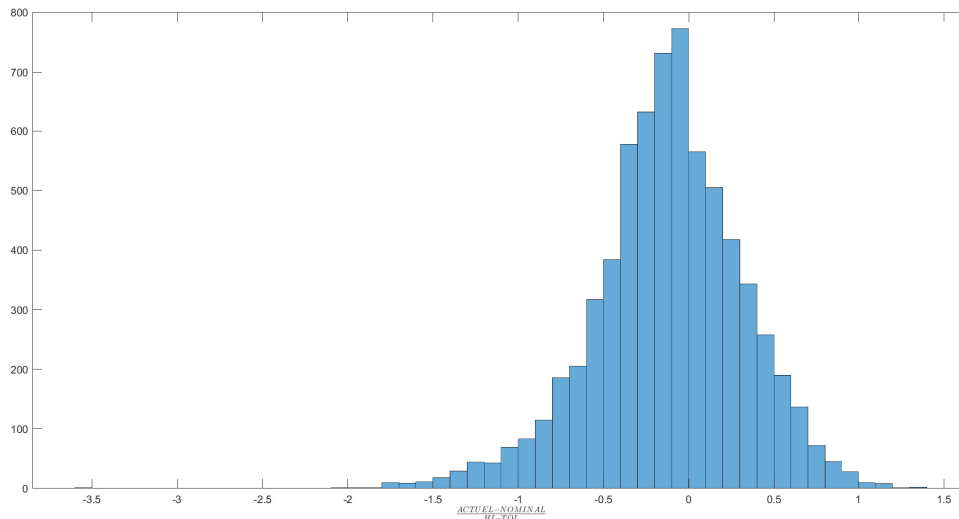
FIGURE 3.1 – Tableau de relevés de cotes au montage.

Les cotes sont séparées en cotes stator/rotor et en cotes radiale/axiale. Ce travail s'intéressera

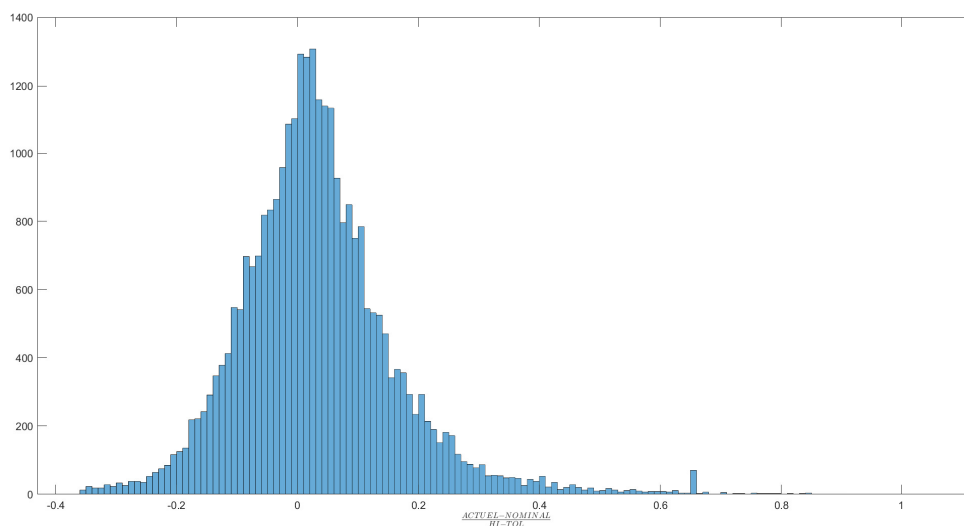
seulement à la distribution des cotes radiales autour de leur valeur nominale par rapport à la tolérance. Nous disposons du relevé précis de plusieurs milliers de cotes, précisément 29513 pour le rotor et 6824 pour le stator. Nous avons donc largement assez de données pour en tirer une distribution statistique pertinente. En reprenant la dénomination de la Figure 3.1, on calcule donc :

$$x = \frac{\text{ACTUEL} - \text{NOMINAL}}{\text{HI-TOL}}. \quad (3.1)$$

On obtient ainsi les deux histogrammes visibles sur la Figure 3.2.



(a) Histogramme de la distribution des cotes pour le stator.



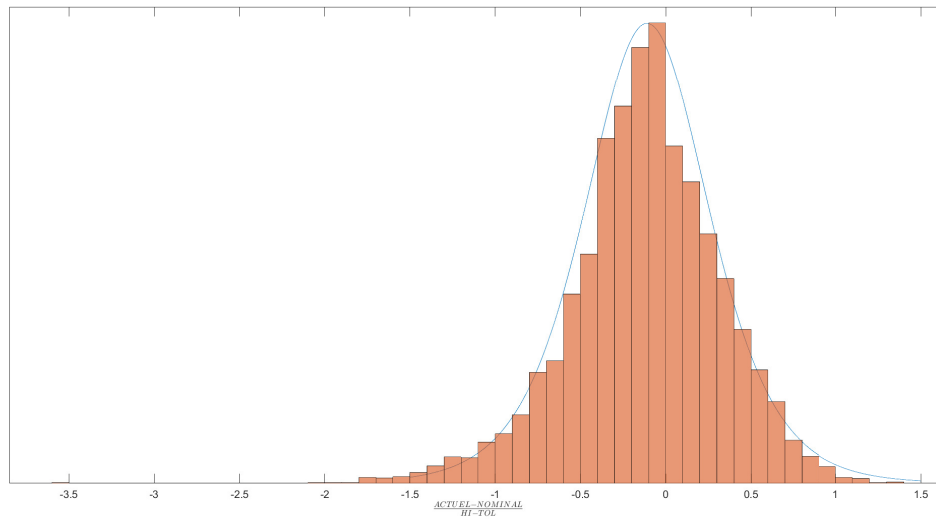
(b) Histogramme de la distribution des cotes pour le rotor.

FIGURE 3.2 – Histogrammes des distributions des cotes.

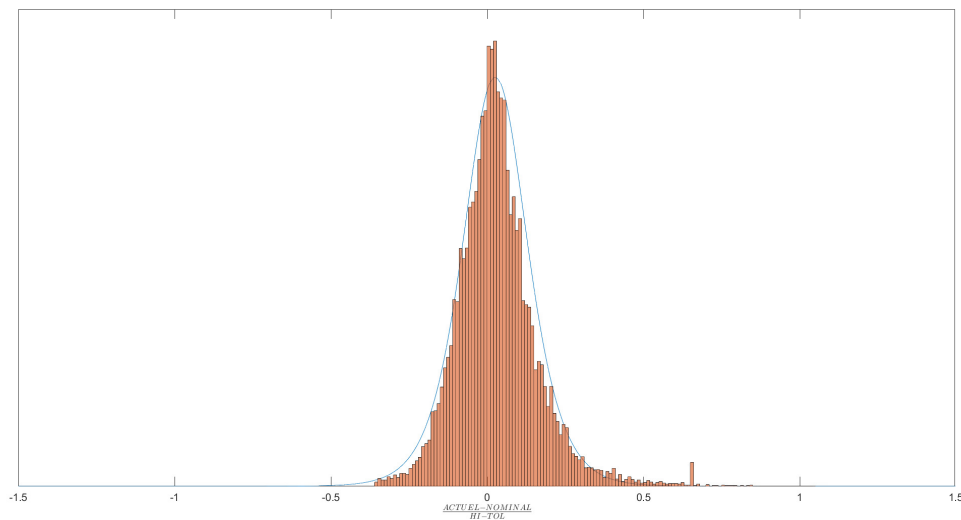
Les deux distributions semblent, assez logiquement, suivre une normale centrée sur zéro. Nous allons tout de même vérifier quelle distribution correspond le mieux avec nos valeurs. Pour ce faire, nous allons utiliser le critère d'information d'Akaike, développé dans le livre [1]. Ce critère se définit par

$$\text{AIC} = 2k - 2 \ln L, \quad (3.2)$$

où k est le nombre de paramètres à estimer du modèle et L est le maximum de la fonction de vraisemblance du modèle. En effet, lorsqu'on estime un modèle statistique, il est possible d'augmenter la vraisemblance du modèle en ajoutant un paramètre. Le critère d'information d'Akaike permet de pénaliser les modèles en fonction du nombre de paramètres afin de satisfaire le critère de parcimonie. On choisit alors le modèle avec le critère d'information d'Akaike le plus faible. Il est donc possible, grâce à ce critère, de tester toute une série de distributions ('normal', 'logistic', 'exponential', 'gamma', 'weibull') sur nos données. Selon ce critère, la distribution qui colle le mieux à nos données est, dans les deux cas, une logistique centrée sur zéro et avec un paramètre s valant respectivement 0.2428 et 0.0687. Ci-dessous sur la Figure 3.3, on peut voir une superposition des histogrammes et de la distribution logistique qui colle le mieux à ces données.



(a) Superposition histogramme de la distribution des cotes pour le stator avec une loi statistique λ avec $\mu = 0$ et $s = 0.2428$.



(b) Superposition histogramme de la distribution des cotes pour le rotor avec une loi statistique λ avec $\mu = 0$ et $s = 0.0687$.

FIGURE 3.3 – Superposition des histogrammes des distributions des cotes avec les lois logistiques.

La distribution des cotes du stator est plus large que pour le rotor étant donné qu'il s'agit d'un assemblage de pièces et pas d'une pièce tournée comme le rotor. Les tolérances de fabrication des différentes pièces se "cumulent". Le terme "tolérances" est relatif à la consommation de jeux créée par la variance géométrique du rotor et du stator.

3.2 Ovalisation

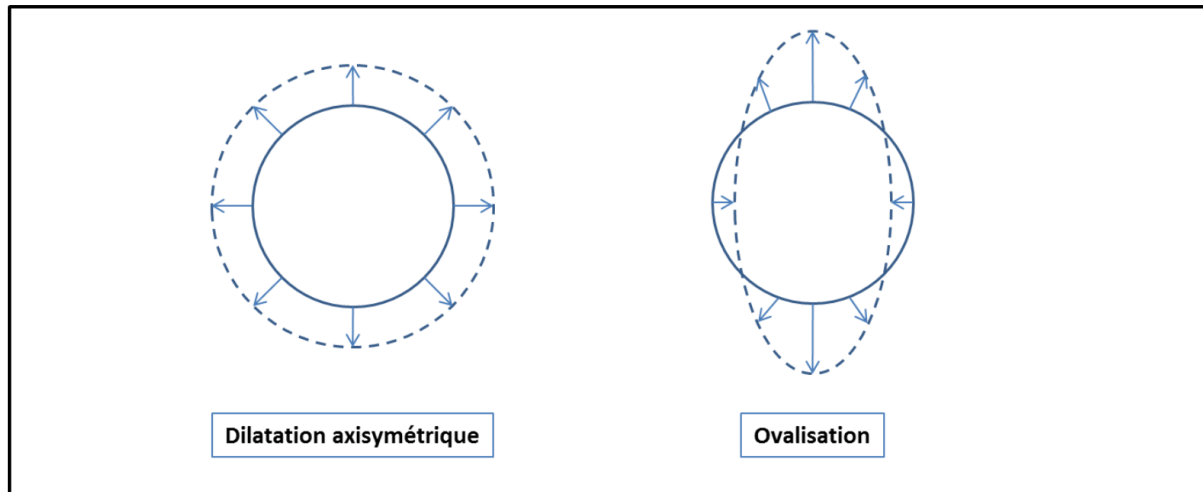


FIGURE 3.4 – Schéma de principe de l'ovalisation - Source : Méthodologie interne [6].

Un autre terme important dans le calcul des jeux est celui relatif à l'ovalisation. Dans l'équation générale, ce terme est caché dans Adders. L'ovalisation du tambour s'explique par plusieurs éléments :

- Sur chaque étage du tambour, le montage des aubes est bloqué par deux verrous. Ces derniers engendrent une augmentation locale de masse sur le tambour, provoquant ainsi un balourd. Pour mieux visualiser cela, un schéma explicatif est visible sur la Figure 3.5.

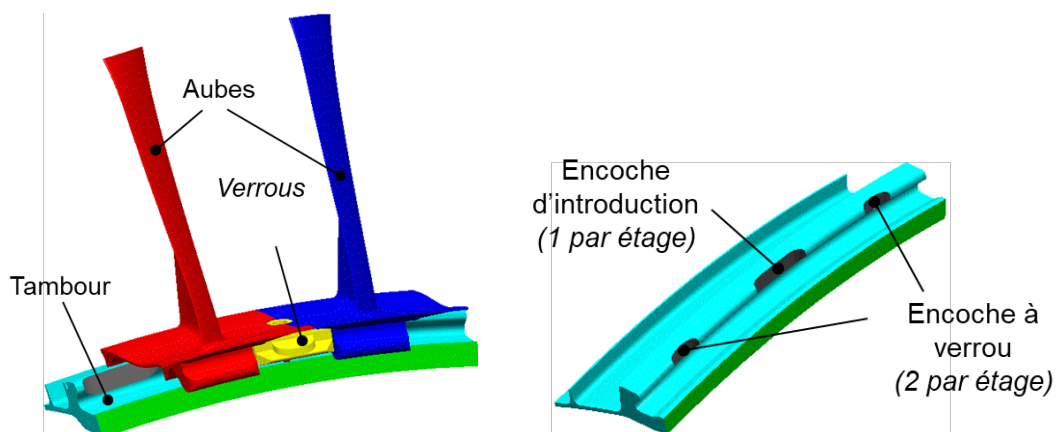


FIGURE 3.5 – Système de blocage et encoche d'introduction pour les aubes et les verrous - Source : Mini Formation [4].

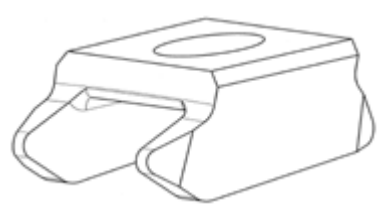
En face des verrous, une masse de compensation peut être placée afin de compenser le balourd. Ceci n'est pas fait sur le Leap1A. Ce système verrous/masses de compensation crée une distribution de masse non axisymétrique qui provoque une ovalisation.

- La dispersion massique des aubes engendre également un balourd. Pour limiter cela, les aubes sont pesées et divisées en lots allant des aubes les plus légères aux plus lourdes. Ces dernières sont ensuite réparties en 4 pôles afin de minimiser le balourd généré, voir Figure 3.9. Cette variation de masse des aubes sur la circonférence va également ovaliser le rotor.
- L'équilibrage final du rotor est réalisé à l'aide de masses d'équilibrage montées sur le dernier étage pour contrebalancer le balourd résiduel. Ces dernières contribuent à ovaliser davantage le tambour.

Ce calcul est réalisé sur une coupe 2D sur laquelle différentes charges sont appliquées :

- Vitesse de rotation (en général, on réalisera le calcul au régime RL)
- Champ de température sur le modèle complet
- Verrous (disposition, masse,...)
- Aubes (répartition de masse, dispersion,...)
- Masse(s) de compensation éventuelle(s)
- Masse(s) d'équilibrage éventuelle(s)

L'ingénieur en charge de l'étude des jeux devra définir une configuration optimale afin de représenter au mieux l'ensemble de la flotte de moteurs. La définition de la position de la (des) masse(s) d'équilibrage doit être déterminée afin de couvrir la majorité des cas pouvant être rencontrés par le booster. Cette étude devra être réalisée en accord avec les spécifications d'équilibrage du booster. Dans le dimensionnement des jeux actuels, seul un cas d'ovalisation jugé représentatif est utilisé. Nous allons donc essayer de trouver une distribution à ce terme ovalisation. Nous allons encore une fois travailler avec le moteur Leap-1A, ce moteur est équilibré grâce à une/des masse(s) d'équilibrage en forme de pied d'aube qui sont insérées entre deux pales dans les alvéoles du tambour sur le dernier étage d'aubes. Cela ajoute donc de la matière ponctuellement sur la circonférence. La distribution non-uniforme de la masse entraîne, en rotation, un effort centrifuge non uniforme et donc une déformée asymétrique de la pièce, voir Figure 3.4. Si nous considérons une dispersion massique des aubes constante de 3%, valeur issue de l'expérience, la seule inconnue dans le calcul de l'ovalisation est donc la prise en compte du nombre, de la masse et de la position angulaire des masselottes d'équilibrage étant donné que le balourd résiduel à compenser est imprévisible. Les masselottes d'équilibrage ont une masse et une taille prédéfinie et il existe, dans le cas du Leap-1A, seulement 5 références utilisables, voir Figure 3.6.



Ref	Masse [g]
1	2.68
2	3.47
3	4;17
4	4.75
5	5.33

FIGURE 3.6 – Références des différents masses d'équilibrage en forme de pied d'aube pour le Leap1A - Source : Manuel Interne [6].

Comme dit précédemment, le calcul d'ovalisation est réalisé en interne à l'aide du logiciel *AnsysWorkbench* sur une coupe 2D du rotor. La coupe 2D est une géométrie fournie par les dessinateurs sous la forme d'un fichier *Catia*, voir Figure 3.7.

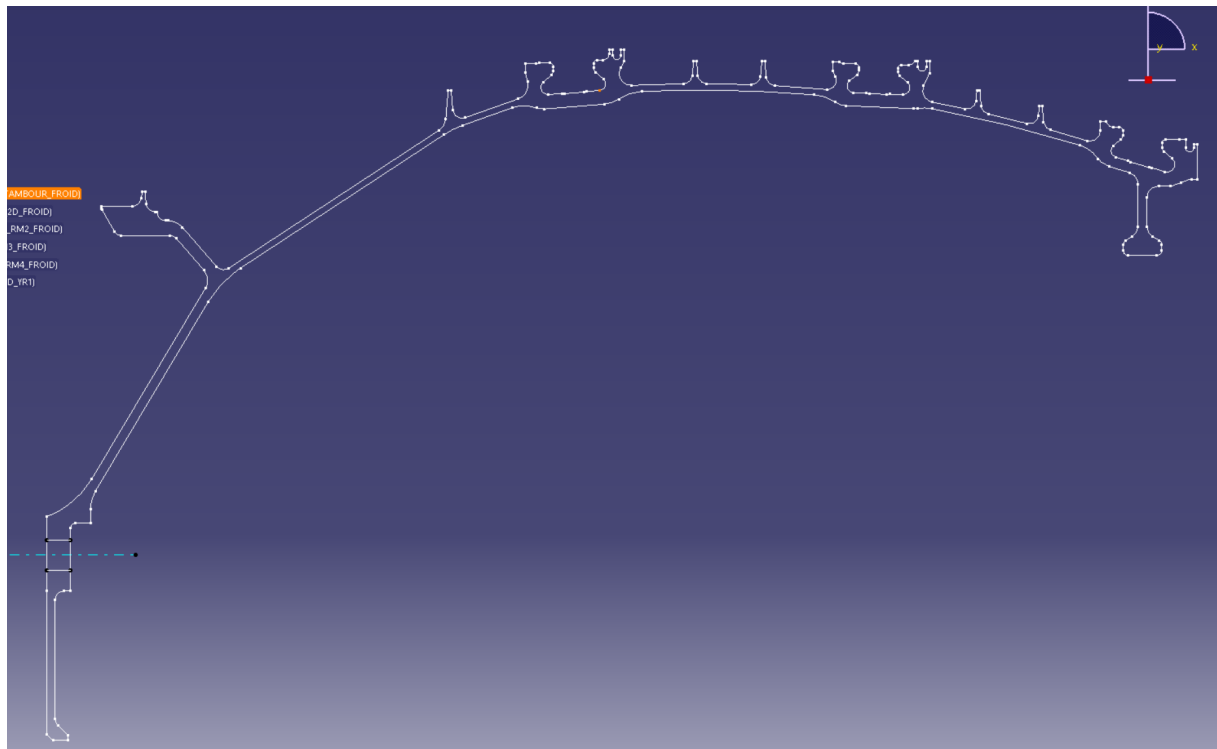


FIGURE 3.7 – Géométrie 2D du tambour sur Catia.

La pièce est divisée en différentes "named selections" sur *Workbench*, ce qui permet d'imposer des tailles de mailles, conditions aux limites et matériaux spécifiques sur les différentes zones de la géométrie. Les matériaux sur *Workbench* sont gérés à travers "Engineering Data", où les bibliothèques de matériaux sont importées pour être utilisées dans le modèle. Ces "Engineering Data" sont fournies par le département matériaux. Ensuite, il reste à générer notre maillage, celui-ci sera réalisé avec des quadrilatères explicites du second degré et en suivant les recommandations internes de Safran AB détaillées dans la Table 3.1 & 3.2 ci-dessous.

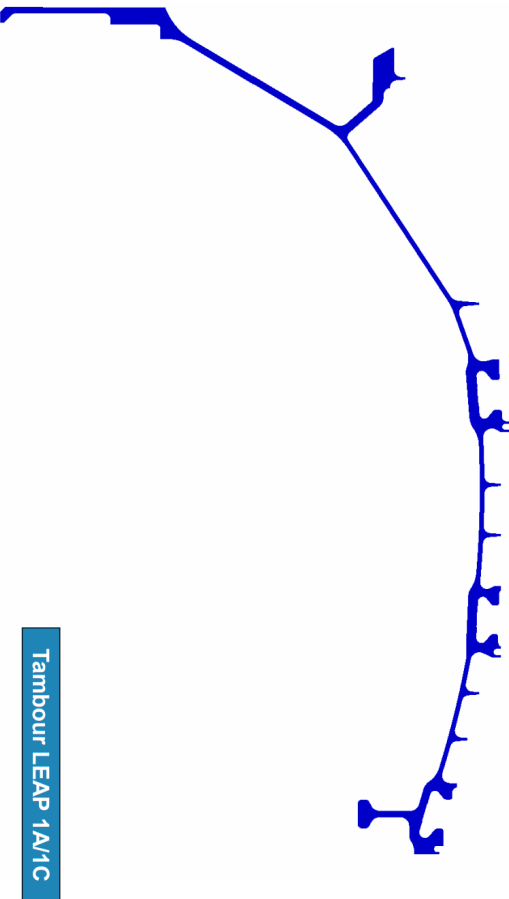
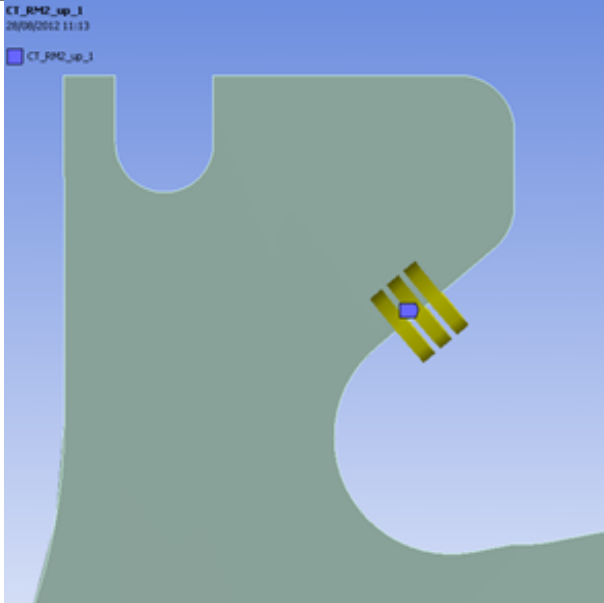
	<h3>Méthode Automatique</h3> <p>Pour chaque le corp du tambour, on utilise le maillage automatique de "Ansys Mechanical" avec les options :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Scope</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Scoping Method</td> <td>Named Selection</td> </tr> <tr> <td>Named Selection</td> <td>WB_Drum_1</td> </tr> <tr> <th colspan="2">Definition</th> </tr> <tr> <td>Suppressed</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>Method</td> <td>Quadrilateral Dominant</td> </tr> <tr> <td>Element Midside Nodes</td> <td>Kept</td> </tr> <tr> <td>Free Face Mesh Type</td> <td>All Quad</td> </tr> </tbody> </table>	Scope		Scoping Method	Named Selection	Named Selection	WB_Drum_1	Definition		Suppressed	No	Method	Quadrilateral Dominant	Element Midside Nodes	Kept	Free Face Mesh Type	All Quad						
Scope																							
Scoping Method	Named Selection																						
Named Selection	WB_Drum_1																						
Definition																							
Suppressed	No																						
Method	Quadrilateral Dominant																						
Element Midside Nodes	Kept																						
Free Face Mesh Type	All Quad																						
	<h3>Maillage des bords</h3> <p>La zone de contact entre le tambour et la base du pied de l'aube doit être maillée avec 6 éléments avec les options :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Scope</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Scoping Method</td> <td>Named Selection</td> </tr> <tr> <td>Named Selection</td> <td>WB_CT_Drum_R2_up_1</td> </tr> <tr> <th colspan="2">Definition</th> </tr> <tr> <td>Suppressed</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>Type</td> <td>Number of Divisions</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Number of Divisions</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Behavior</td> <td>Soft</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle</td> <td>Default</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Growth Rate</td> <td>Default</td> </tr> <tr> <td>Bias Type</td> <td>No Bias</td> </tr> </tbody> </table>	Scope		Scoping Method	Named Selection	Named Selection	WB_CT_Drum_R2_up_1	Definition		Suppressed	No	Type	Number of Divisions	<input type="checkbox"/> Number of Divisions	3	Behavior	Soft	<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default	<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default	Bias Type	No Bias
Scope																							
Scoping Method	Named Selection																						
Named Selection	WB_CT_Drum_R2_up_1																						
Definition																							
Suppressed	No																						
Type	Number of Divisions																						
<input type="checkbox"/> Number of Divisions	3																						
Behavior	Soft																						
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default																						
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default																						
Bias Type	No Bias																						

TABLE 3.1 – Méthodologie pour le maillage.

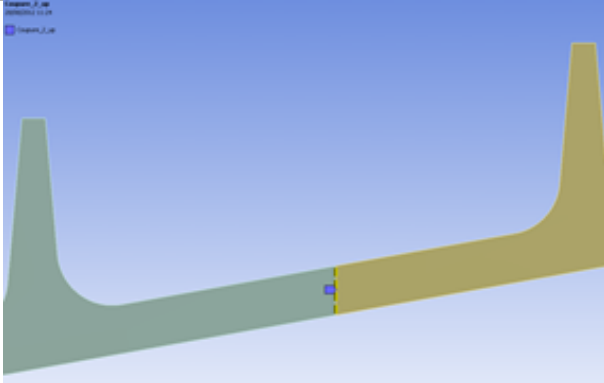
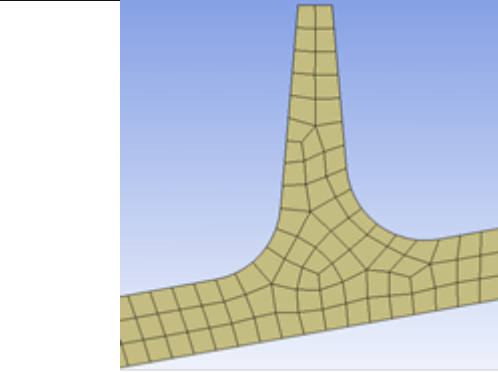
	<p>Pour guider le maillage le long du tambour 2D, un certain nombre de divisions seront imposées aux interfaces. Quatre éléments seront appliqués sur les sélections nommées correspondantes.</p>
	<p>Vérifiez que au moins 2 éléments sont présents dans les parties plus fines du tambour, telles que les lèchettes. De plus, le maillage doit suivre la bordure tout le long de la géométrie, comme indiqué dans l'image suivante.</p>

TABLE 3.2 – Suite méthodologie pour le maillage.

Nous nous assurons finalement que la majorité des éléments ait un "Aspect" et un "Jacobian" ratio < 100 . Il nous reste à implémenter les conditions aux limites pour l'ovalisation. Détaillons les rapidement ci dessous :

- **Fixations** : Les noeuds qui appartiennent aux groupes relatifs aux points de fixation du booster à l'arbre du moteur sont fixés en translation.
- **Liens** : Le modèle du tambour est constitué de plusieurs parties. Des découpes ont été effectuées à différents endroits, ce qui signifie qu'il y a un noeud à chaque bordure de ces découpes. Des liaisons noeud à noeud sont imposées dans chaque direction de translation entre les noeuds se correspondant.
- **Température** : Le champ de température nous est fourni sous la forme d'un fichier ".mailther" par le département thermodynamique de Safran AE. On doit interpoler le champ de température de Safran AE avec notre maillage. Il faut être prudent avec ce type d'interpolation. En effet, la qualité de l'interpolation dépend de la correspondance entre notre modèle et celui de Safran AE. Si les modèles ne sont pas totalement les mêmes, le champ de température pourrait être distordu, voir Figure 3.8

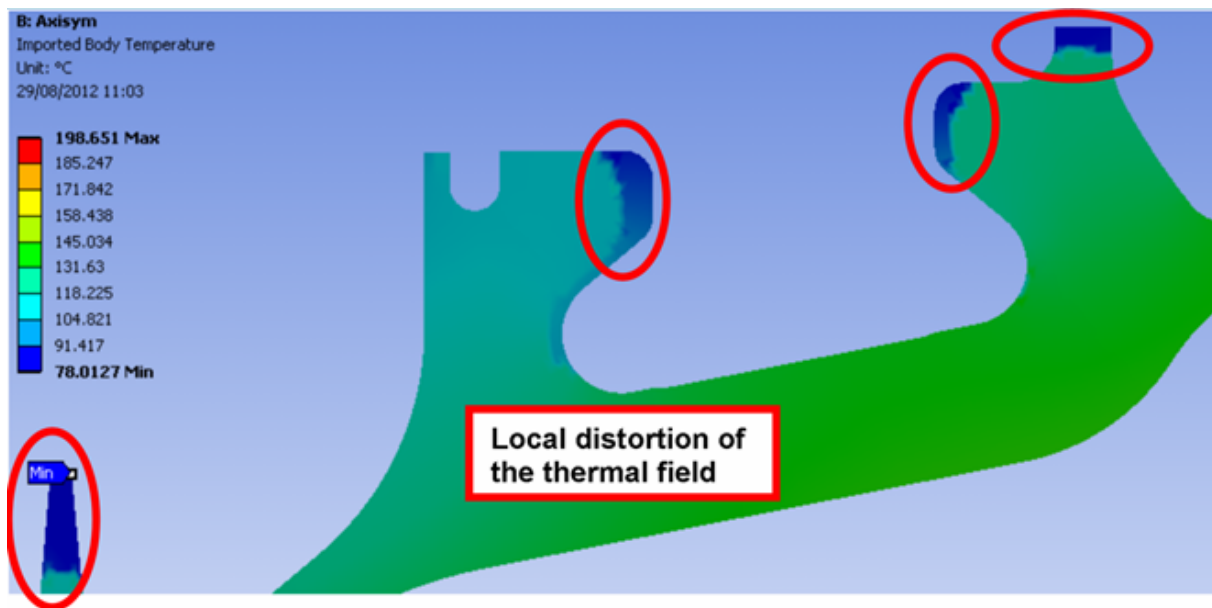


FIGURE 3.8 – Distorsion dans le champ de température - Source : Manuel Interne [6].

- **Charges asymétriques** : Une distribution asymétrique des masses implique des forces asymétriques sur le tambour. Celles-ci sont proportionnelles à la vitesse de rotation et ont des origines différentes qui sont détaillées ici :
- **Dispersion massique des aubes** : Selon l'expérience la dispersion massique des aubes est de 3%. Pour limiter le balourd, celle-ci sont distribuées en 4 pôles, ce qui a tendance à déformer le tambour comme schématisé sur la Figure 3.9.

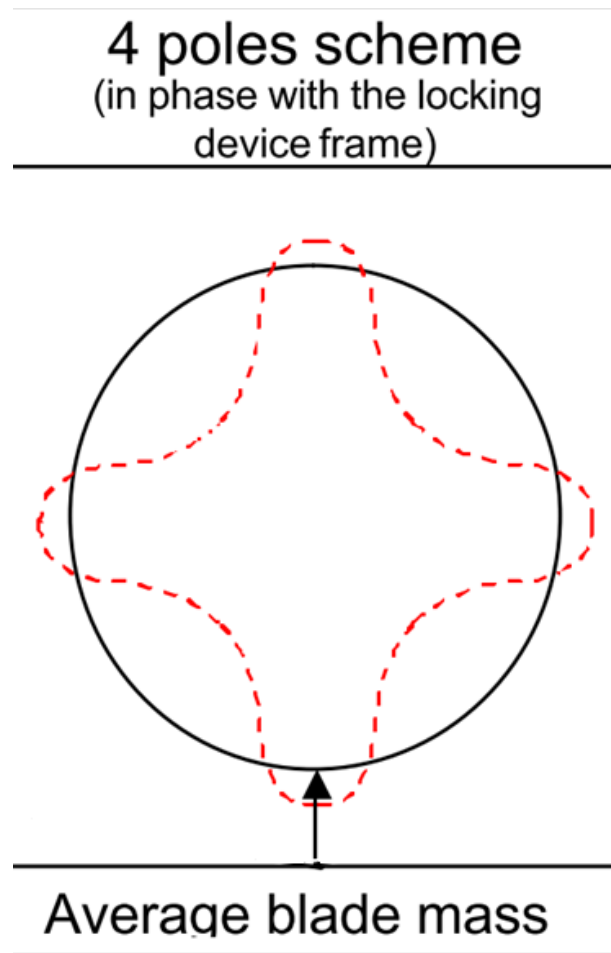


FIGURE 3.9 – Ovalisation créée par la distribution des masses des aubes - Source : Manuel Interne [6].

- **Blocage et masse de compensation** : La position des aubes est bloquée par un système de verrouillage, ce qui augmente localement la masse. Pour limiter le balourd, on place possiblement en face une masse de compensation pour rééquilibrer.
- **Masse d'équilibrage** : Finalement, quand tout le booster est assemblé, on mesure le balourd résiduel et on le compense avec une/plusieurs masse(s) d'équilibrage placée(s) sur le dernier étage d'aubes.

Les aubes n'étant pas modélisées, elles sont représentées par la méthode des "pressions", qui consiste à appliquer une pression uniforme sur la région de contact entre les alvéoles du tambour et la base du pied des aubes, voir Figure 3.10.

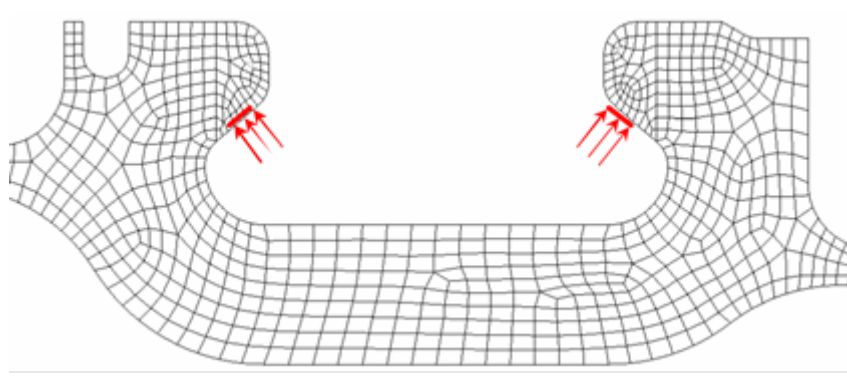


FIGURE 3.10 – Zone de contact entre tambour et pieds d’aubes - Source : Manuel Interne [6].

Les effets centrifuges de cette distribution non asymétrique de masse causent une distribution asymétrique de force. Celle-ci s’exprime donc comme une fonction angulaire appliquée à la région de contact base pieds/alvéole visible sur la Figure 3.11.

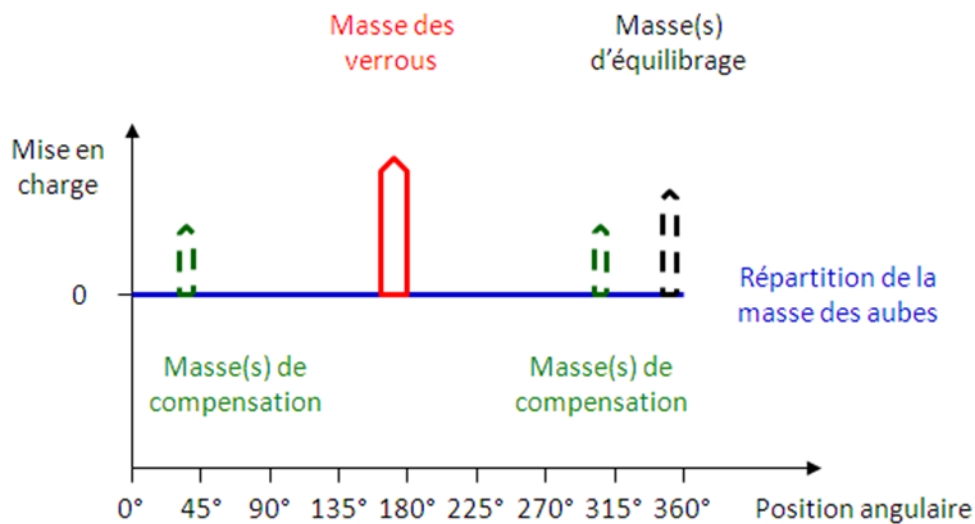


FIGURE 3.11 – Illustration de la modélisation du chargement à appliquer sur chacun des étages pour réaliser un calcul d’ovalisation du tambour - Source : Manuel d’étude [5].

Pour la résolution numérique, nous devons décomposer cette fonction en une série de Fourier. Pour ce faire un nombre d’harmoniques satisfaisant pour représenter la fonction est déterminé itérativement grâce au module *ASEF* du solveur *SAMCEF*, voir Figure 3.12.

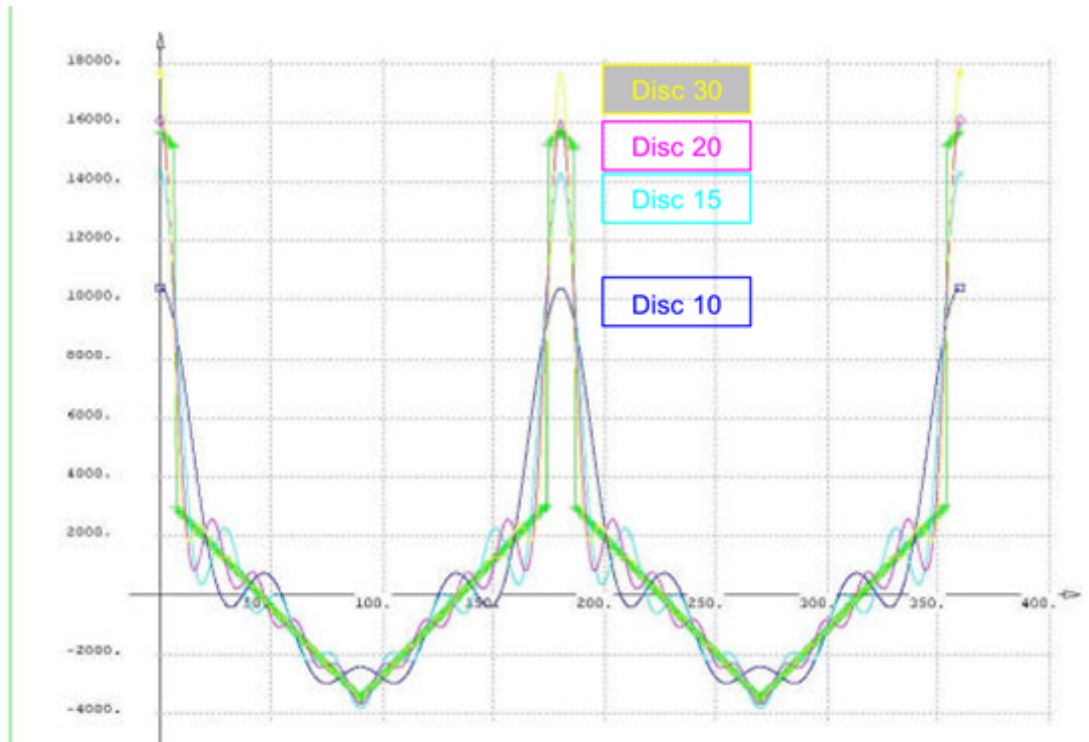


FIGURE 3.12 – Approximation de la fonction de charge par série de Fourier pour différents nombres d’harmoniques - Source : Manuel Interne [6].

Pour faciliter l’intégration de toutes ces charges, Safran AB utilise un template Excel qui prend en entrée les éléments suivants :

- Le nombre d’aubes
- La masse d’une seule aube
- La dispersion de la masse des aubes
- La masse d’un seul dispositif de verrouillage
- La masse de compensation (pour chaque étage)
- Le poids d’équilibrage (sur le dernier étage)
- La vitesse de rotation du moteur
- Le nombre d’éléments impliqués dans chaque région de contact tambour/base pied

Celui-ci génère automatiquement le code "BACON" représentant le chargement sur les zones de contacts. Il est important de mettre manuellement un coefficient de dilatation thermique nul et de mettre la vitesse de rotation à zéro sur *Ansys*. En effet, les effets de la force centrifuge et de la dilatation thermique sont déjà modélisés dans le terme $Conso_{axi}$ et serait sinon comptabiliser deux fois. Le nombre d’harmoniques à utiliser est déterminé automatiquement par le solver. Finalement, une fois le calcul réalisé, on récupère les déplacements aux points d’intérêts indiqués sur la Figure 3.13.

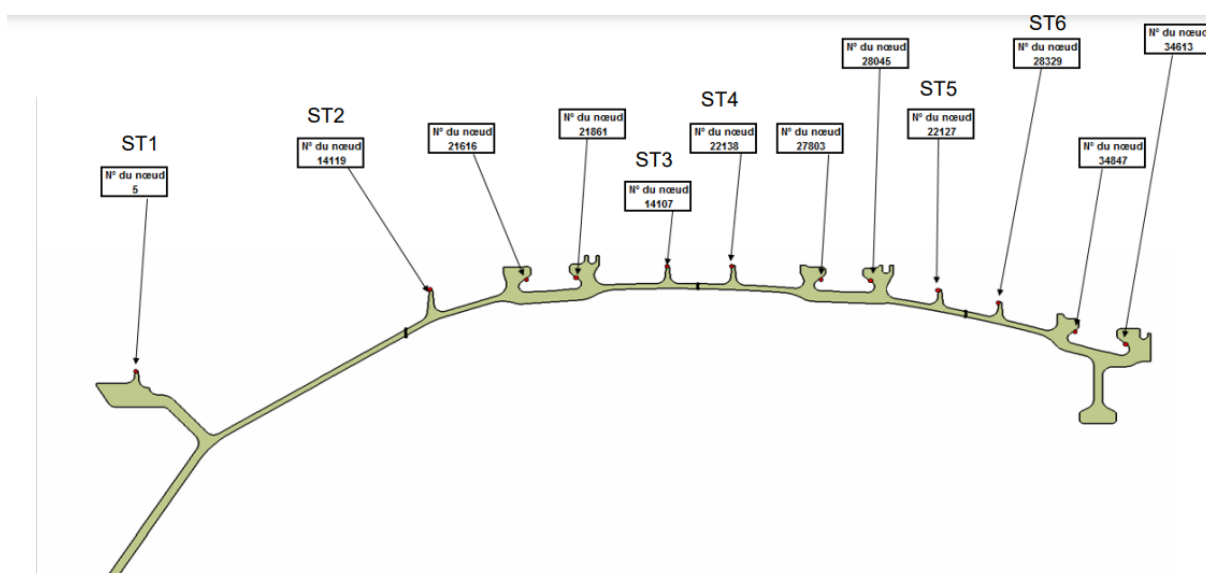


FIGURE 3.13 – Point de post-traitement des résultats du calcul d'ovalisation.

On peut donc avoir des graphiques représentant le déplacement sur toute la circonférence pour les différents points d'intérêt comme sur la Figure 3.14.

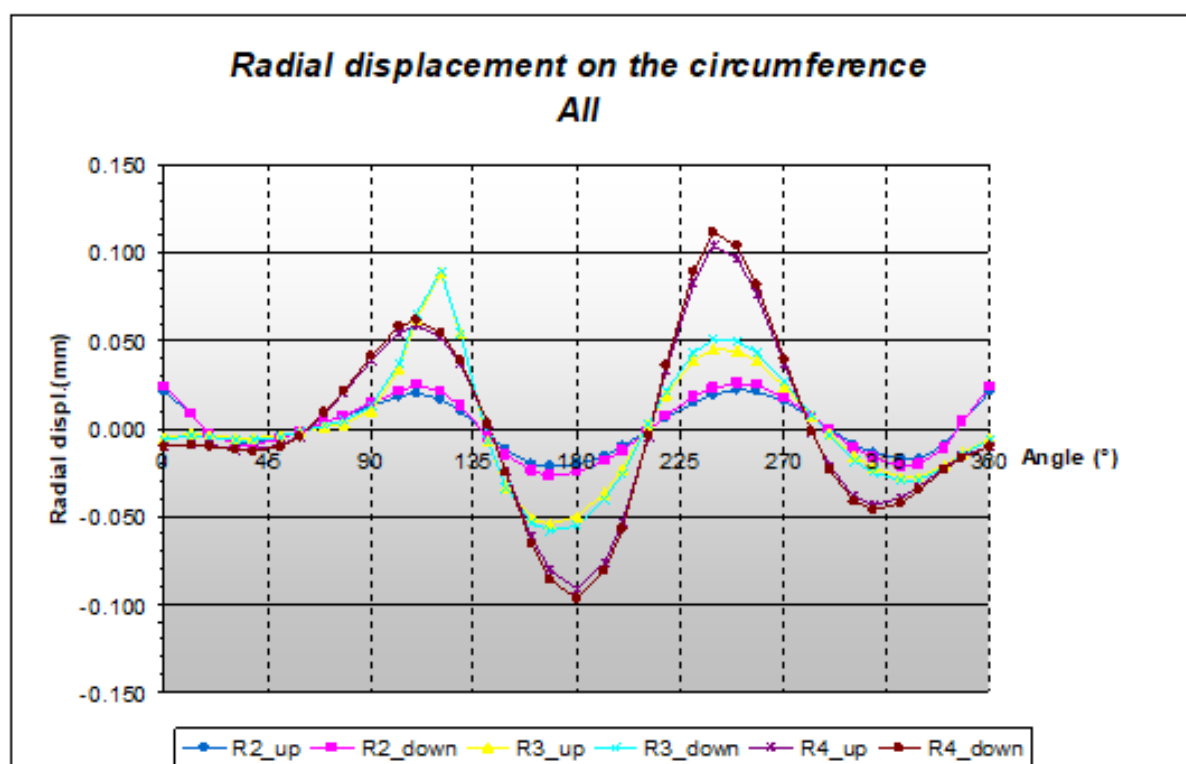


FIGURE 3.14 – Résultat typique d'un calcul d'ovalisation - Source : Manuel Interne [6].

Notre objectif est d'avoir une distribution à appliquer au terme ovalisation, nous pouvons, pour ce faire, lancer une série de simulations avec des positions, masses et nombres différents de masselottes d'équilibrage et ensuite attribuer une probabilité à chacun de ces cas. Cette solution, bien que fonctionnelle, serait bien trop chronophage. Il n'est en effet pas nécessaire de lancer autant de calculs étant donné le caractère linéaire des déformées. Nous pouvons lancer seulement :

- 1 calcul sans masse d'équilibrage

- 1 calcul avec 1 masse d'équilibrage de 10g à 0° et en considérant une masse nulle pour les aubes, les systèmes de blocage et les masses de compensation.

Il ne nous restera donc plus qu'à sommer et faire varier nos résultats linéairement pour simuler des positions et masses différentes. Pour nous assurer de la qualité des résultats de nos simulations, nous allons faire une étude de convergence du maillage avec un cas classique (toutes les masses prises en compte). Nous suivons les recommandations de Safran AB en augmentant progressivement le nombre d'éléments jusqu'à avoir une convergence du déplacement maximal. Cette étude est visible sur la Figure 3.15.

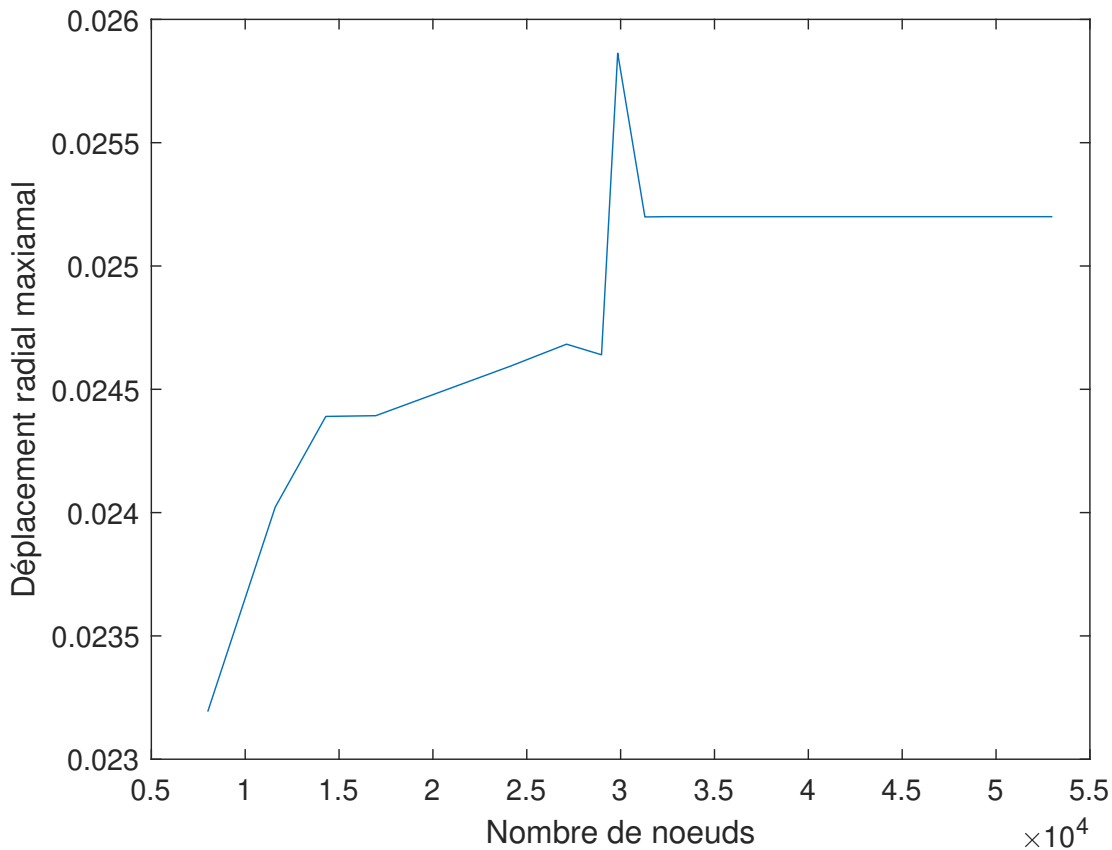


FIGURE 3.15 – Étude de convergence du maillage pour l'ovalisation.

Nous utiliserons donc un maillage dont les caractéristiques sont :

- Nombre de noeuds : 35140
- Nombre d'éléments : 10892
- Maillage de degré 2
- Taille de maille : 0.5 [mm]
- Maillage quadratique
- Le "Jacobian Ratio" se distribue comme sur la Figure 3.16.

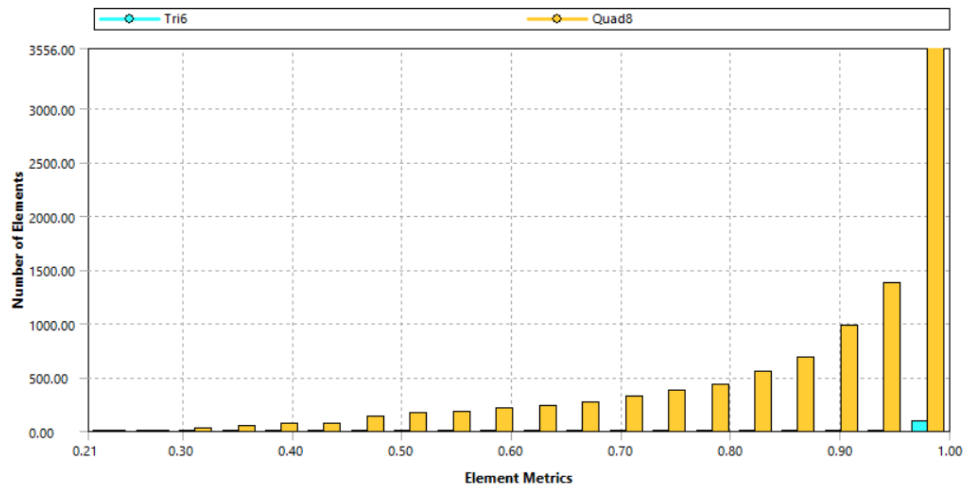


FIGURE 3.16 – Distribution du "Jacobian Ratio" du maillage.

— L'"Aspect Ratio" se distribue comme sur la Figure 3.17.

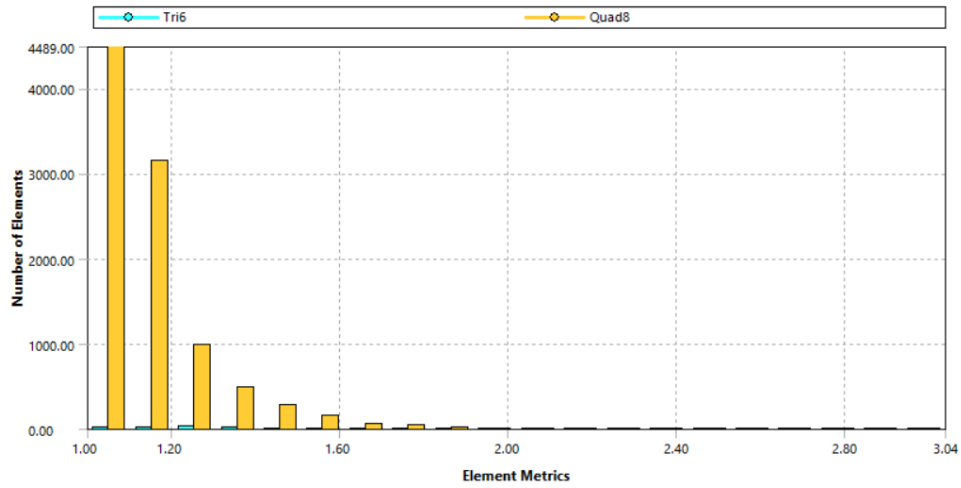


FIGURE 3.17 – Distribution de l'"Aspect Ratio" du maillage.

On peut voir sur la Figure 3.18 le maillage obtenu sur la structure et sur ses sous-parties sur la Figure 3.19.

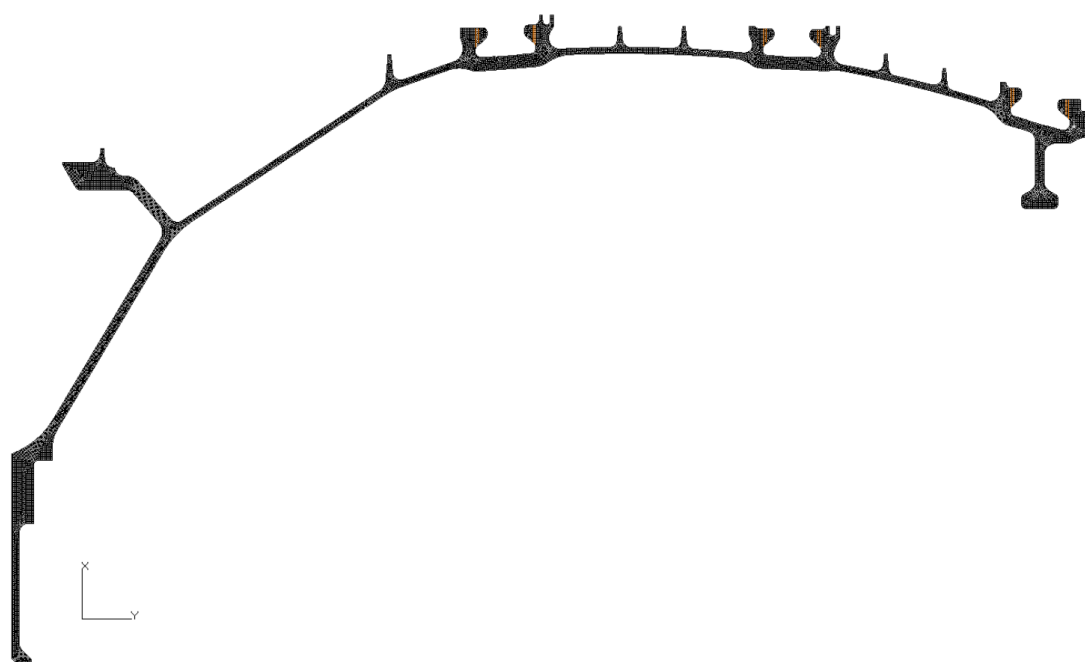
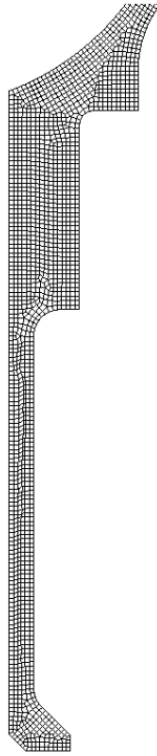
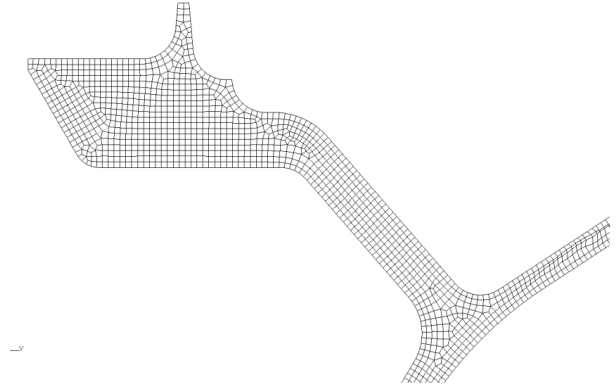


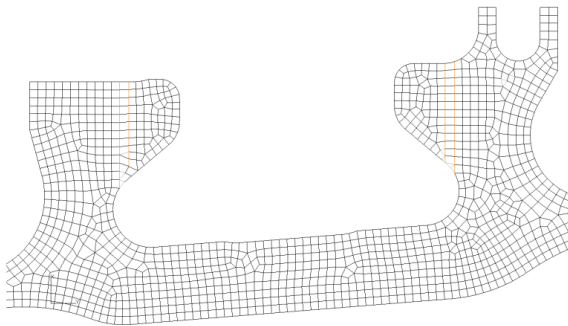
FIGURE 3.18 – Maillage du tambour.



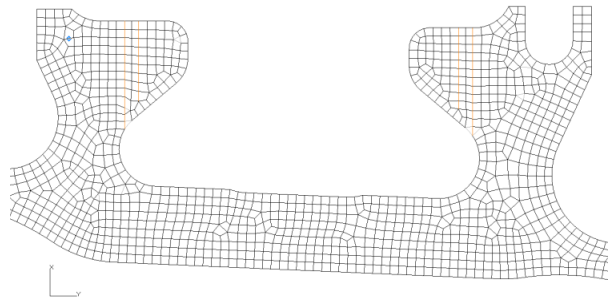
(a) Zoom sur le maillage de la bride amont.



(b) Zoom sur le maillage du support du "Fan".



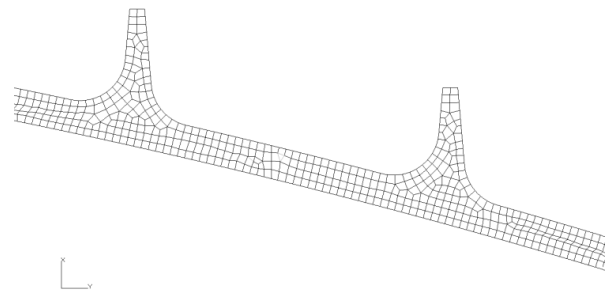
(c) Zoom sur le maillage au niveau de l'avéole du deuxième étage.



(d) Zoom sur le maillage au niveau de l'avéole du troisième étage



(e) Zoom sur le maillage au niveau de l'avéole du quatrième étage.

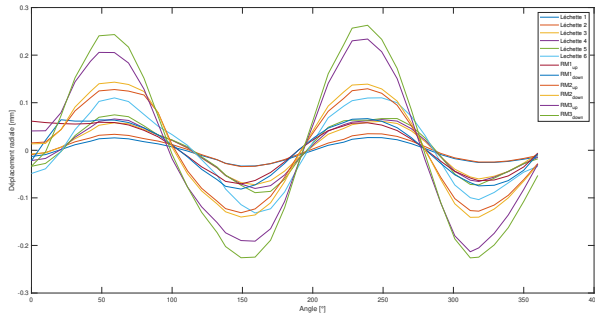


(f) Zoom sur le maillage au niveau du "voile".

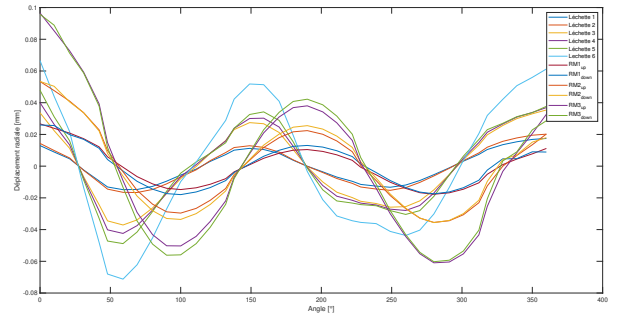
FIGURE 3.19 – Zoom sur le maillage des différentes sous-parties du tambour.

Nous obtenons donc les résultats de l'ovalisation pour notre cas sans masse d'équilibrage et l'ovalisation supplémentaire créée par une masse d'équilibrage de 10 grammes, voir

Figure 3.20.



(a) Ovalisation obtenue pour un booster sans masse d'équilibrage.



(b) Ovalisation créée par une masse d'équilibrage de 10[g] à 0°.

FIGURE 3.20 – Ovalisation sans masse d'équilibrage et par seulement une masse d'équilibrage.

Il nous suffit de sommer les résultats pour avoir l'ovalisation totale, voir Figure 3.21.

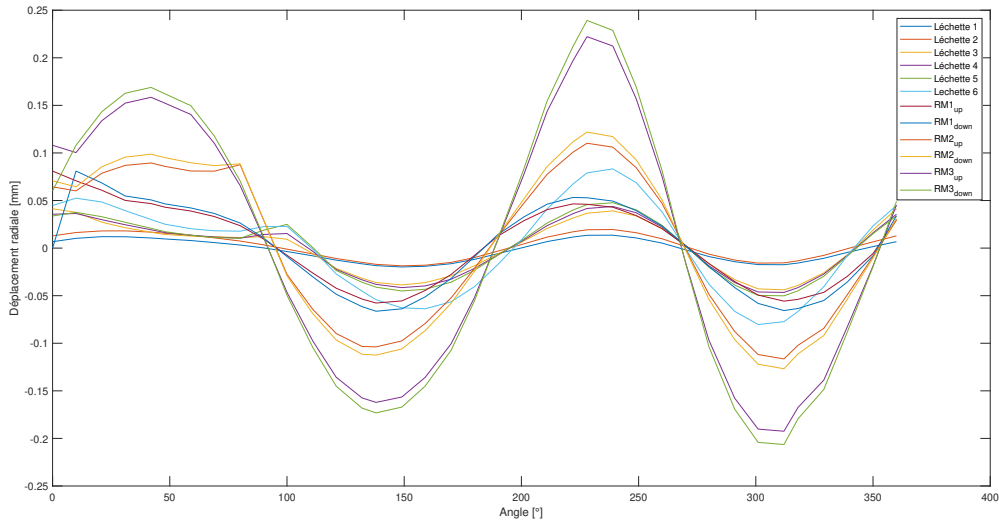


FIGURE 3.21 – Ovalisation totale.

Ensuite, pour simuler d'autres cas de masse d'équilibrage, il suffit de faire varier l'amplitude et la phase des résultats de l'ovalisation créée uniquement par la masse d'équilibrage de la Figure 3.20b. La masse des masselottes ne peut prendre que certaines valeurs données sur le plan de la Figure 3.6. Grâce à l'expérience, nous savons que l'on met généralement une ou deux masses d'équilibrage. Nous ne disposons pas de plus d'informations sur la fréquence d'utilisation précise des différentes masses d'équilibrage. Nous allons donc supposer que nous utilisons de manière équiprobable une ou deux masses d'équilibrage et que leur masse est aussi choisie de manière équiprobable dans l'ensemble des valeurs possibles. En faisant cela, on peut, pour chaque point de la Figure 3.13 avoir une distribution statistique du déplacement radial causé par l'ovalisation. Une telle distribution peut être représentée par une "heatmap" comme visible sur la Figure 3.22.

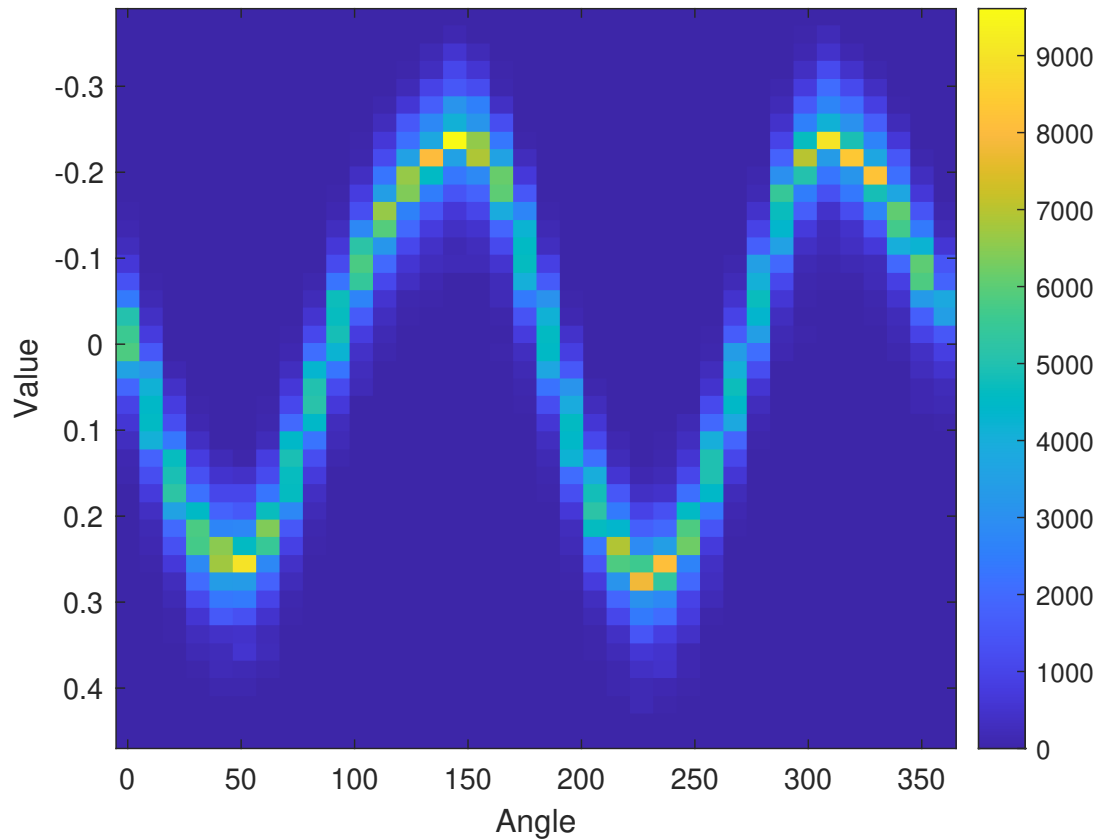


FIGURE 3.22 – Distribution des déplacements radiaux d’un des flancs d’une alvéole pour les différents cas d’ovalisation.

3.3 Adders

Les Adders restants reprennent donc les charges de manœuvre, les déformations du "Fan Hub Frame", les jeux dans les roulements et le balourd résiduel. Toutes ces déformations sont calculées chez le motoriste, les charges de manoeuvre nous sont transmises sous forme d’une enveloppe représentant la consommation de jeux sur 360 degrés. On ne va pas pouvoir dans ce cas lancer nous-mêmes plusieurs calculs en faisant varier des paramètres comme pour l’ovalisation du tambour, voir Section 3.2. Cependant, on peut s’intéresser à la précision des résultats qui nous sont fournis. Pour ce faire, nous disposons de fichiers de corrélation calculs/essais. Nous disposons de 5 tableaux "Excel", reprenant, pour 5 moteurs différents, la prédiction des jeux et la pénétration réelle relevée dans l’abradable. Une page d’un tel tableau est visible sur la Figure 3.23.

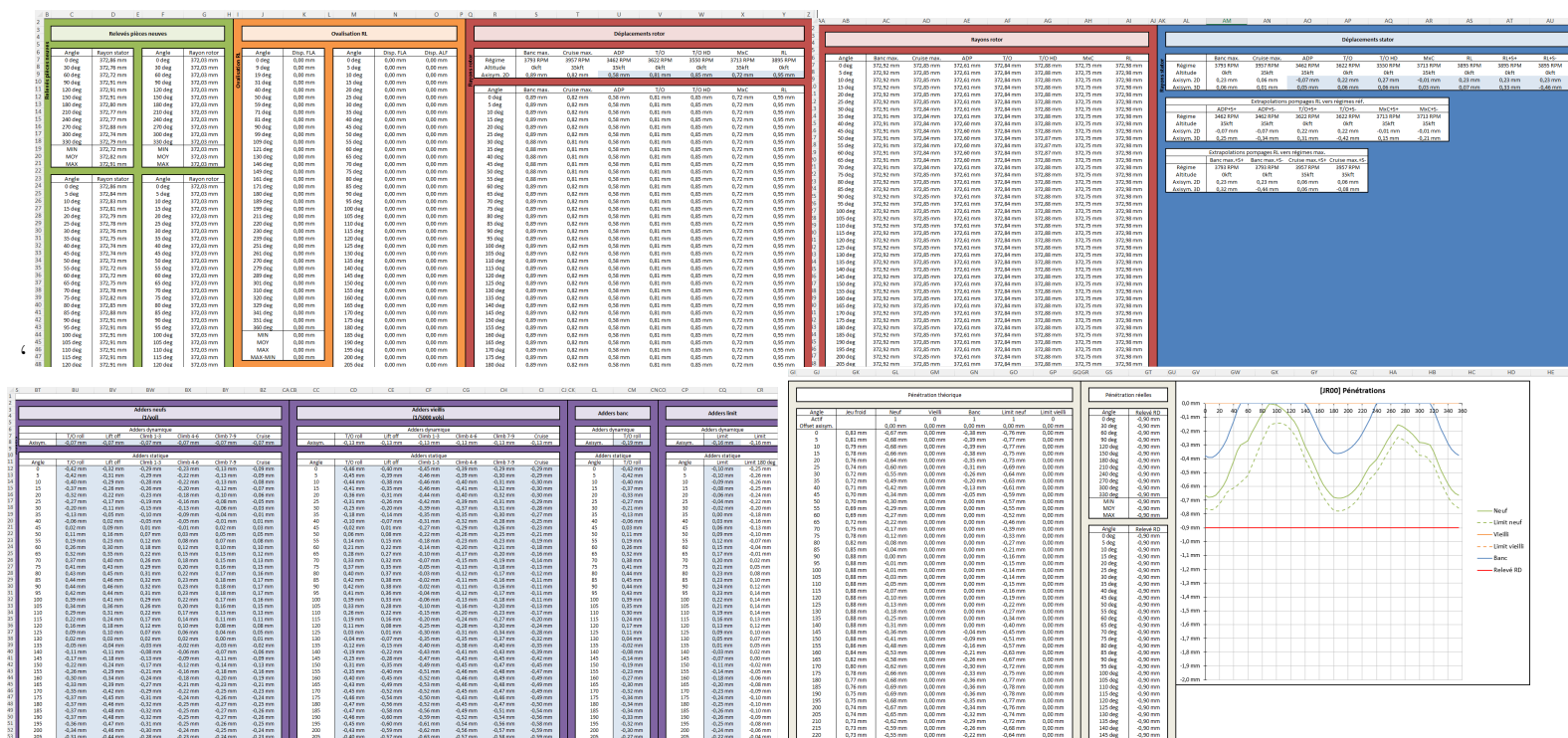


FIGURE 3.23 – Tableau de corrélation calculs-essais.

En analysant ces données, la première chose flagrante est qu'il n'y a pas de pénétrations relevées pour les *JR1Y*. Ensuite, pour les *JR0Y* (jeux entre léchéttes et abradable viole interne), il y a toujours une pénétration réelle relevée. Toute notre analyse se fera donc sur les *JR0Y* et les résultats seront également appliqués aux *JR1Y*. Nous pouvons commencer par calculer les écarts entre les prédictions et la réalité, pour les *JR0Y*, tels que :

$$\text{Ecart} = \text{Pénétration mesurée} - \text{Prédiction.} \quad (3.3)$$

On peut visualiser ces écarts sur un histogramme, voir Figure 3.24.

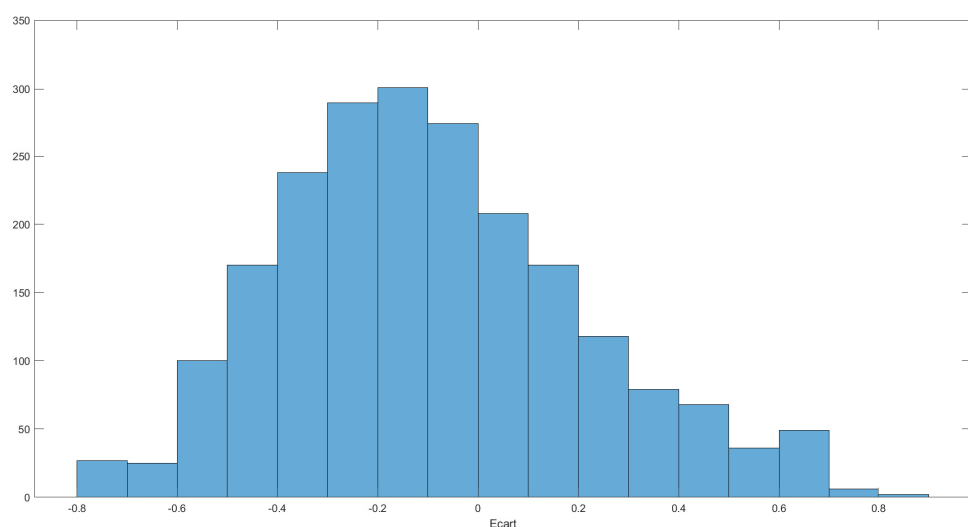


FIGURE 3.24 – Histogramme des écarts entre les pénétrations mesurées et les prédictions pour les JR0Y.

On constate que les écarts ont une moyenne de -0.039 et une variance de 0.0912 . Avant d'affirmer que ces écarts sont dus exclusivement à des imprécisions sur les Adders, nous allons les étudier plus en profondeur. Premièrement, nous traçons l'évolution de la pénétration réelle et de l'écart en fonction de la prédiction, cela est fait sur la Figure 3.25.

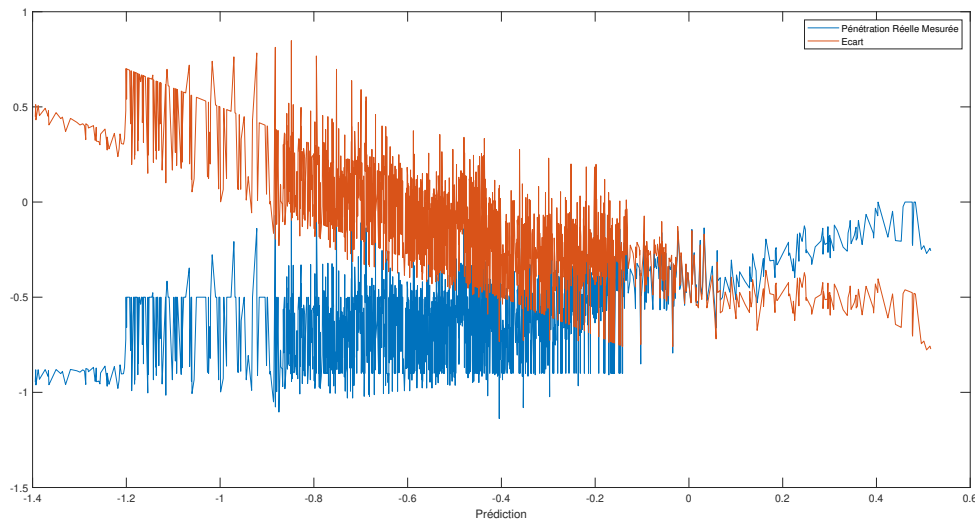


FIGURE 3.25 – Graphique de l'évolution de l'écart et de la pénétration réelle en fonction de la prédiction.

On constate que, pour des petites pénétrations prédites, on a tendance à sous estimer la profondeur de la pénétration réelle et que, pour les grosses pénétrations prédites, on a tendance à moins pénétrer que prévu. Plusieurs hypothèses pourraient expliquer ces courbes.

3.3.1 Mauvais positionnement des adders

La première hypothèse serait que les adders soient correctement calculés mais qu'ils subissent des "rotations". En effet, si les adders ont une forme cardioïdale, comme sur la Figure 2.4, une légère rotation de l'adders pourrait entraîner de gros écarts. Pour vérifier cette hypothèse, nous allons simplement recalculer les jeux en faisant varier l'orientation des adders de sorte à minimiser l'écart entre la prédiction et la pénétration réelle. Nous utiliserons la méthode des moindres carrés afin de minimiser l'écart. Des résultats typiques de cette opération sont visibles sur la Figure 3.26.

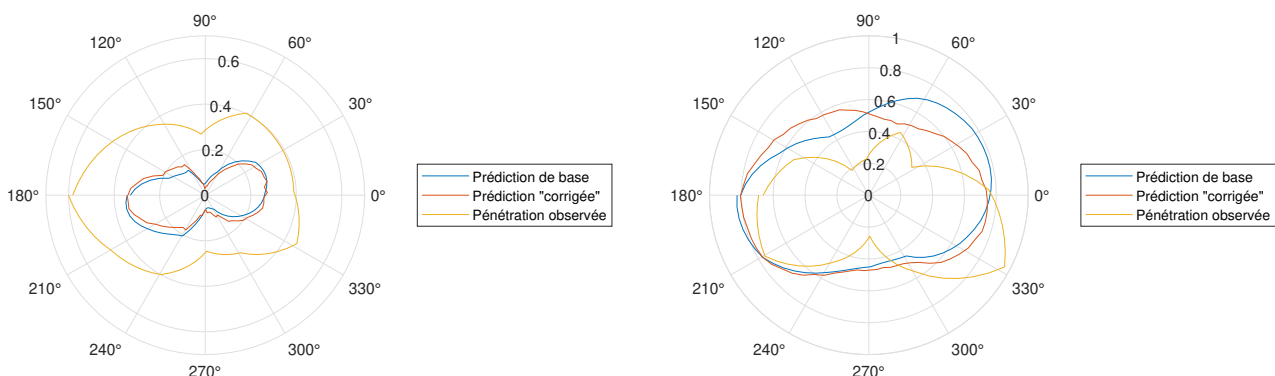


FIGURE 3.26 – Résultats typiques obtenus après la rotation des adders.

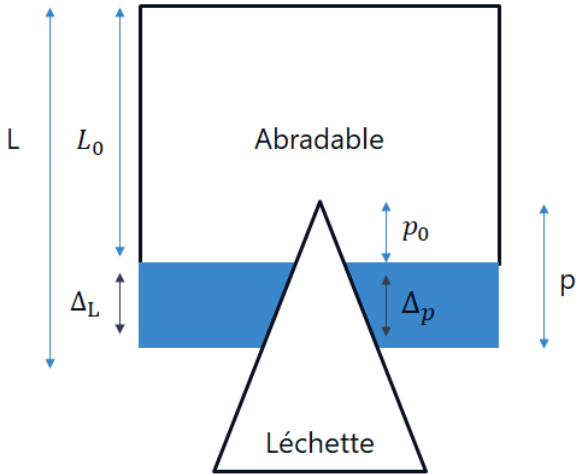
En faisant cela pour tous les moteurs, on se rend compte que cela a très peu d'impact sur la qualité des résultats. Cette hypothèse est rejetée.

3.3.2 Dilatation de l'abradable

L'hypothèse proposée, qui expliquerait l'écart pour les petites pénétrations prédites, est la dilatation de l'abradable. En effet, lorsqu'on modélise l'effet du champ de température sur le modèle 3D, voir Section 2.2, l'abradable n'est pas modélisé. On peut mettre cela en équation et ajouter un terme de correction à nos prédictions. La dilatation thermique se trouve par :

$$\Delta_L = \alpha \Delta_T L_0, \quad (3.4)$$

où L_0 est l'épaisseur de l'abradable en face des léchettes, α le coefficient de dilatation thermique de l'abradable et Δ_T la variation de température. On ne peut pas simplement ajouter cette consommation à nos prédictions. En effet, s'il y a pénétration dans l'abradable, la pénétration à chaud et à froid ne sera pas la même. Les relevés de pénétrations étant faits à froid, l'abradable a eu le temps de refroidir et de se rétracter. En tenant compte de cela, on obtient l'équation :

$$\begin{aligned} \text{Pénétration relevée} &= \frac{p}{L_0 + \Delta_L} L_0 \\ \Delta_p &= \Delta_L = p - p_0 = \alpha L_0 \Delta_T \\ p &= \alpha L_0 \Delta_T + p_0 \\ \text{Pénétration relevée} &= \frac{\alpha L_0 \Delta_T + p_0}{\alpha \Delta_T L_0 + L_0} L_0, \end{aligned} \quad (3.5)$$


où p_0 est la profondeur de la pénétration dans l'abradable sans prise en compte de la dilatation thermique de celui-ci. Essayons-donc d'appliquer cette correction à nos prédictions. Pour ce faire, on a besoin de connaître le matériau utilisé pour réaliser l'abradable. Il s'agit d'un silicone ayant un coefficient de dilatation thermique α d'environ $4.10^{-4} [K^{-1}]$. Ensuite, il nous faut l'épaisseur d'abradable au droit des léchettes et des têtes de roues mobiles. On la mesure rapidement sur la coupe *catia*, voir Figure 3.27.

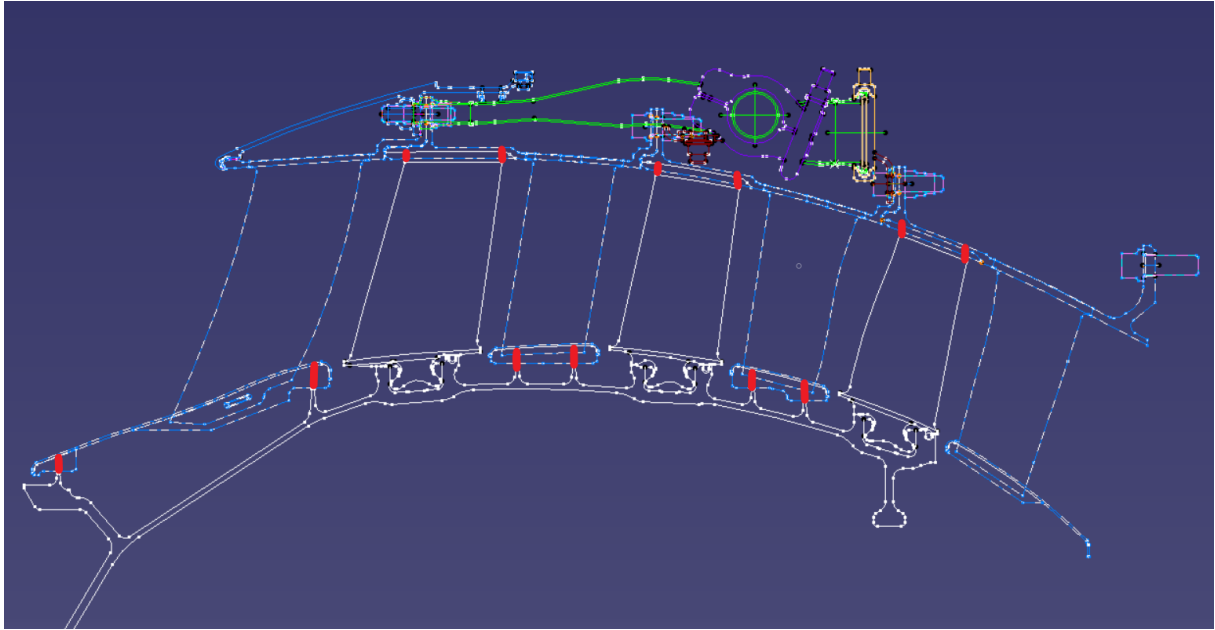


FIGURE 3.27 – Coupe *Catia* du booster avec, en rouge, les épaisseurs d'abradable à mesurer.

Finalement, on récupère le champ de température à la red line (vitesse maximale), voir Figure 3.28, et on approxime la température de l'abradable.

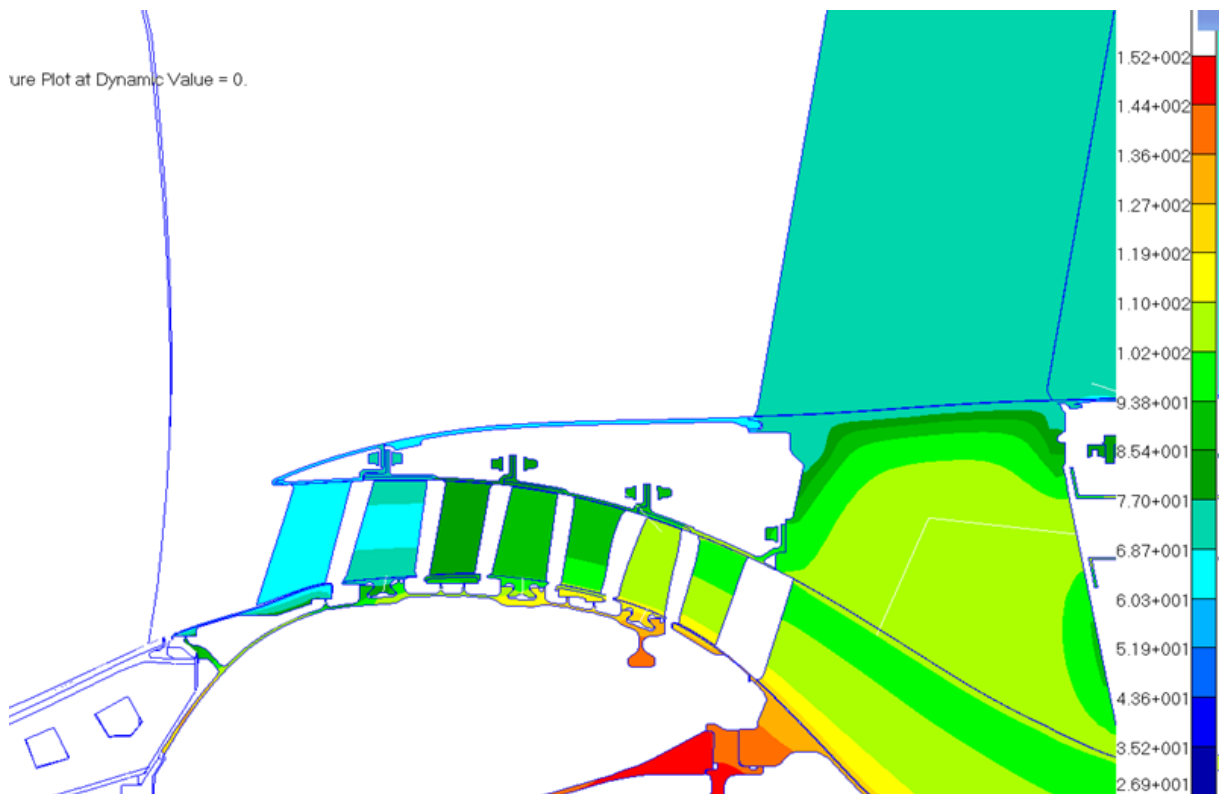
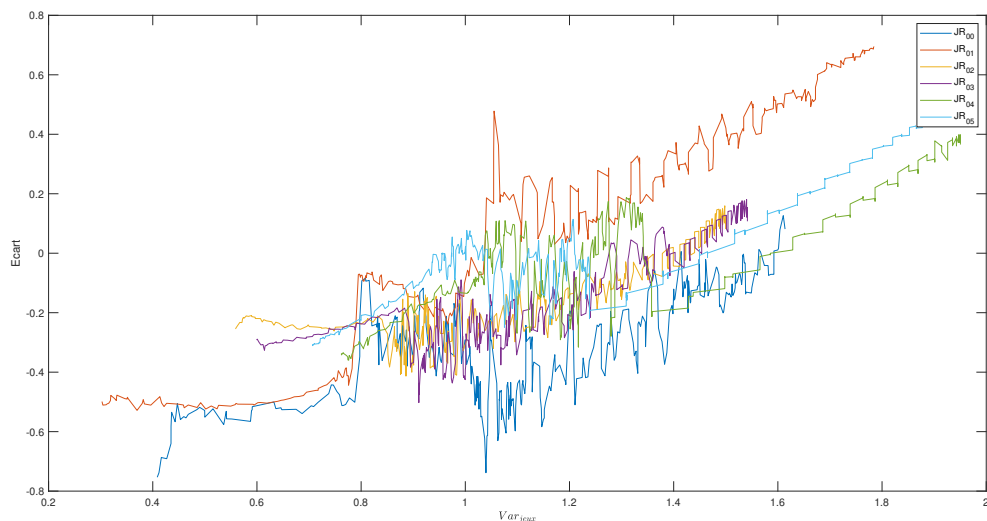


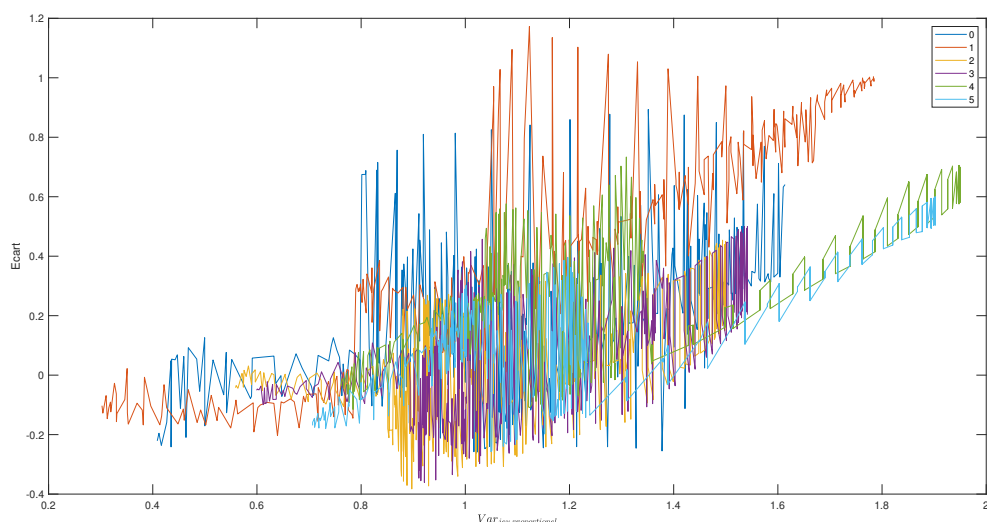
FIGURE 3.28 – Cartographie thermique du booster à la red line.

On remarque que plus on est à l'aval du booster, plus il fait chaud et que l'abradable a une épaisseur variant de 3 à 10 *mm*. On va ajouter cet effet à nos prédictions de jeux. On peut donc voir sur la Figure 3.29, l'évolution des écarts entre la pénétration prédite et la pénétration mesurée avec et sans la prise en compte de la dilatation de l'abradable

en fonction de Var_{jeux} . Les six jeux ont été séparés car il ne subissent pas tous la même correction, du fait des épaisseurs et des températures différentes.



(a) Évolution des écarts sans prise en compte de la dilatation de l'abradable.



(b) Évolution des écarts avec prise en compte de la dilatation de l'abradable.

FIGURE 3.29 – Evolution des écarts entre les prédictions et les pénétrations observées pour les différents $JR0Y$ en fonction de la variation entre les jeux prédits et à froid avec ou sans prise en compte de la dilatation de l'abradable.

La prise en compte de la dilatation de l'abradable nous permet de ramener tout le début des courbes vers zéro et d'avoir une meilleure superposition des différentes courbes. Ce qui indique donc une meilleure cohérence dans la prédiction des jeux. Nous implémenterons donc ce facteur dans notre modèle final.

3.3.3 Variations importantes

Les grosses pénétrations prédites sont généralement liées à de plus grosses déformations. Il se pourrait qu'on arrive dans des ampleurs de déformations qu'on ne pourrait plus

sommer linéairement. En effet, les différents termes de l'équation générale (ovalisation, consommations axisymétriques, adders, ovalisation) sont calculés séparément et simplement sommés. Pour vérifier notre hypothèse, on va tracer l'évolution des écarts en fonction de la variation du jeu à froid et la prédiction, appelons cette variable Var_{jeux} :

$$Var_{jeux} = \text{Jeux à froid} - \text{Prédictions.} \quad (3.6)$$

Nous allons repartir des résultats obtenus avec la prise en compte de la dilatation de l'abradable, voir Section 3.3.2. Nous avons donc la courbe visible sur la Figure 3.30.

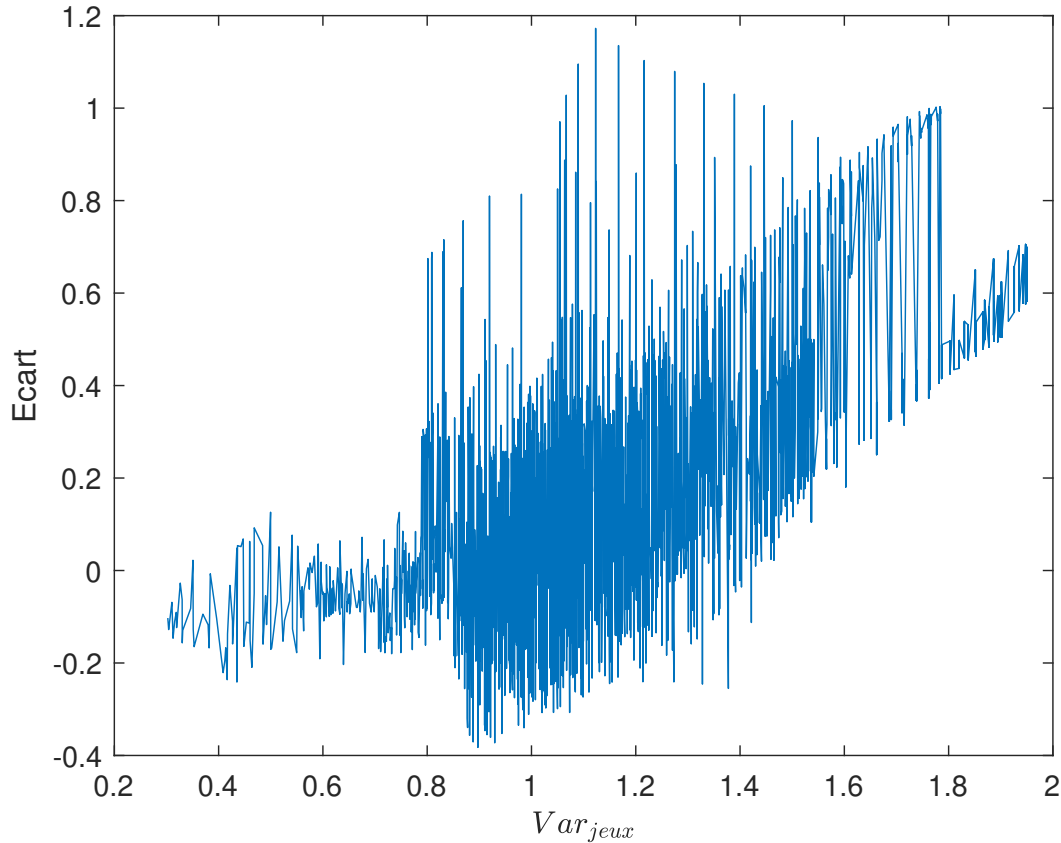


FIGURE 3.30 – Evolution des écarts entre les prédictions et les pénétrations observées pour $JR0Y$ en fonction de la variation entre les jeux prédits et à froid avec la prise en compte de la dilatation de l'abradable.

On observe sur cette Figure que, à partir d'un Var_{jeux} de 0.8, l'écart a tendance à augmenter. Par itération, on va essayer de déterminer le meilleur facteur β tel que si $Var_{jeux} > 0.8$, alors $\text{Prédictions}_{\text{corrigées}} = \beta \times \text{Prédictions}_{\text{initiales}}$ de sorte à minimiser la variance de notre terme écart. En faisant cela, nous obtenons la courbe visible sur la Figure 3.31.

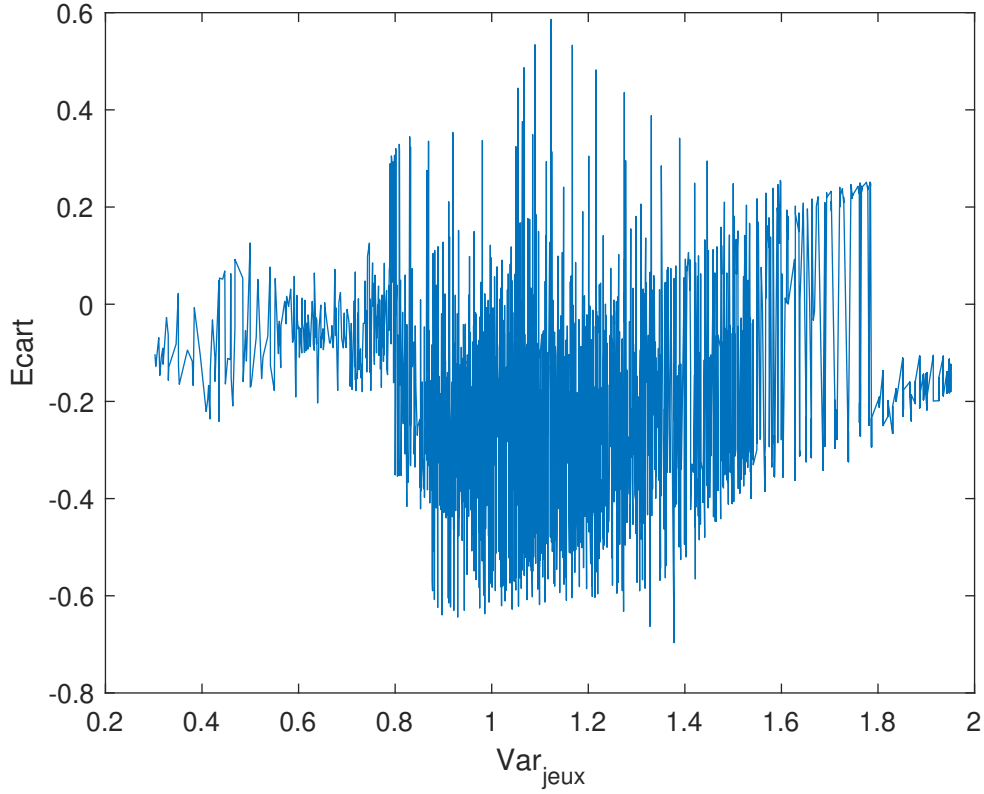


FIGURE 3.31 – Courbe de l'évolution de l'écart entre les pénétrations prédites et les pénétrations observées avec la dilatation thermique et le facteur de correction $\beta=0.5$.

Après plusieurs itérations, on trouve que le meilleur facteur correctif est d'avoir $\beta = 0.5$ ce qui nous donne une variance des écarts de 0.0439.

3.3.4 Distribution des adders

Maintenant que nous avons apporté nos quelques facteurs de correction, nous allons considérer que la variance restante est due aux imprécisions sur les adders. Nous pouvons tracer l'histogramme de la distributions des adders autour de leurs valeurs théoriques, voir Figure 3.32.

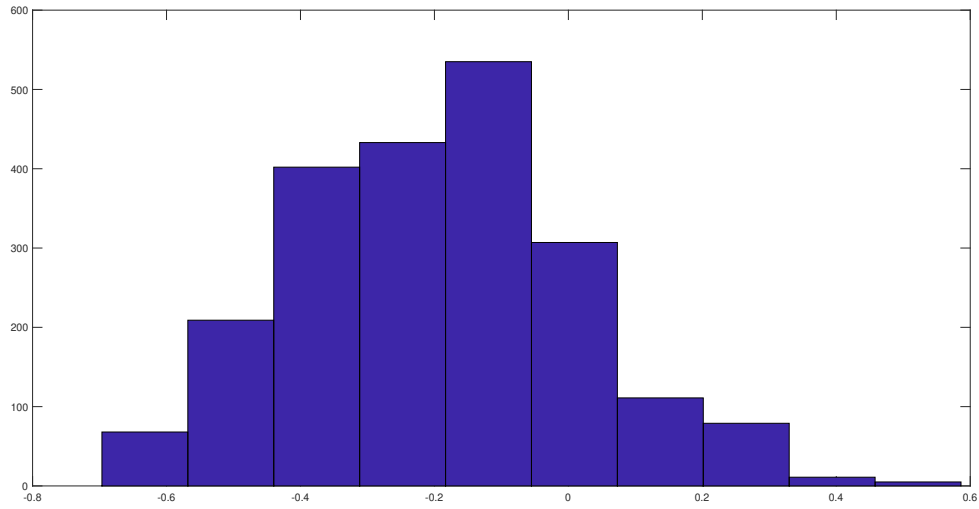


FIGURE 3.32 – Histogramme des écarts entre les adders théoriques et réels.

Nous allons pouvoir essayer de déterminer une loi de probabilité statistique qui colle à cette distribution. Pour ce faire, nous allons réutiliser le critère d'AIC déjà détaillé à la Section 3.1. On trouve donc que la distribution qui correspond le mieux est une normale de moyenne $\mu_{adders} = -0.196$ et d'écart-type $\sigma_{adders} = 0.2095$, comme représentée sur la Figure 3.33.

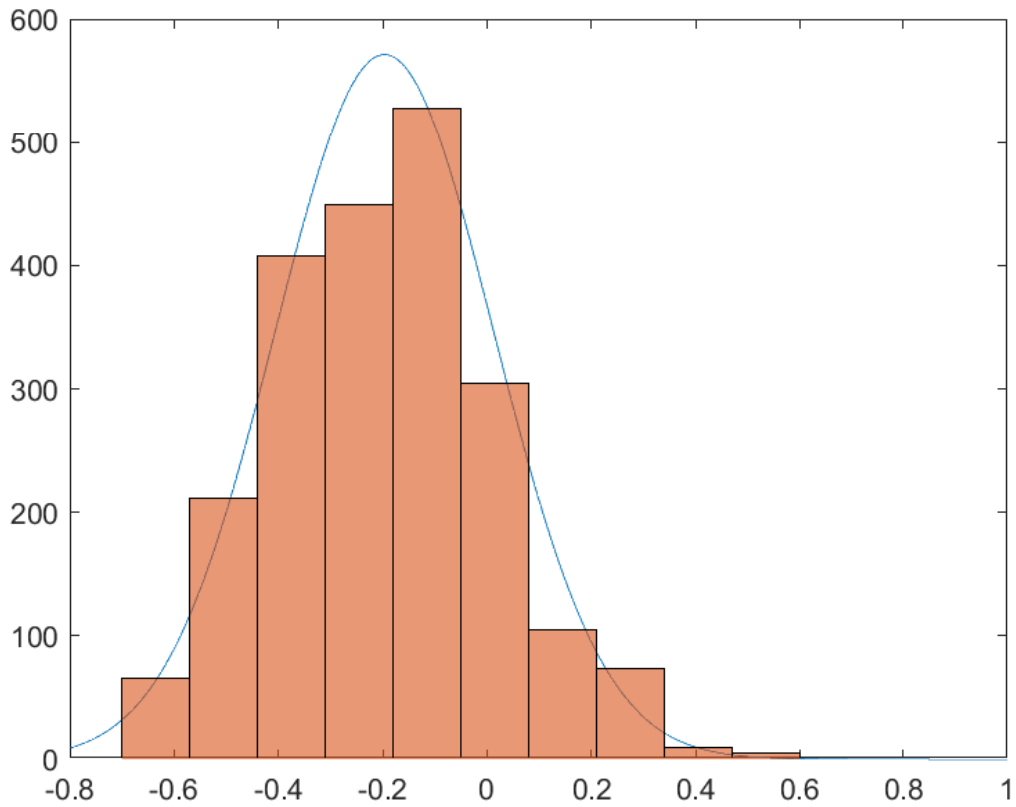


FIGURE 3.33 – Superposition de l'histogramme des écarts entre les adders théoriques et réels et d'une distribution normale de moyenne $\mu = -0.196$ et d'écart-type $\sigma = 0.2095$;

Le terme adders se décompose lui même en deux sous termes : Les adders dynamiques et les adders statiques. Les adders statiques sont les adders dus aux charges de manoeuvres, la déformée du FHF,... et déforment le stator. Les adders dynamiques sont ceux résultant du balourd résiduel et ont comme effet de déformer le rotor. Il est important de prendre en compte que, comme les adders statiques déforment le stator, un adders négatif va donc fermer les jeux. Alors que les adders dynamiques doivent être positifs pour les fermer. Donc, le terme adders se décompose comme

$$Adders = Adders_{dynamique} - Adders_{statique}. \quad (3.7)$$

Nous allons donc poser l'hypothèse que ces deux sous-composants suivent la même distribution. C'est à dire une loi normale de moyenne $\mu = \pm \frac{\mu_{adders}}{2} = \pm -0.0980 \approx \pm -0.1$; et de variance $\sigma^2 = \frac{\sigma_{adders}^2}{2} = 0.0220$.

Chapitre 4

Modèle final

Nous avons désormais une distribution statistique des différents termes de l'équation générale. Nous allons donc, grâce à cela, pouvoir générer une série de moteurs et de déformations grâce à une modélisation stochastique. Nous allons, pour ce faire, utiliser la technique de Monte-Carlo. Elle consiste à générer de nombreuses réalisations conjointes de processus aléatoires et à observer le comportement des valeurs de réponses qui dépendent de ces réalisations. Cela permet de caractériser les fonctions de densité de probabilité des variables de réponses, offrant ainsi des informations sur l'incertitude des estimations. Une version commentée du code Matlab qui réalise cela est disponible dans l'annexe A. La fonction prend en entrée les éléments suivants :

- Les rayons nominaux du stator et du rotor
- Les tolérances sur ces rayons
- La valeur des consommations axisymétriques
- Les adders (dynamiques et statiques)
- L'ovalisation sans masse d'équilibrage
- L'ovalisation avec seulement une masse d'équilibrage de 10 grammes
- La distribution du nombre et des masses des M.E
- L'épaisseur de l'abradable
- La température

Premièrement, nous allons donc générer des rayons pour le stator et le rotor sur 360 degrés grâce aux cotes nominales et leurs tolérances grâce à la distribution déterminée à la Section 3.1. Nous obtenons donc des échantillons comme ceux visibles sur la Figure 4.1

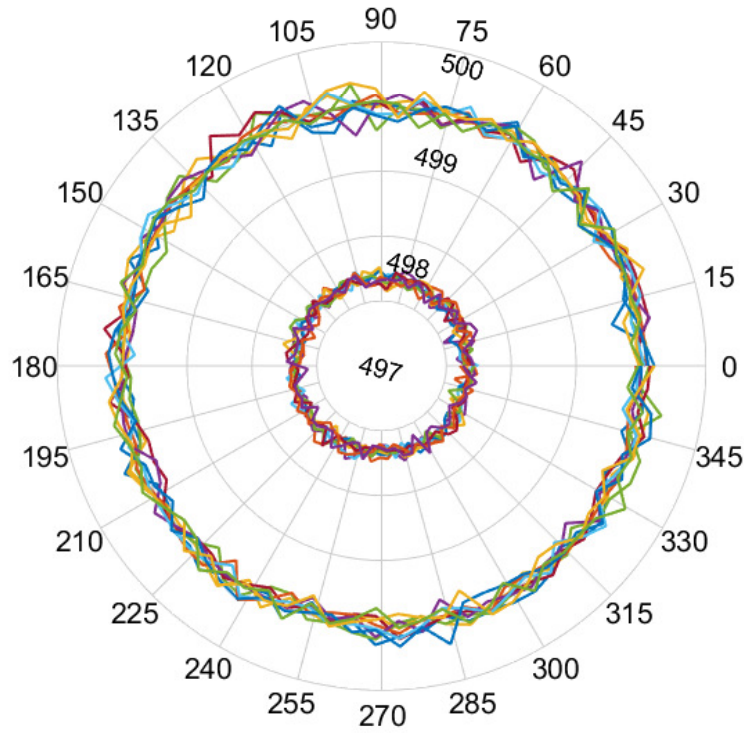


FIGURE 4.1 – Représentation de 10 échantillons des rayons à froid du stator (cercle extérieur) et du rotor (cercle intérieur) sur 360 degrés au niveau du JR01.

Ensuite nous allons simplement ajouter les consommations axysymétriques. Elles sont définies dans la Section 2.2, et sont considérées parfaitement déterminées. Comme leur nom l'indique, elles sont identiques sur toute la circonférence. Nous ajoutons ensuite l'ovalisation du rotor dont la distribution statistique est déterminée dans la Section 3.2. Nous allons donc tirer de manière uniforme un nombre entre un et deux pour savoir combien de masse(s) d'équilibrage nous considérerons. Ensuite, de manière équiprobable nous tirerons une masse possible dans celles utilisées, voir Figure 3.6, et nous les placerons aléatoirement sur la circonférence. La méthodologie précise est détaillée en profondeur à la fin de la Section 3.2. Nous pouvons voir sur la Figure 4.2 quelques échantillons du rayon du rotor suite aux déformées causées par l'ovalisation et les consommations axisymétriques.

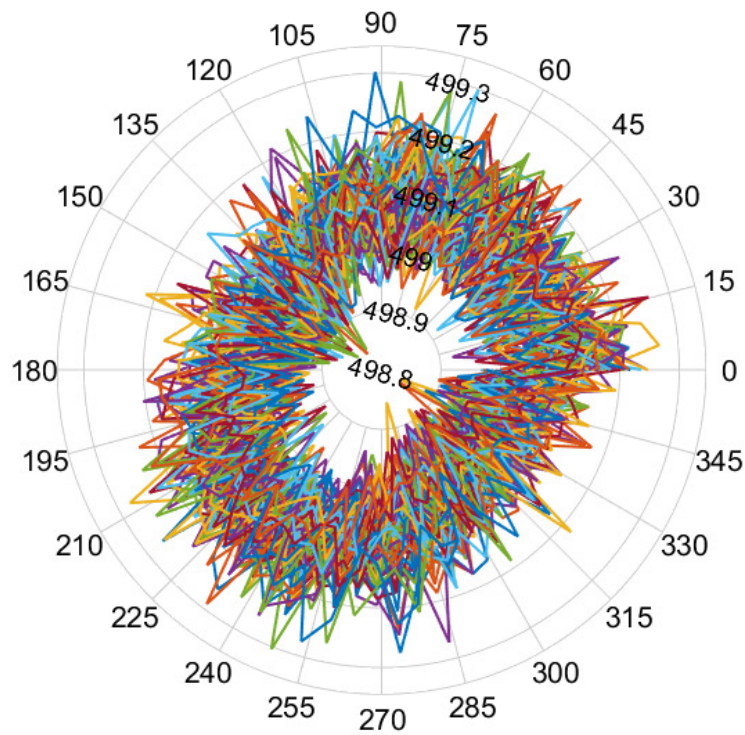


FIGURE 4.2 – 100 échantillons des rayons du rotor suite à l’ovalisation et aux consommations axisymétriques.

On peut remarquer à l’oeil nu une certaine tendance à allonger le rotor à 60 et 240 degrés dû aux verrous d’aubes. On ajoute finalement aux rotors les adders dynamiques en tenant compte de la distribution déterminée à la section 3.3.4. Il est important de ne pas oublier que le rotor tourne, nous allons donc considérer uniquement son rayon le plus grand, comme visible sur la Figure 4.3.

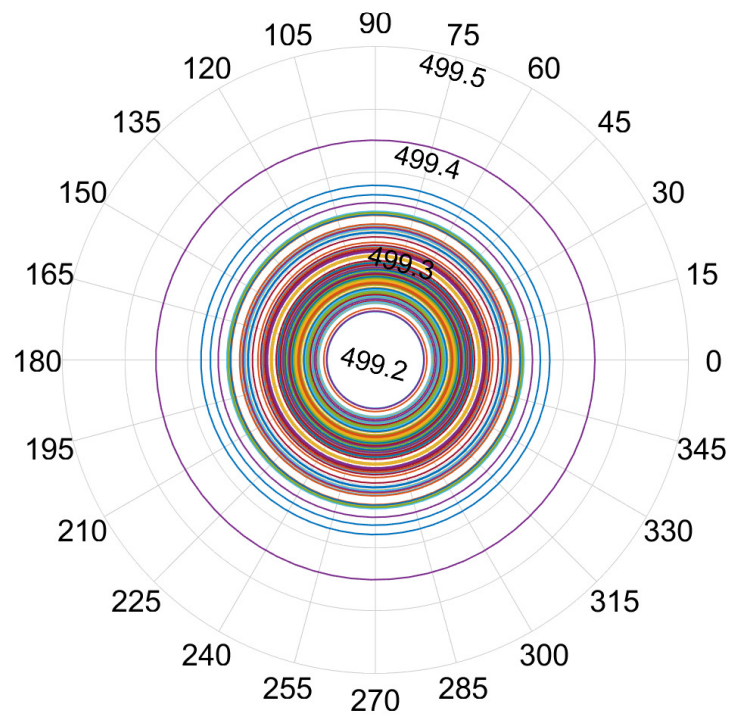


FIGURE 4.3 – 100 échantillons du rotor maximum.

On fait la même chose pour le stator, sans considérer le maximum, et en ajoutant la dilatation thermique de l'abradable, comme détaillé dans la Section 3.3.2. On peut superposer les rayons du rotor et du stator comme visible sur la Figure 4.4

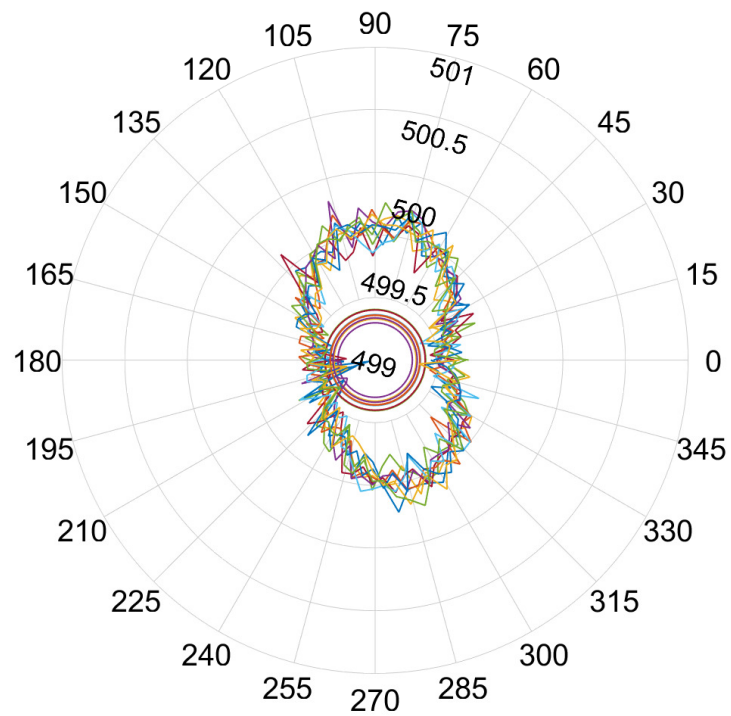


FIGURE 4.4 – Superpositon finale de 10 échantillons du rotor et du stator.

Il y a donc pénétration quand le cercle du rotor croise le cercle du stator. On peut donc facilement localiser les positions angulaires les plus à risques. On peut donc calculer les jeux sur 360 degrés et il ne nous reste plus qu'à appliquer notre facteur correctif β , comme expliqué à la Section 3.3.3. Nous calculons donc le jeu sur 360 degrés comme visible sur la Figure 4.5.

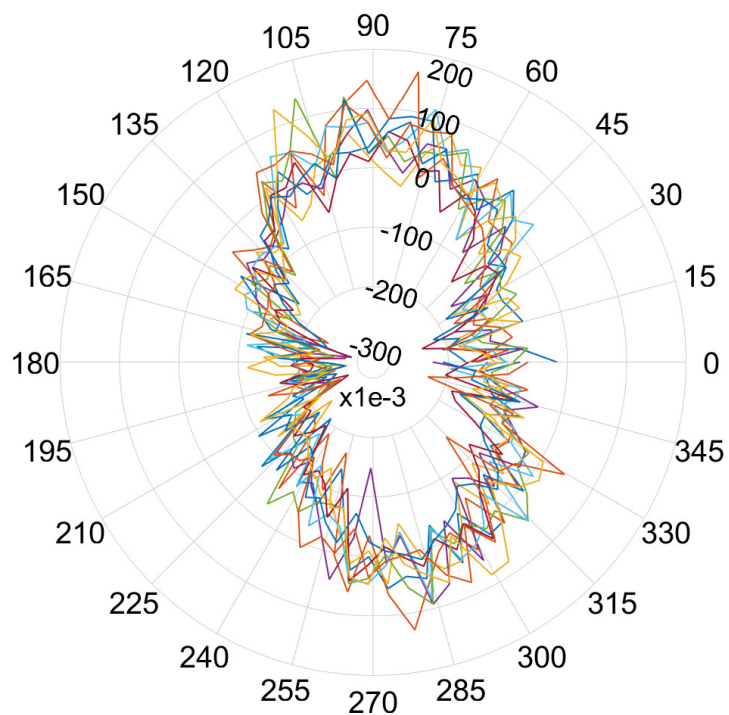


FIGURE 4.5 – 10 échantillons de la prédiction du jeu sur 360 degrés pour le JR01.

A partir de ça et en générant suffisamment d'échantillons, on peut avoir la distribution statistique du jeu sur toute la circonférence. Nous allons déterminer combien d'échantillons nous devons générer pour obtenir des résultats pertinents. Pour ce faire, nous allons étudier la convergence de la moyenne de la pénétration maximale comme visible sur la Figure 4.6.

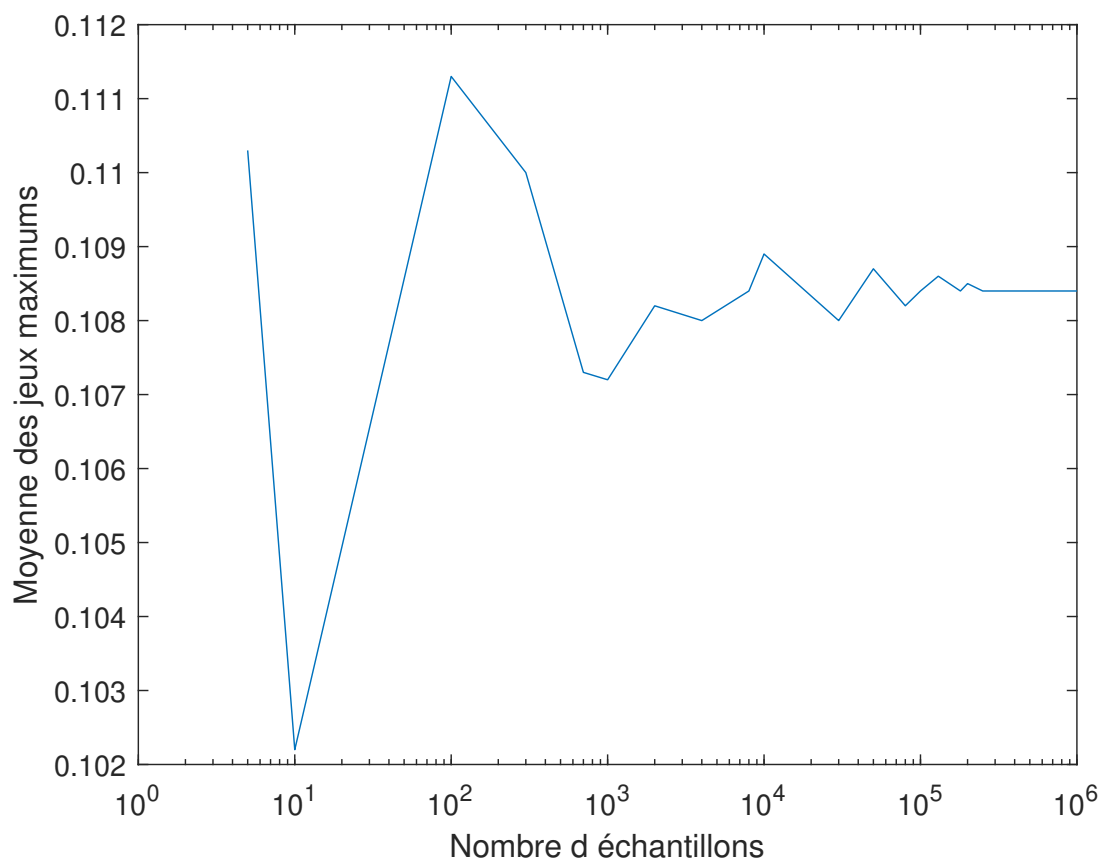


FIGURE 4.6 – Convergence de la moyenne des jeux maximaux en fonction du nombre d'échantillons générés

On constate grâce à cela qu'il nous faut générer au moins 250000 moteurs pour avoir des résultats statistiquement pertinents. Une fois que tous nos échantillons sont générés on peut voir comment se distribuent les jeux sur toute la circonférence, cela est visible sur la Figure 4.7.

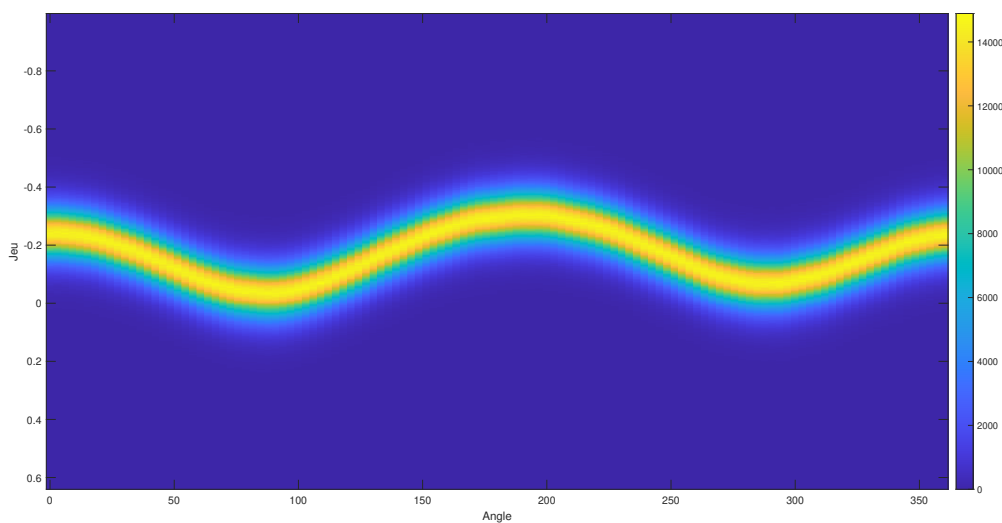


FIGURE 4.7 – Distribution statistique de JR01 sur 360 degrés.

On peut ensuite repérer la position angulaire la plus à risque et visualiser la distribution

du jeu à cette position, comme sur la Figure 4.8.

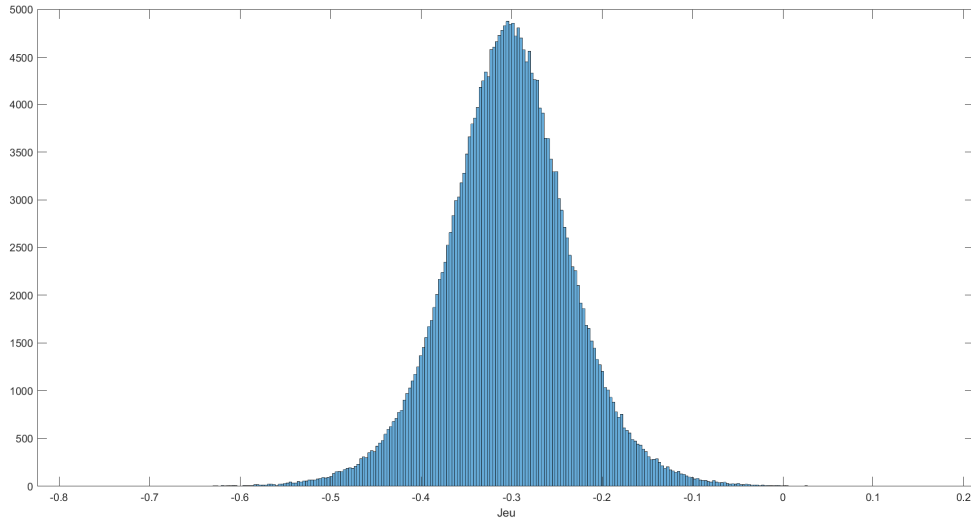
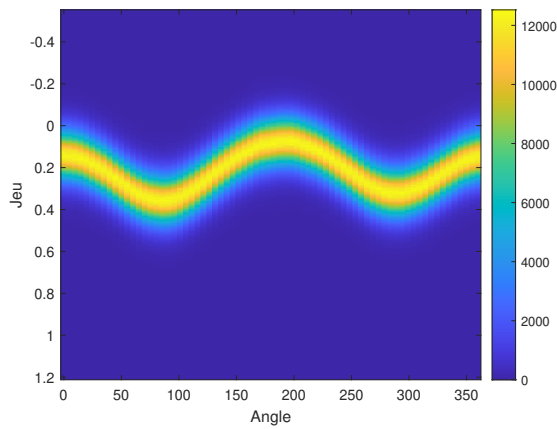
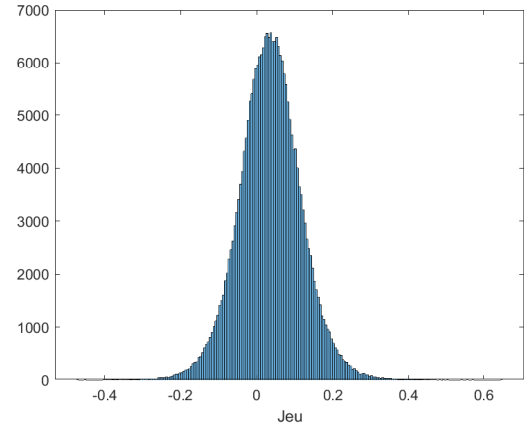


FIGURE 4.8 – Distribution du jeu dimensionnant pour le JR01.

Il est possible de réaliser exactement le même développement pour tous les jeux radiaux au sein du compresseur. Par exemple, on peut le faire pour le JR15, voir Figure 2.1, on obtient les résultats visibles sur la Figure 4.9.



(a) Distribution statistique de JR15 sur 360 degrés.



(b) Distribution du jeu dimensionnant pour le JR15.

FIGURE 4.9 – Résultats obtenus grâce au modèle statistique pour le JR15.

Le modèle prédit peu de pénétration sur la circonférence, ce qui colle aux relevés de la Section 3.3. On peut voir que la variance du jeu dimensionnant est équivalente à celle du JR01, malgré que l'ovalisation plus importante créée par la/les masse(s) de compensation pour les jeux au fond du booster aurait tendance à l'augmenter, voir Section 3.2. Cela s'explique par le fait que la variance sur les cotes réelles diminuent puisque les rayons du rotor et du stator sont de plus en plus petits à mesure que l'on s'enfonce dans le booster.

Chapitre 5

Perspectives futures

Les perspectives futures de cette étude ouvrent la voie à de nombreuses opportunités de recherche et de développement dans la prédiction des jeux. Voici quelques axes d'amélioration et de recherche qui pourraient être explorés :

- Analyse approfondie de l'utilisation des différentes masses d'équilibrage. Un retour d'expérience sur la fréquence d'utilisation des différentes masses d'équilibrage permettrait d'avoir une distribution du terme ovalisation plus proche de la réalité.
- Quantification et inclusion de la dilatation de l'abradable dans les modèles thermiques. Il serait intéressant de poursuivre les recherches sur la dilatation de l'abradable et d'intégrer ce phénomène dans les modèles thermiques existants.
- Étude approfondie de l'influence physique du paramètre β . Une analyse approfondie de l'origine physique du paramètre β , utilisé pour corriger les prédictions initiales, pourrait permettre de mieux comprendre son rôle et sa provenance dans le processus de prédiction des jeux radiaux.
- Relevé de pénétrations. Il serait également intéressant de pouvoir recueillir plus de données réelles sur des moteurs afin de confronter les prédictions de notre modèle à la réalité.

En explorant ces pistes de recherche et en continuant à approfondir les connaissances sur les facteurs influençant les jeux radiaux, il est possible de renforcer l'efficacité, la fiabilité et la durabilité des moteurs aéronautiques.

Chapitre 6

Conclusion

En conclusion, cette étude a permis de développer une méthodologie stochastique pour la prédiction des jeux radiaux dans les compresseurs basse pression, cruciale pour assurer la fiabilité et les performances des moteurs aéronautiques. En intégrant une approche statistique et en utilisant la technique de Monte-Carlo, nous avons pu générer un modèle final capable de caractériser l'incertitude des estimations et d'améliorer la précision des prédictions.

L'analyse approfondie des facteurs influençant les jeux radiaux, tels que les tolérances, l'ovalisation et les adders, a permis d'obtenir des résultats significatifs et de mieux appréhender les variations possibles. Ces avancées ouvrent la voie à des perspectives prometteuses pour l'optimisation des processus de conception et de maintenance des moteurs aéronautiques, contribuant ainsi à renforcer leur efficacité opérationnelle et leur durabilité.

En définitive, ce rapport représente un premier pas intéressant dans la maîtrise des phénomènes aléatoires liés aux jeux radiaux, et j'espère que les résultats obtenus serviront de base solide pour le future.

Annexe A

Annexe

Code Matlab permettant d'obtenir la distribution statistique d'un jeu sur toute la circonférence.

```
1  function[jeux]=probaJeux(dimensionsNominales,tolerances,
    replAxisym,addersDynamiques,addersStatiques,
    ovalisationSansMasse,ovalisationPourUneMasseDe10grammesEn0
    ,temperature,epaisseurAbradable)
2      %dimensionsNominales: Vecteur 1x2 tel que
3      %dimensionsNominales(1,1)=dimensionNominaleRotor et
4      %dimensionsNominales(1,2)=dimensionNominaleStator
5      %tolerances: Vecteur 1x2 tel quel tolerances(1,1)=tol"
        rance sur la valeur nominale du rotor et
6      %tolerances(1,2)=tol rance sur la valeur nominale du
        stator
7      %deplAxisym: Vecteur 1x2 tel que
8      %deplAxisym(1,1)=deplAxisymRotor et
9      %deplAxisym(1,2)=deplAxisymStator
10     %addersDynamiques: int, valeur de l'adders dynamique
11     %addersStatiques: Vecteur 1xY repr sentent les adders
        statiques sur
12     %toute la circonf rance, la longueur de ce vecteur
        est libre. Il
13     %faut que l'intervalle angulaire entre les valeurs
        soit fixe.
14     %ovalisationSansMasse: Vecteur 1xY repr sentent la
        consommation de
15     %jeu du l'ovalisation sur toute la circonfer rance
        en l'absence de
16     %masse d' quilibrage . Il faut que l'intervalle
        angulaire entre les valeurs soit fixe.
17     %ovalisationPourUneMasseDe10grammesEn0: Vecteur 1xY
        repr sentent la consommation de
18     %jeu du l'ovalisation sur toute la circonfer rance
        caus e uniquement
19     %par une masse d' quilibrage de 10grammes
        positionn e 0 . Il faut
20     %que l'intervalle angulaire entre les valeurs soient
        fixes.
```

```

21  %temperature: int, t mparature en degr Celsius au
    niveau du jeu.
22  %epaisseurAbradable: int,  paisseur de l'abradable en
    mm au niveau du jeu.
23
24  nbrSample=250000; %Nombre d' chantillons de Monte-
    Carlo g n rer, 250000 est une valeur
    suffisante.
25  s_Rotor= 0.068; %Param tre s de la distribution
    logistique des dimensions du rotor.
26  s_Stator=0.2428; %Param tre s de la distribution
    logistique des dimensions du stator.
27  var_Adders=0.0220; %Variance de la distribution
    normale des adders.
28  mu_Adders=0.1; %Moyenne de la ditribution normale des
    adders. 0.1 pour les adders dynamiques et -0.1
    pour les statiques.
29  beta=0.5; %Coefficient de correction des grandes
    variations.
30  alpha=4.8*10^(-4); %Coefficient de dilatation thermique
    de l'abradable
31  positionsCirconferentielles=linspace(0,360,360); %On
    divise la circonfe rence comme on le souhaite.
32  nombreDeMasseQuonPeutMettre=2; %On met g n ralement
    une ou deux masses.
33  setDesPoidsDesMasses=[3 5 8 10]; %Masse d' quilibrage
    possible.
34  dimensionNominaleRotor=dimensionsNominales(1,1);
35  dimensionNominaleStator=dimensionsNominales(1,2);
36  logicDistRotor=makedist('Logistic', 'mu', 0, 'sigma',
    s_Rotor);
37  logicDistStator=makedist('Logistic', 'mu', 0, 'sigma',
    s_Stator);
38  toleranceRotor=tolerances(1,1);
39  toleranceStator=tolerances(1,2);
40  deplAxisymRotor=deplAxisym(1,1);
41  deplAxisymStator=deplAxisym(1,2);
42  %on va devoir interpoler les vecteurs d'ovalisation et
    celui des
43  %adders statiques pour qu'ils soient de la bonne
    longueur
44  indices = linspace(1, numel(ovalisationSansMasse),
    length(positionsCirconferentielles));
45  ovalisationSansMasse= interp1(1:numel(
    ovalisationSansMasse), ovalisationSansMasse,
    indices);
46  indices = linspace(1, numel(
    ovalisationPourUneMasseDe10grammesEn0),length(
    positionsCirconferentielles));
47  ovalisationPourUneMasseDe10grammesEn0= interp1(1:numel

```



```

        (ovalisationPourUneMasseDe10grammesEn0),
        ovalisationPourUneMasseDe10grammesEn0, indices);
48 indices = linspace(1, numel(addersStatiques),length(
        positionsCirconferentielles));
49 addersStatiques= interp1(1:numel(addersStatiques),
        addersStatiques, indices);
50
51
52 for i=1:nbrSample
53     dimensionRotorSample=random(logicDistRotor,1,length(
        positionsCirconferentielles)).*toleranceRotor+
        dimensionNominaleRotor; %On applique la
        distribution logistique sur les cotes du rotor
54 dimensionStatorSample=random(logicDistStator,1,length(
        positionsCirconferentielles)).*toleranceStator+
        dimensionNominaleStator;%On applique la
        distribution logistique sur les cotes du stator
55 addersDynamiquesSample=mu_Adders+randn(1,length(
        positionsCirconferentielles)).*var_Adders+
        addersDynamiques;%On applique la distribution
        normale sur les adders dynamiques
56 nombreDeMasseSample=round(rand*
        nombreDeMasseQuonPeutMettre);%On tire
        al atoirement entre 1 et 2 le nombre de masse d'
        quilibrage utilis
57 ovalisationSample=ovalisationSansMasse;
58 for j=1:nombreDeMasseSample %On va boucler sur le
        nombre de masse, on leur attribue une position et
        une masse.
59     positionMasseIndex=round(length(
        positionsCirconferentielles)*rand(1));
60     poidMasse=setDesPoidsDesMasses(round((length(
        setDesPoidsDesMasses)-1)*rand(1))+1);
61     ovalisationSample=ovalisationSample+circshift(
        ovalisationPourUneMasseDe10grammesEn0,
        positionMasseIndex).*(poidMasse/10);
62 end
63 addersStatiquesSample=-mu_Adders+randn(1,length(
        positionsCirconferentielles)).*var_Adders+
        addersStatiques;%On applique la distribution
        normale sur les adders statiques
64 buffer=dimensionRotorSample+deplAxisymRotor+
        ovalisationSample+addersDynamiquesSample;%
        D formation totale du rotor
65 rotor(:,i)=max(buffer)*ones(1,length(
        positionsCirconferentielles));%On prend le max du
        rotor car celui-ci tourne
66 stator(:,i)=dimensionStatorSample'+deplAxisymStator+
        addersStatiquesSample';%D formation totale du
        stator

```

```

67     jeux(:,i)=stator(:,i)-rotor(:,i);
68
69
70     %correction Thermique avec dilatation de l'abradable
71     jeux(:,i)=jeux(:,i)-temperature*epaisseurAbradable*
        alpha;
72     %Penetration observee froid
73     for j=1:length(jeux(:,i))
74         if jeux(j,i)<0
75             jeux(j,i)=(jeux(j,i)/(epaisseurAbradable+
                temperature*epaisseurAbradable*alpha))*
                epaisseurAbradable;%Prendre en compte que
                l'abradable va se recontracter
76         end
77     end
78
79     %Correction variation importante
80     for j=1:length(positionsCirconferentielles)
81         if (dimensionStatorSample(j)-max(
                dimensionRotorSample))-jeux(j,i) > 0.8
82             jeux(j,i)=beta*jeux(j,i);
83         end
84     end
85
86 end
87
88 %Afficher les heatmap du jeux en fonction de la
    position angulaire
89 [counts, edgesX, edgesY] =histcounts2(
    positionsCirconferentielles'.*ones(length(
    positionsCirconferentielles),nbrSample),jeux(1:
    length(positionsCirconferentielles),:));
90 figure;
91 imagesc(edgesX, edgesY, counts');
92 colorbar;
93 xlabel('Angle');
94 ylabel('Value');
95 title('Heatmap des jeux');
96
97 %On trouve la position angulaire la plus risque,
98 row_sums = sum(jeux,2);
99 [~,min_row_index]=min(row_sums);
100 %On plot l'histogramme du jeu a cette position
101 figure;
102 histogram(jeux(min_row_index,:))
103 title('Distribution du jeu dimensionnant')
104 end

```

Bibliographie

- [1] Hirotugu AKAIKE. *Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle*. Springer New York, 1973.
- [2] B. MERSEYEVA F. CORDEAU. *Calculation Report, LEAP-1A/1C Rotor blade-Stage 2 (Cold Design)*. Safran AB, 2016.
- [3] O. Beaupain F. HUPPERTZ N. François. *Dimensionnement des jeux axiaux et radiaux du booster*. Safran AB, 2024.
- [4] *Mini formation - Bienvenue au BE mécanique SAB*. Safran AB, 2021.
- [5] A. DERCLAYE N. FRANCOIS X. CHARLES. *Méthodologie de dimensionnement des jeux au sein d'un compresseur BP Jeux axiaux et radiaux*. Safran AB, 2024.
- [6] D. WATRIN R. BARALE I. CABANAS. *Workbench Template for Drum 2D analyses*. Safran AB, 2017.