



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN-
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master
En
Génie Mécanique

Option

Ingénierie des systèmes mécaniques productives

Présenté par

SADOUKI Yahia

THÈME

**TOLERANCEMENT FONCTIONNEL ET DE
FABRICATION D'UN PRODUIT (ENSEMBLE) PAR LA
METHODE DES DISPERSIONS**

Soutenu en juillet 2012

Devant le jury :

Président	CHEIKH Abdelmadjid	UABB Tlemcen
Encadreur	HAMOU Saïd	UABB Tlemcen
Examinateur	CHEIKH Nassima	UABB Tlemcen
Examinateur	MANGHOUCI Ahmed	UABB Tlemcen

Année universitaire 2011-2012

Remerciements

Tout d'abord, je remercie dieu de m'avoir donné le courage et la volonté de terminer ce modeste travail.

J'exprime mes vifs remerciements pour Messieurs HAMOU Saïd pour leur encadrement et leur aide précieuse.

Aussi, merci à Monsieur CHEIKH Abdelmadjid de m'avoir honorée en acceptant de présider le jury.

Je remercie également Madame CHEIKH Nassima et Monsieur MANGOUCI Ahmed pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Mes remerciements vont aussi à tous mes amis de master et mes collègues.

Enfin, mes remerciements s'adresser à tous les professeurs de notre cursus universitaire. Comme je remercie sans toutefois les citer, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

SADOUKI Yahia

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents pour leur soutien moral.

A tout ma famille : mes frères et mes sœurs : Boubaker, Boumediene, Maamar, Mohamed, Fatima Zahra, Sarah et Sabiha.

Aux petits Walid et Soumia.

A Mourad et Rabah.

A tous mes oncles et mes tantes.

A Hamada, Ameer, Kacimi, Ouaret, Younes, Yassine, Hichem, Ghouti, Kader, Mustafa, Mourad, Aissa, Abde nour, Wadah, Nabil, Krimou, Tahar, Zemani, kamel, Hammami, Faudel, Amine, Slimane, Ali et tous les amis.

A Hassiba, Nadia, Hanaa , Wahiba, Soumia, Linda, Farida, fadwa.

A tous qui me connaisse et me supporte dans ma vie.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE I : PROCESSUS DE FABRICATION D'UN PRODUIT	Erreur ! Signet non défini.
1.1. Généralités.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2. Chronologie des opérations d'usinage.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.1. Dessin de définition de la pièce.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.2. Tableau de définition des opérations élémentaires.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3. Analyse des contraintes d'antériorité	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3.1. Étude préliminaire suivant les différents cas d'antériorité	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3.1.1. Contraintes d'ordre métrologique.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3.1.1.1. Contrainte dimensionnelle.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3.1.1.2. Contrainte géométrique	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3.1.2. Contrainte technologique.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3.1.3. Contrainte économique.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3.1.3.1. Usure des outils	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3.1.3.2. Moindre usinage	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3.2. Tableau d'analyse de contraintes d'antériorités	Erreur ! Signet non défini.
1.2.4. Tableau des niveaux	Erreur ! Signet non défini.
1.2.5. Groupement des phases	Erreur ! Signet non défini.
1.3. Application	Erreur ! Signet non défini.
1.3.1. Analyse de dessin de définition	Erreur ! Signet non défini.
1.3.2. Groupement et association des surfaces	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3. Déterminer les contraintes d'antériorité	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3.1. Étude préliminaire suivant les différents cas d'antériorité	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3.1.1. Contraintes d'ordre métrologique.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3.1.1.1. Contrainte dimensionnelle.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3.1.1.2. Contrainte géométrique	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3.1.2. Contrainte technologique.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3.1.3. Contrainte économique.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3.2. Tableau d'analyse de contraintes d'antériorités	Erreur ! Signet non défini.
1.3.4. Tableau des niveaux	Erreur ! Signet non défini.

1.3.5 Groupement des phases	Erreur ! Signet non défini.
1.4. Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE II : TOLERANCEMENT FONCTIONNEL .	Erreur ! Signet non défini.
2.1. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
2.2. Historique de la cotation fonctionnelle.....	Erreur ! Signet non défini.
2.3. But de la cotation fonctionnelle.....	Erreur ! Signet non défini.
2.4. Extraction des chaines de cotes et vérification des conditions fonctionnelles	Erreur !
Signet non défini.	
2.4.1. Modélisation des fonctions d'un mécanisme.....	Erreur ! Signet non défini.
2.4.2. Réalisation des conditions fonctionnelles sur les pièces	Erreur ! Signet non défini.
2.4.3. Principe de la méthode de dispersion (méthode Δl)	Erreur ! Signet non défini.
2.4.3.1. Matrice de l'assemblage	Erreur ! Signet non défini.
2.4.3.2. Méthode du transfert minimum	Erreur ! Signet non défini.
2.4.4. Vérification de la faisabilité des exigences fonctionnelles de l'assemblage .	Erreur ! Signet non défini.
non défini.	
2.5. Optimisation des tolérances des cotes fonctionnelles.....	Erreur ! Signet non défini.
2.5.1. Formation de la matrice globale d'optimisation des dispersions.....	Erreur ! Signet non défini.
défini.	
2.5.2. Méthode des dispersions minimales	Erreur ! Signet non défini.
2.5.3. Méthode des dispersions inconnues	Erreur ! Signet non défini.
2.6. Synthèses des cotes fonctionnelles optimisées.....	Erreur ! Signet non défini.
2.7. Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE III : TOLERANCEMENT DE FABRICATION	Erreur ! Signet non défini.
défini.	
3.1. Généralités	Erreur ! Signet non défini.
3.2. Simulation par la méthode Δl	Erreur ! Signet non défini.
3.2.1. Vérification des avant-projets de fabrication.....	Erreur ! Signet non défini.
3.2.2. Optimisation des dispersions de fabrication.....	Erreur ! Signet non défini.
3.2.2.1. Optimisation des tolérances initiée avec des dispersions minimales.....	Erreur ! Signet non défini.
non défini.	
3.2.2.2. Optimisation des tolérances avec les dispersions inconnues	Erreur ! Signet non défini.
3.2.3. Calcul des cotes de fabrication.....	Erreur ! Signet non défini.
3.3. Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE IV : TOLERANCEMENT FONCTIONNEL ET DE FABRICATION	
.....	Erreur ! Signet non défini.
4.1. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
4.2. Extraction des chaines des cotes fonctionnelles	Erreur ! Signet non défini.

-
- 4.3. Application au sous-assemblage 1-2-3-4 par méthode des dispersions minimales **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.4. Application au sous-assemblage 1-2-3-4 par méthode des dispersions inconnues **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.5. Application des cotes fonctionnelles optimisées au sous-assemblage 1-2-3-4 **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.5.1. *Calcul des écarts de fabrication des cotes condition unilimites* **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.5.2. *Matrice élargie d'optimisation*..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.5.3. *Calcul des cotes fonctionnelles moyennes*..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6. Simulation d'un avant-projet d'étude de fabrication par la méthode Δl **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6.1. Matrice de l'avant-projet de fabrication **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6.2. Vérification d'avant-projet de fabrication **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6.3. Optimisation de tolérances de fabrication **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6.3.1. Optimisation des dispersions..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6.3.2. Optimisation des tolérances de fabrication..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6.3.2.1. Présentation des chaînes des cotes synthèses **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6.3.2.2. Les Intervalles de tolérance des cotes de fabrication.... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6.4. Cotes de Fabrication **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6.4.1. Calcul des longueurs moyennes de base..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6.4.2. Calcul des cotes moyennes de fabrication **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.6.4.3. Affichage des cotes de fabrication..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7. Simulation d'un avant-projet d'étude de fabrication par la méthode Δl **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7.1. Matrice de l'avant-projet de fabrication **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7.2. Vérification de l'avant-projet de fabrication **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7.3. Optimisation de tolérances de fabrication **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7.3.1. Optimisation des dispersions..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7.3.2. Optimisation des tolérances de fabrication..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7.3.2.1. Présentation des chaînes des cotes synthèse **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7.3.2.2. Les Intervalles de tolérance des cotes de fabrication.... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7.4. Cotes de Fabrication **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7.4.1. Calcul des longueurs moyennes de base..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7.4.2. Calcul des cotes moyennes de fabrication **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.7.4.3. Affichage des cotes de fabrication..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 4.8. Simulation d'un avant-projet d'études de fabrication par la méthode Δl **Erreur ! Signet non défini.**
-

4.8.1. Matrice d'avant-projet de fabrication	Erreur ! Signet non défini.
4.8.2. Vérification d'avant-projet de fabrication	Erreur ! Signet non défini.
4.8.3. Optimisation des tolérances de fabrication.....	Erreur ! Signet non défini.
4.8.3.1. Optimisation des dispersions	Erreur ! Signet non défini.
4.8.3.2. Optimisation des tolérances de fabrication.....	Erreur ! Signet non défini.
4.8.3.2.1. Présentation des chaînes des cotes synthèse.....	Erreur ! Signet non défini.
4.8.3.2.2. Les Intervalles de tolérance des cotes de fabrication....	Erreur ! Signet non défini.
4.8.4. Cotes de Fabrication	Erreur ! Signet non défini.
4.8.4.1. Calcul des longueurs moyennes de base.....	Erreur ! Signet non défini.
4.8.4.2. Calcul des cotes moyennes de fabrication.....	Erreur ! Signet non défini.
4.8.4.3. Affichage des cotes de fabrication.....	Erreur ! Signet non défini.
4.9. Simulation d'un avant-projet d'étude de fabrication par la méthode Δl	Erreur ! Signet non défini.
4.9.1. Matrice d'avant-projet de fabrication	Erreur ! Signet non défini.
4.9.2. Vérification d'avant-projet de fabrication	Erreur ! Signet non défini.
4.9.3. Optimisation de tolérances de fabrication	Erreur ! Signet non défini.
4.9.3.1. Optimisation des dispersions	Erreur ! Signet non défini.
4.9.3.2. Optimisation des tolérances de fabrication.....	Erreur ! Signet non défini.
4.9.3.2.1. Présentation des chaînes des cotes synthèse.....	Erreur ! Signet non défini.
4.9.3.2.2. Les intervalles de tolérance des cotes de fabrication....	Erreur ! Signet non défini.
4.9.4. Calcul des cotes de Fabrication	Erreur ! Signet non défini.
4.9.4.1. Calcul des longueurs moyennes de base.....	Erreur ! Signet non défini.
4.9.4.2. Calcul des cotes moyennes de fabrication.....	Erreur ! Signet non défini.
4.9.4.3. Affichage des cotes de fabrication.....	Erreur ! Signet non défini.
4.10. Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	Erreur ! Signet non défini.
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	Erreur ! Signet non défini.
ANNEXE : SIMULATION D'UN AVANT-PROJET D'ETUDE DE FABRICATION PAR LA METHODE Δl.....	Erreur ! Signet non défini.

INTRODUCTION

Le tolérancement des pièces mécaniques, appliqué dans les étapes de conception et de fabrication, représente un facteur déterminant pour réussir le bon fonctionnement d'un mécanisme. Les effets induits par ce facteur ont une influence sur la qualité fonctionnelle ainsi que le coût du produit fini. La maîtrise des défauts géométriques au cours de la fabrication des pièces mécaniques permet de garantir la qualité finale du produit.

Dans tout système manufacturier, la phase de préparation du travail pose, durant l'étude d'une pièce à usiner, un énorme problème ayant pour origine le respect des spécifications fonctionnelles. En effet, le bon fonctionnement d'une pièce est conditionné par les contraintes d'ordre dimensionnel et géométrique.

La cotation fonctionnelle, plus particulièrement la phase de tolérancement, est donc une étape importante dans l'élaboration d'un processus de fabrication. Dans nos jours, et pour quelques décennies, elle doit permettre à chaque utilisateur de pouvoir optimiser le système mécanique étudiés en vue d'un coût minimum à fonction égale.

Le but de ce travail est d'étudier les tolérances fonctionnelles de l'assemblage de montage d'un galet (simulation des exigences fonctionnelles d'un assemblage mécanique par la méthode des dispersions) et les tolérances de fabrication de chaque pièce de cet assemblage (simulation d'un avant-projet d'étude de fabrication par la méthode des dispersions).

Dans le premier chapitre on présente une recherche bibliographique sur le processus de fabrication d'un produit industriel et les chronologies des opérations d'usinage. Afin de faire une application sur une pièce. D'après cette recherche on constate le rôle de chronologie des opérations d'usinage dans la détermination de la gamme d'usinage d'un produit.

Le second chapitre traite le tolérancement fonctionnel par la méthode des dispersions. Ensuite une procédure d'optimisation des dispersions sur la base de deux méthodes (dispersions minimales et dispersions inconnues). Enfin les cotes fonctionnelles et leurs intervalles de tolérances sont synthétisés à partir des dispersions optimisées.

Le troisième chapitre comporte un bref aperçu sur l'application de la méthode des dispersions à la simulation des avants projets de fabrication et la synthèse des côtes de fabrication optimisées. La simulation est effectuée en utilisant la méthode du transfert

minimum. Celle-ci présente l'avantage d'un calcul matriciel facilement programmable pour l'automatisation de la vérification des avants projets de fabrication et de la synthèse des côtes de fabrication avec leurs intervalles de tolérances optimisées.

Dans le quatrième chapitre on présente l'application de la méthode des dispersions pour l'optimisation du tolérancement fonctionnel de l'assemblage et la synthèse des côtes fonctionnelle optimisées (montage d'un galet). Puis, on a appliqué aussi la méthode des dispersions pour chaque pièce de cet assemblage afin de simuler leurs avant-projets de fabrication et de calculer les cotes de fabrication de toutes les géométries intermédiaires de la pièce.

CHAPITRE I

PROCESSUS DE FABRICATION D'UN PRODUIT

1.1. Généralités

Le processus de fabrication d'un produit industriel est défini par un ensemble d'étapes qui permettent, à partir d'un besoin ou d'une idée, la réalisation d'un produit. La figure 1-1 issue du travail collectif réalisé sous l'impulsion de l'inspecteur général AULBIN [AUBLIN 1999] montre d'une façon globale l'évolution d'un produit au sein d'une entreprise. Les différentes étapes de sa vie peuvent être résumées comme suit :

- La conception du produit,
- La préparation à la fabrication du produit et sa production,
- La qualification du produit,

Tous les intervenants du processus travaillent sur la même pièce mais chacun a une représentation différente associée à un modèle propre. Dans le service bureau d'étude (BE), l'ingénieur intervient avant que les premières géométries ne soient complètement définies. Il travaille sur des modèles géométriques simplifiés, adaptés aux travaux de la mécanique des solides, de la résistance des matériaux, etc... Il donne des indications sur les dimensions minimales à respecter sans participer dans le processus de la cotation fonctionnelle. Cette dernière est la tâche principale du concepteur - dessinateur. La cotation fonctionnelle est le résultat d'un calcul fonctionnel. C'est la raison pour laquelle, elle doit être respectée impérativement dans la suite du processus d'industrialisation, notamment dans la préparation à la fabrication. Il est toujours important de souligner qu'il faut bien coter fonctionnellement pour fabriquer économiquement. Pour identifier les surfaces fonctionnelles, le concepteur se base sur un modèle géométrique nominal. Ce travail s'appuie principalement sur un modèle volumique pour créer un document de référence 2D : le dessin de définition. Il définit la pièce telle qu'elle doit être réalisée afin de respecter les conditions fonctionnelles de l'ensemble. Ainsi, la pièce est cotée sur la base d'un système de référence principal et sur des références secondaires. [HAMOU 2004]

Dans le service bureau des méthodes (BM), c'est le gammiste qui a la responsabilité de préparer la fabrication des pièces. Il définit les différentes phases du processus de réalisation sur la base des recommandations du cahier de charge et du dessin de définition en établissant un dossier de fabrication qui se compose de :

- l'avant-projet d'étude de fabrication (l'APEF),
- la simulation de l'APEF,
- le projet d'étude de fabrication
- les contrats de phases prévisionnels.

Au niveau de l'atelier, on réalise les pièces en fonction des instructions préconisées dans le dossier de fabrication. A la fin de la chaîne de production, le contrôleur a pour mission de valider la réalisation des pièces qui composent le produit sur la base du dessin de définition et d'un protocole d'acceptation (condition de conformité). [HAMOU 2004]

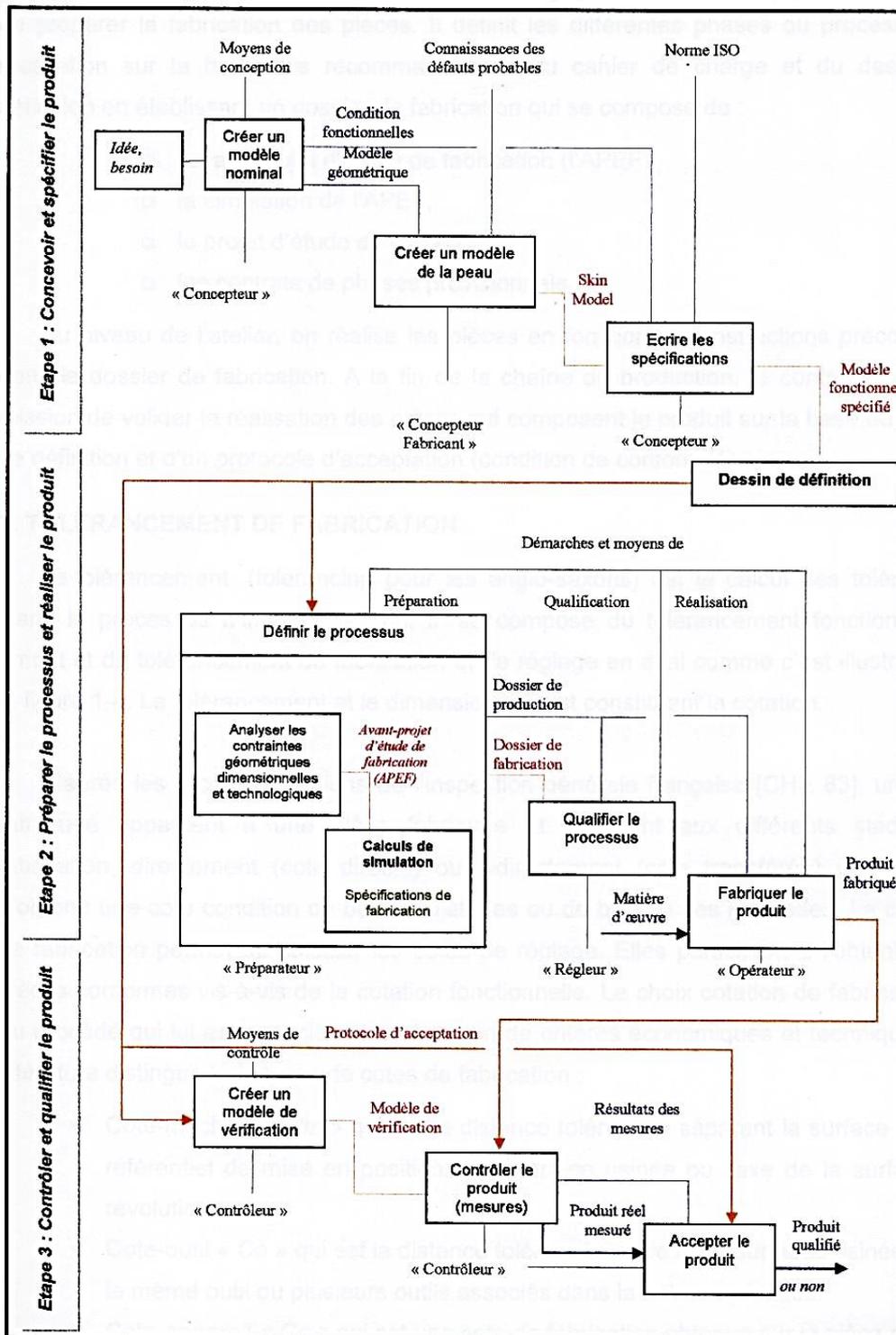


Figure I-1 Processus d'industrialisation d'un produit

La première étape, création d'un modèle nominal, composé de surfaces parfaites (ou idéales), liées entre elles par des conditions géométriques parfaitement définies et répandant fonctionnellement au besoin :

- L'élaboration, à partir du modèle nominal, d'un modèle non parfait de la peau du produit, définit en tenant compte des défauts possibles sur la pièce réelle permettant d'extraire des surfaces non idéales qui supporteront des conditions dimensionnelles entre elles.
- La traduction et l'écriture de ces conditions à l'aide d'un langage ISO, univoque.

La deuxième étape correspond à l'étude du processus retenu ainsi qu'à la production des produits :

- analyse les spécifications fonctionnelles définies par le concepteur.
- propose un processus (machines, outillages, réglages) capable de respecter ce contrat fonctionnel. Au cas où le processus défini l'oblige à considérer de nouvelles dimensions ou de nouvelles spécifications (transferts de côtes, simulations, calculs de bruts), il est parfois amené à restreindre les zones de tolérances proposées par le concepteur, donc à complexifier la réalisation du produit et à en augmenter son coût.

Une bonne coopération au niveau de l'industrialisation du produit (relation produit, procédé) permet d'optimiser la spécification fonctionnelle en fonction du procédé et de limiter les restrictions d'éventuelles spécifications de fabrication.

La dernière étape permet de contrôler et de qualifier le produit réalisé :

- analyser les spécifications fonctionnelles et de fabrication ;
- créer un modèle géométrique de vérification, tenant compte des moyens de mesurage disponibles et de la précision attendue. Cette phase se fait en utilisant une démarche similaire à celle ayant permis la spécification, mais en partant du produit réel ;

Élaborer un protocole d'acceptation des produits, intégrant, si nécessaire, un volet «assurance qualité ». [AUBLIN 1999]

1.2. Chronologie des opérations d'usinage

L'analyse de fabrication, méthode d'étude de gamme d'usinage, détermination d'APEF. [HAMOU 2010]

1.2.1. Dessin de définition de la pièce

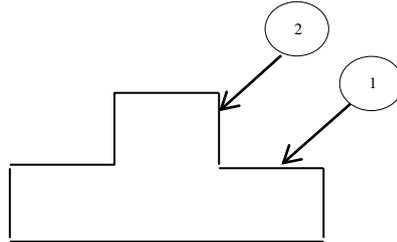
Ce document doit comporter les éléments suivants :

- Dessin complet de la pièce
- Cotation dimensionnelle
 - liaison brute
 - les cotes fonctionnelles
 - ajustements
- Spécification géométrique (\perp , \parallel , \odot , \equiv , ...)
- Spécification d'état de surface ($Ra\sqrt{\quad}$)

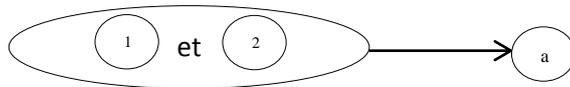
- e) Désignation de toutes les surfaces (1, 2, 3,..., A, B, C,...)
- f) Divers
 - Matière de la pièce
 - Procédé d'obtention de brut
 - Volume de la série

1.2.2. Tableau de définition des opérations élémentaires

Une opération élémentaire est l'action d'un outil ou plusieurs outils associés sur une surface élémentaire.



On peut travailler la surface (1) et (2)



Repère de groupement	Surface groupée	Outillage et motif	Symbole
(a)	(1) et (2)	Fraise 2 tailles	a_F

1.2.3. Analyse des contraintes d'antériorité

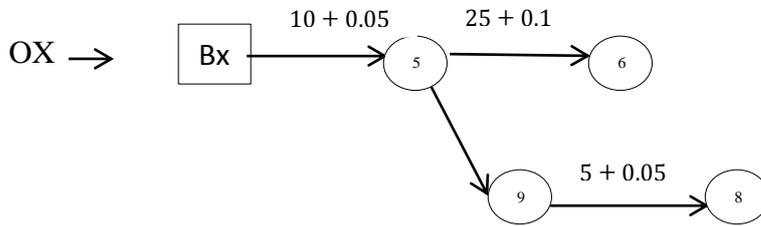
1.2.3.1. Étude préliminaire suivant les différents cas d'antériorité

1.2.3.1.1. Contraintes d'ordre métrologique

1.2.3.1.1.1. *Contrainte dimensionnelle*

On fait l'analyse dans les trois directions (ox, oy, oz)

Exemple :

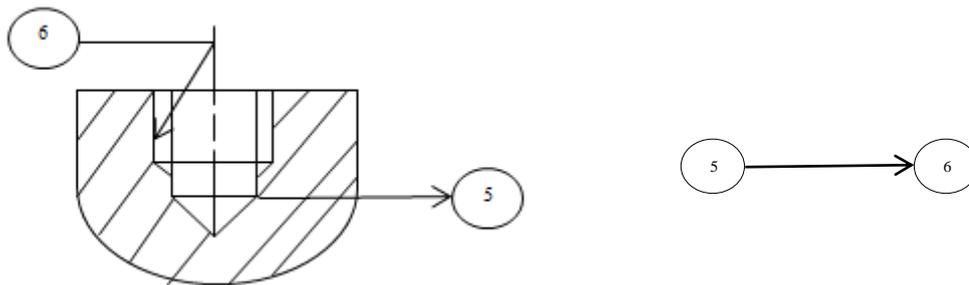


1.2.3.1.1.2. *Contrainte géométrique*

Exemple :

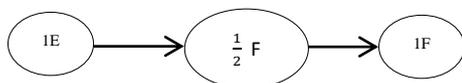


1.2.3.1.2. *Contrainte technologique*



❖ Rainure après alésage

❖ Pour réaliser l'alésage (6) Ø 18 H 7 il faut



❖ Etat de surfaces

$Ra \geq \sqrt[6.4]{\quad}$ \Rightarrow F (Finition directe)

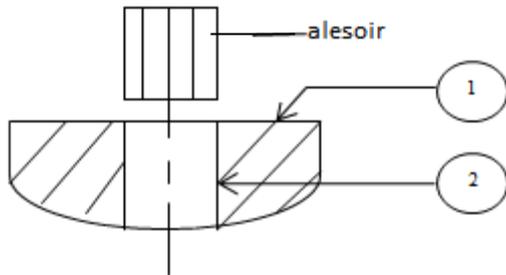
$\sqrt[3.2]{\quad} \leq Ra \leq \sqrt[6.4]{\quad}$ \Rightarrow E (Ebauche puis Finition)

$Ra \leq \sqrt[3.2]{\quad}$ \Rightarrow E \rightarrow 1/2F \rightarrow F

1.2.3.1.3. Contrainte économique

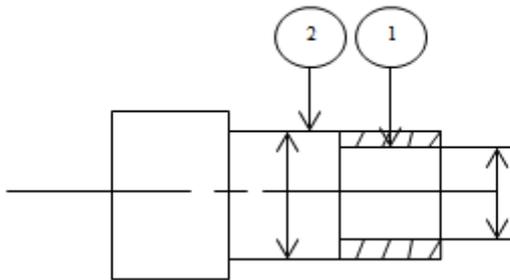
Le coût de la fabrication ,La durée de l'usinage ,le débit minimum et l'usure des outils conditionnent un choix précis la fabrication de la façon à ce que le coût soit le mini possible .

1.2.3.1.3.1. Usure des outils



① → ② De façon à ne pas détériorer l'alesoir.

1.2.3.1.3.2. Moindre usinage



① → ②
② En finition

1.2.3.2. Tableau d'analyse de contraintes d'antériorité

Faculté des sciences de l'ingénieur, D ^t de G. MECANIQUE				TABLEAU D'ANALYSE DE CONTRAINTES D'ANTERIORITE					Nom	
Ensemble :				Pièce :					Matière :	
N°	Dimensionnelle				Géométriques				Technologiques	Economique
	OX	OY	OZ	OB	\parallel	\perp	\ominus	\equiv	Opération	Moindre usinage
B							3F		5E	
5F										

Tableau 1-1 Tableau d'analyse de contraintes d'antériorités

1.2.4. Tableau des niveaux

Ce document se présente sous forme d'une matrice qui permet de résoudre systématiquement le problème de la technologie des opérations (voir exemple d'application).

	B	5_E	5_{1/2F}	5_F	T CBE	1	2	3	4
B					0	B	/	/	/
5_E	1				1	0	5_E	/	/
5_{1/2F}		1			1	1	0	5_{1/2F}	/
5_F			1		1	1	1	0	5_F

Tableau 1-2 Tableau des niveaux

1.2.5. Groupement des phases

Ce travail vise à regrouper les phases qui peuvent se faire sur un seul poste : on détermine ensuite un ordre chronologique des différentes phases (processus de fabrication)

	opérations	niveaux
Phase	9F	1
Fraisage	2E 9F	2
	4F	3
Phase		4
Tournage	6E 8F	5

Tableau 1-3 Tableau de groupement des phases

D'où la présentation des processus de fabrication :

Phase 10	fraisage	9F	2E
Phase 20	tournage	9F	4F 6E 8F

1.3. Application

1.3.1. Analyse de dessin de définition

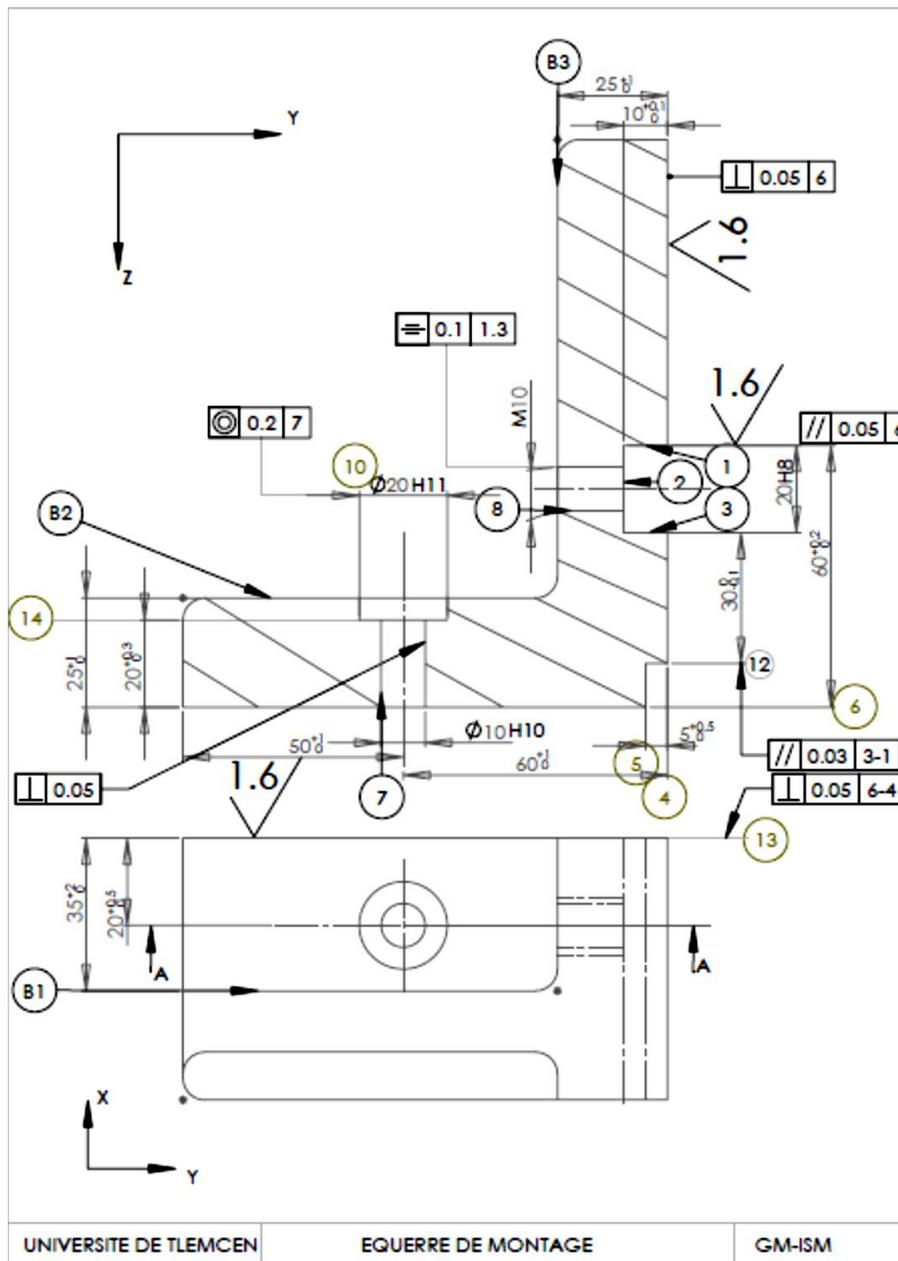
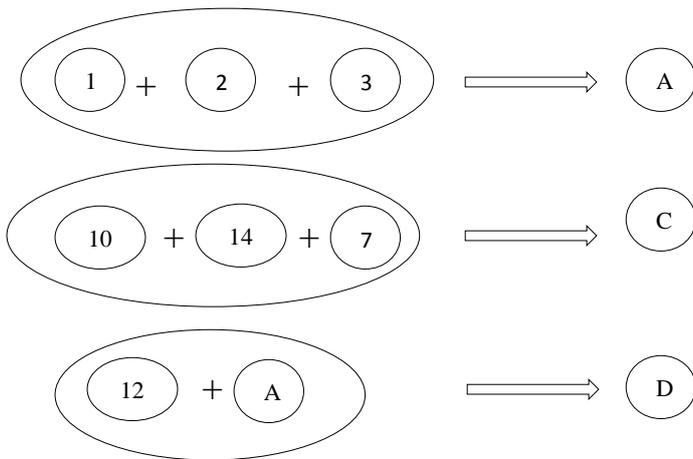


Figure 1-2 Dessin de définition

1.3.2. Groupement et association des surfaces

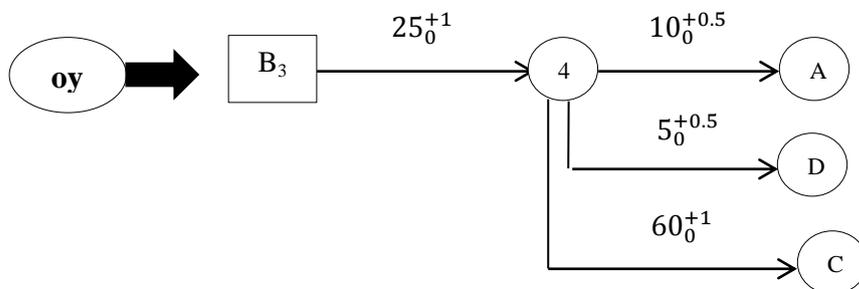
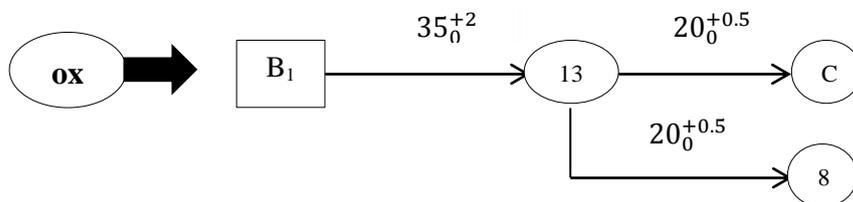


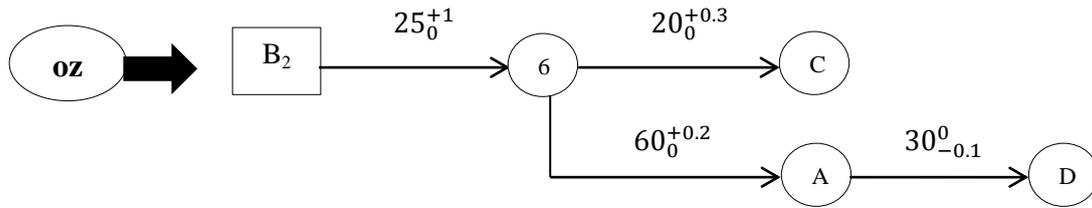
1.3.3. Déterminer les contraintes d'antériorité

1.3.3.1. Étude préliminaire suivant les différents cas d'antériorité

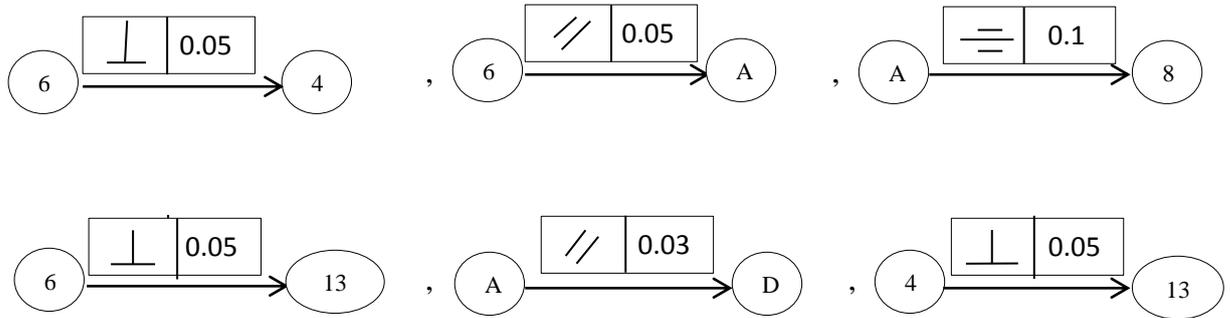
1.3.3.1.1. Contraintes d'ordre métrologique

1.3.3.1.1.1. Contrainte dimensionnelle





1.3.3.1.1.2. Contrainte géométrique



1.3.3.1.2. Contrainte technologique

$$\textcircled{A} : \sqrt[1.6]{\quad} \Rightarrow A_E + A \frac{1}{2} F + A_F$$

$$\textcircled{4} : \sqrt[1.6]{\quad} \Rightarrow 4_E + 4 \frac{1}{2} F + 4_F$$

$$\textcircled{6} : \sqrt[1.6]{\quad} \Rightarrow 6_E + 6 \frac{1}{2} F + 6_F$$

$$\textcircled{13} : \sqrt[1.6]{\quad} \Rightarrow 13_E + 13 \frac{1}{2} F + 13_F$$

$$\textcircled{C} : \sqrt[6.4]{\quad} \Rightarrow C_F$$

$$\textcircled{D} : \sqrt[6.4]{\quad} \Rightarrow D_F$$

$$\textcircled{8} : \sqrt[6]{4} \Rightarrow 8_F$$

$$\textcircled{11} : \sqrt[6]{4} \Rightarrow 11_F$$

1.3.3.1.3. Contrainte économique

$\textcircled{6}$ Avant \textcircled{C} , $\textcircled{4}$ Avant \textcircled{A}

$\textcircled{6}$ Avant \textcircled{D} , $\textcircled{4}$ Avant \textcircled{D}

1.3.3.2. Tableau d'analyse de contraintes d'antériorités

Faculté des sciences de l'ingénieur, D ^t de G. MECANIQUE				TABLEAU D'ANALYSE DE CONTRAINTES D'ANTERIORITE					Nom : Sadouki Yahia	
Ensemble : EQUERRE				Pièce : EQUERRE DE MONTAGE					Matière : AL	
N°	Dimensionnelle				Géométriques				Technologiques	Economique
	OX	OY	OZ	OB					Opération	Moindre usinage
B	13_E	4_E	6_E							
A_E									A_F^{1/2}	
A_F^{1/2}									A_F	
A_F					D_F			8_F		4_F
C_F										
D_F										
4_E									4_F^{1/2}	
4_F^{1/2}									4_F	
4_F		D_F A_E C_F			13_E				D_F A_E	D_F A_E
6_E									6_F^{1/2}	
6_F^{1/2}									6_F	
6_F			C_F A_E			13_E 4_E C_F				D_F C_F
8_F									11_F	
13_E									13_F^{1/2}	
13_F^{1/2}									13_F	
13_F	C_F 8_F									
11_F										

Tableau 1-4 Tableau d'analyse de contraintes d'antériorités

1.3.4. Tableau des niveaux

1.3.5 Groupement des phases

Ce travail vise à regrouper les phases qui peuvent se faire sur un seul poste, Par suite, on détermine un ordre chronologique des différentes phases (processus de fabrication)

Niveaux	Opérations
1	B → brut
2	6 _E
3	6 ¹ / ₂ F ← fraiseage
4	6 _F
5	
6	4 _E 4 ¹ / ₂ F ← fraiseage
7	4 _F
8	A _E
9	A ¹ / ₂ F ← fraiseage
10	A _F
11	D _F ← fraiseage 8 _F C _F ← perçage
12	11 _F ← taraudage

Tableau 1-6 Tableau de groupement des phases

D'où la présentation de processus de fabrication :

N° PH	Phase
Ph.00	Brut
Ph.10	Fraiseage (6)
Ph.20	Fraiseage (4, A, D)
Ph.30	Fraiseage (13)
Ph.40	Perçage (8, C)
Ph.50	Taraudage (11)

Tableau 1-7 Présentation de processus de fabrication

1.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une recherche bibliographique sur le processus de fabrication d'un produit industriel et les chronologies des opérations d'usinage. De même, nous avons présenté une application sur une pièce pour montrer les différentes étapes de la détermination d'un processus de fabrication.

CHAPITRE II

TOLERANCEMENT

FONCTIONNEL

2.1. Introduction

La cotation fonctionnelle est basée sur l'étude approfondie et exhaustive des conditions d'aptitude à l'emploi du produit, dont elle permet de définir les dimensions des éléments fonctionnels et leur position relative, par une cotation ni insuffisante, ni surabondante.

Pour travailler correctement, il faut d'abord faire une étude fonctionnelle de l'ensemble étudié à l'aide des méthodes appropriées (analyse fonctionnelle...).

Cela permettra de définir les fonctions réelles à satisfaire et facilitera la constitution d'une liste de « chaînes de cotes » à vérifier.

Il faut se rappeler également que la « cotation fonctionnelle » doit être prise au sens large c'est-à-dire que, en plus des côtes et tolérances, elle englobe toutes les autres spécifications pourvu qu'elles soient fonctionnelles parce que conditionnant l'aptitude à l'emploi (tolérancement géométrique, matériau, caractéristiques mécaniques, chimiques, états de surface, etc.) et même celles conditionnant la vendabilité : fiabilité, aspect, sécurité (pas d'arêtes coupantes).

2.2. Historique de la cotation fonctionnelle

Les premiers éléments identifiés relatifs à la cotation datent des années 1870 lors d'un cahier des charges émis par l'armée où il était spécifié que les fusils devaient pouvoir se réparer sur les champs de batailles et non partir en réparation après la bataille. Pour répondre à ce besoin, la notion de pièce de rechange apparaît. L'interchangeabilité impose rapidement pour les constituants mécaniques une notion de tolérance. La *cotation fonctionnelle* prend forme. La cotation fonctionnelle définit les règles de calculs des tolérances individuelles des pièces. [Mme CHEIKH 2005]

2.3. But de la cotation fonctionnelle

Le but de la cotation fonctionnelle est de déterminer les cotes des éléments d'un mécanisme qui assureront, avec les tolérances les plus larges, les conditions de fonctionnement (jeux fonctionnels). Ces cotes sont appelées cotes fonctionnelles. Ce sont celles qui doivent être portées sur les dessins de définition. L'utilisation de cette méthode de cotation conduit à une réduction du coût de fabrication. Coter fonctionnellement un dessin, c'est faire le choix raisonné entre ses diverses dimensions géométriquement équivalentes, et ne coter et tolérance que celles d'entre elles (dites "dimensions fonctionnelles") qui expriment directement les conditions d'aptitude du produit à l'emploi prévu (dites "cotes conditions"). [Mme CHEIKH 2005]

2.4. Extraction des chaînes de cotes et vérification des conditions fonctionnelles

Afin de systématiser la mise en équation des relations entre les cotes fonctionnelles dans un assemblage mécanique, de nombreux auteurs ont mis au point différentes méthodes de représentation des chaînes de côtes. Parmi celles-ci on peut citer la représentation vectorielle classique discutée. Cette méthode se base sur une étude graphique de l'assemblage ou du mécanisme qui est difficilement programmable et intégrable à un système CFAO. Dans ce qui suit, une méthodologie programmable d'extraction automatique de ces chaînes et vérification des exigences fonctionnelles basée sur un calcul matriciel est proposée.

2.4.1. Modélisation des fonctions d'un mécanisme

La conception d'un produit s'effectue autour des fonctions qu'il doit remplir. L'avant-projet permet d'exprimer ces fonctions sous formes de conditions fonctionnelles.

Dans une approche unidirectionnelle, les conditions fonctionnelles géométriques seront modélisées sur le dessin d'ensemble par des distances entre des bipoints limitées par des bornes maxi ou (et) mini. [BOURDET 2003]

2.4.2. Réalisation des conditions fonctionnelles sur les pièces

Dans le cas d'une fabrication de type unitaire, les conditions fonctionnelles pourraient être directement respectées. En effet il est théoriquement possible d'ajuster l'ensemble des pièces au fur et à mesure de leur fabrication, mais pour des raisons de coût et d'interchangeabilité, il est préférable de fabriquer les pièces de façon indépendante.

Le respect des conditions fonctionnelles est assuré par l'assemblage de nouvelles conditions fonctionnelles imposées sur la géométrie de chaque pièce. Les conditions fonctionnelles de l'ensemble mécanique sont ainsi transférées sur les différentes pièces. Du mécanisme. On peut distinguer deux types de condition fonctionnelle : celles qui créent déjà un lien entre deux éléments géométriques appartenant à une pièce isolée et qui ne nécessitent aucun transfert, et celles qui créent un lien entre deux pièces et qui nécessite un transfert de la condition fonctionnelle.

Le transfert de la condition fonctionnelle se fait en utilisant l'outil de calcul chaîne de côtes.

La chaîne de côtes doit être la plus courte possible, elle est obtenue en reliant directement les surfaces de contacts des différentes pièces composant l'assemblage et concourant à la mise en place des 2 surfaces terminales de la condition fonctionnelle. On part ainsi de l'une des surfaces terminales limitant la condition fonctionnelle pour aboutir en passant de pièce en pièce à l'autre surface terminale. [BOURDET 2003]

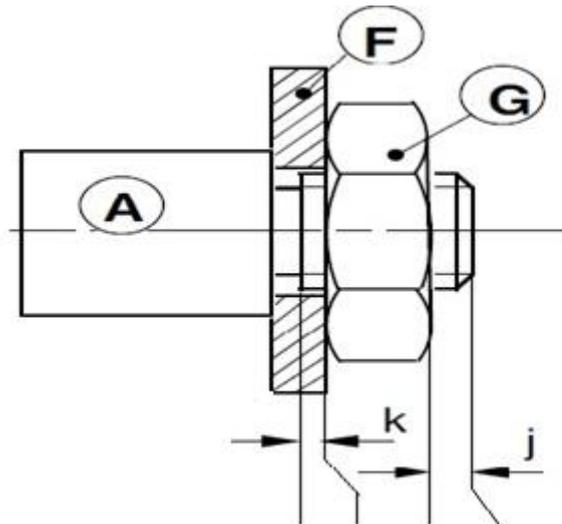


Figure 2-1 Exemple de conditions fonctionnelles d'un assemblage

Conditions fonctionnelles	
$J = 4 \pm 1$	Dépassement de la tête extérieur de filetage de l'arbre A par rapport à l'écrou G
$K = 2 \pm 0.5$	Dépassement intérieur suffisant des filetages pour la prise d'écrou G

Pour bien assimiler la méthode des dispersions, nous allons prendre un exemple qu'on va traiter par cette méthode pour l'extraction des cotes fonctionnelles. Cet exemple donné par la figure 2-1, est constitué par un assemblage de plusieurs pièces (3 pièces) et 2 cotes conditions ou jeux, afin de bien expliquer la méthodologie d'extraction des chaînes de cotes fonctionnelles qui est basée sur calcul matriciel. [Mme CHEIKH 2005]

2.4.3. Principe de la méthode de dispersion (méthode ΔI)

Pour modéliser la simulation unidirectionnelle d'un assemblage de pièces, toutes les surfaces et les lignes d'axe sont modélisées par des points qui sont numérotés par ordre croissant de gauche vers la droite comme l'illustre la figure 2-2. Les pièces sont repérées par des lettres alphabétiques. L'assemblage est ensuite représenté sous forme d'une matrice de dispersions affectées aux surfaces des pièces. Enfin, un calcul matriciel est effectué pour chaque condition fonctionnelle de l'assemblage par la méthode du transfert minimum.

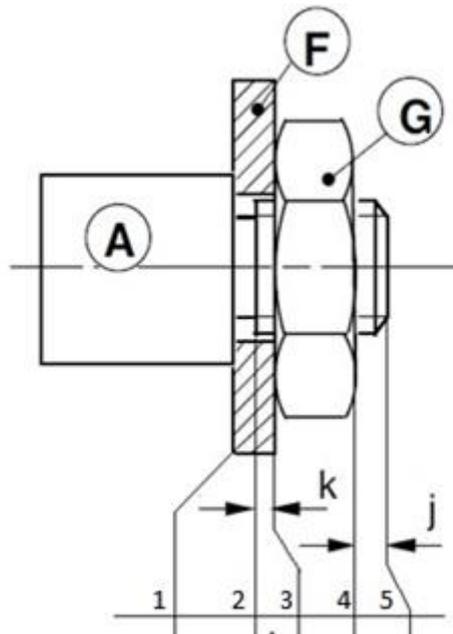


Figure 2-2 Surfaces et cotes fonctionnelles de l'assemblage

2.4.3.1. Matrice de l'assemblage

L'assemblage est présenté sous forme d'une matrice d' I_s colonnes et d' I_p lignes. I_s représente l'indice de surfaces et I_p représente l'indice de pièces. Comme le montre le tableau 2-1, l'élément A_{I_s, I_p} de la matrice contient une valeur de dispersion uniquement lorsque la surface I_s fait partie de la pièce I_p comme surface de contact ou surface terminale. Dans le cas contraire, il est nul.

Tableau 2-1 Représentation matricielle de l'assemblage

		Surfaces I_s				
		1	2	.....	4	5
Pièces I_p	A	0	$\Delta l_2^{(A)}$	.....	0	$\Delta l_5^{(A)}$
	F	0	0	.....	0	0
	G	0	0	.....	$\Delta l_4^{(G)}$	0

2.4.3.2. Méthode du transfert minimum

Le principe de la méthode est de reconnaître tout d'abord les surfaces qui délimitent une cote condition. Nous les notons l et m . Nous procédons à l'annulation des dispersions uniques qui sont présentes dans toutes les colonnes exceptées celles qui se trouvent sur les colonnes l et m . Nous procédons de la même manière pour les lignes, mais cette fois-ci sans exception bien sûr. Nous répétons ces opérations jusqu'à l'aboutissement à un transfert minimum donné par 0 ou 2 Δl par colonne. Une fois qu'on est en transfert minimum, les cotes fonctionnelles qui participent à la réalisation des cotes conditions sont les cotes délimitées par les surfaces qui abritent les deux dispersions présentes sur la pièce (même ligne de la matrice).

2.4.4. Vérification de la faisabilité des exigences fonctionnelles de l'assemblage

Vérifier la faisabilité des exigences fonctionnelles revient à vérifier si les moyens de fabrication disponibles dans l'atelier utilisés pour réaliser les cotes fonctionnelles peuvent assurer le respect des conditions fonctionnelles de l'assemblage. Or, les cotes fonctionnelles dépendent des dispersions d'usinage des surfaces limites sur les pièces.

La faisabilité est satisfaite lorsque l'intervalle de tolérance de la cote condition est toujours supérieur ou égal à la somme des dispersions prenant des valeurs minimales d'une base de donné. Cette procédure de vérification est réalisée pour toutes les cotes conditions en sommant toutes les dispersions restantes dans la matrice en état de transfert minimum et en satisfaisant l'équation suivante :

$$IT_{CC} \geq \sum \Delta l_i \quad (2.1)$$

Où CC représente la cote condition.

Tableau 2-2 Valeurs des dispersions mini pour l'exemple précédent

Sous assemblage <u>A-F-G</u>
$\Delta l_1^{(A)} = 0.05$
$\Delta l_1^{(F)} = 0.10$
$\Delta l_2^{(A)} = 0.20$
$\Delta l_3^{(F)} = 0.10$
$\Delta l_3^{(G)} = 0.20$
$\Delta l_4^{(G)} = 0.20$
$\Delta l_5^{(A)} = 0.1$

2.5. Optimisation des tolérances des cotes fonctionnelles

La première étape dans l'optimisation des tolérances des cotes fonctionnelles consiste en l'optimisation de toutes les dispersions des surfaces des pièces qui forment l'assemblage et qui influent sur les côtes conditions. Celles-ci sont automatiquement identifiées par la première procédure de la simulation qui est l'extraction automatique des chaînes de côtes fonctionnelles. A la fin de cette procédure une matrice globale d'optimisation des dispersions est bâtie. Dans ce qui suit nous présenterons deux méthodes d'optimisation de ces dispersions.

2.5.1. Formation de la matrice globale d'optimisation des dispersions

A partir des chaînes de tolérances exprimées en fonction des dispersions, on forme une matrice globale d'optimisation de nc lignes et nd colonnes. Dans cette matrice, chaque ligne Ic représente une cote condition et chaque colonne Id représente une dispersion comme le montre le tableau 2-3. On remarque que chaque ligne correspond à une chaîne de tolérances associée à une chaîne de cotes fonctionnelles. On remplit dans chaque colonne la valeur de la dispersion repérée par la variable x si celle-ci fait partie de la chaîne de tolérance. Dans le cas contraire on remplit la valeur 0.

Tableau 2-3 matrice globale d'optimisation

N^0	CC	Δl_1	Δl_2	...	Δl_{nd}	IT
1	CC_1	X	X	...	0	
2	CC_2	0	X	...	X	
...	
P	CC_{nc}	X	0	...	X	

2.5.2. Méthode des dispersions minimales

Cette méthode consiste à choisir des valeurs minimales de dispersions relevées par expérience en fonction des procédés de fabrication à utiliser pour réaliser les surfaces concernées sur les pièces qui forment l'assemblage. Ces valeurs sont introduites dans le tableau 2-3 à la place des variables x . Ensuite ces dispersions sont augmentées afin que leur somme égale l'intervalle de tolérance pour chaque cote condition. Ainsi le modèle de la vérification des exigences fonctionnelles donné précédemment par l'équation (2.1) est exprimé par l'équation (2.2) suivante dans le cas d'optimisation.

$$IT_{CC} = \sum_{i=1}^n \Delta l_i \quad (2.2)$$

Où n est le nombre de dispersions qui participent dans l'intervalle de tolérance de la cote condition.

Pour toutes les cotes conditions CC dans le tableau on calcule le reliquat ε donné par la relation (2.3). Ensuite on détermine l'ordre de traitement des lignes en fonction du reliquat croissant.

$$\varepsilon = IT_{CC} - \sum_{i=1}^n \Delta l_i \quad (2.3)$$

En traitant ligne par ligne suivant l'ordre de traitement déterminé, on calcule pour chaque cote condition la répartition k_j par la relation suivante :

$$k_j = \frac{\varepsilon}{n'} \quad (2.4)$$

Où n' est le nombre des dispersions qui peuvent être augmentées. La distribution de la répartition k_j est équitable sur toutes les dispersions qui pourraient être augmentées. Ainsi, nous optimisons les différentes dispersions en les calculant par la relation suivante :

$$\Delta l_{i_{opt.}} = \Delta l_i + k_j \quad (2.5)$$

2.5.3. Méthode des dispersions inconnues

A la différence de la précédente méthode, où une étude préalable est nécessaire pour le choix des valeurs minimales des dispersions à partir d'une base de donnée, les dispersions sont inconnues au départ et restent repérées par la variable x comme indiqué dans le tableau 2-4. [Mme CHEIKH 2005]

En premier lieu, on calcule le coefficient de répartition k'_j pour toutes les cotes conditions CC par la relation (2.6).

$$k'_j = \frac{IT_{CC} - \sum_{i=1}^w \Delta l_i}{p} \quad (2.6)$$

Avec

w le nombre des dispersions connues,

p le nombre des dispersions inconnues et

j le numéro d'itération.

On commence par la ligne dont le coefficient k'_j est le plus petit. Une fois que les valeurs des dispersions de la ligne sont calculées par la relation (2.7), nous les affichons sur toute la colonne où elles sont présentes. On recommence à calculer les nouveaux coefficients k'_j avec les nouvelles Δl_i jusqu'à l'épuisement des lignes des cotes condition CC.

$$\Delta l_{i_{opt.}} = k'_j \quad (2.7)$$

2.6. Synthèses des cotes fonctionnelles optimisées

Le concepteur, généralement, détermine par un calcul de construction mécanique (résistance de matériaux, poids...) des valeurs limites à ne pas dépasser. Les valeurs minimales sont généralement liées aux contraintes de résistance des matériaux. Alors que les valeurs maximales sont le plus souvent liées aux contraintes d'encombrement et de poids.

La méthode des dispersions peut être utilisée pour simuler et déterminer les valeurs des cotes fonctionnelles qui répondent aux exigences fonctionnelles. Etant donné que les cotes fonctionnelles doivent être à la fin fabriquées, le modèle fondamental des cotes moyennes présenté au chapitre iv, permet d'établir des relations entre les cotes fonctionnelles et les cotes de simulation L_i comme le montre la relation (2.8). [Mme CHEIKH 2005]

$$Cf_{i,j} = L_j - L_i \quad \text{avec } j > i \quad (2.8)$$

Pour positionner n surfaces il faut déterminer (n-1) longueurs moyennes de base. Nous aurons besoins donc de (n-1) équations à résoudre pour déterminer les (n-1) longueurs sachant que $L_1 = 0$ (en prenant l'origine sur la première surface). Un système d'équations est ainsi construit en utilisant les cotes condition moyennes CC et les cotes standards CS par les relations (2.9) et (2.10).

$$(CC_{i,j})_{moy} = L_j - L_i \quad (2.9)$$

$$(CS_{i,j})_{moy} = L_j - L_i \quad (2.10)$$

Où i et j sont les surfaces qui délimitent les cotes condition CC ou CS et où CC_{moy} et CS_{moy} sont données dans le cas de cotes bilimites par :

$$CC_{moy} = \frac{CC_{min} + CC_{max}}{2} \quad (2.11)$$

$$CS_{moy} = \frac{CS_{min} + CS_{max}}{2} \quad (2.12)$$

Et de l'autre côté, CC_{moy} et CS_{moy} sont données dans le cas de cotes unilimites par :

$$CC_{moy} = \frac{CC_{min} + (CC_{min} + \sum(\Delta l_i)_{opt.})}{2} \quad (2.13)$$

$$CS_{moy} = \frac{CS_{min} + (CS_{min} + \sum(\Delta l_i)_{opt.})}{2} \quad (2.14)$$

Les équations (2.9) à (2.10) donnent un système de n équations à n inconnues L_i . Une fois que les longueurs de simulation L_i sont trouvées, on calcule les cotes fonctionnelles moyennes par la relation suivante :

$$(Cf_{i,j})_{moy} = L_j - L_i \quad (2.15)$$

Avec i et j les surfaces qui délimitent la cote condition CC en question.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté le tolérancement fonctionnel par la méthode des dispersions. Ensuite une procédure d'optimisation des dispersions sur la base de deux méthodes (dispersion minimales et dispersions inconnues).

CHAPITRE III TOLERANCEMENT DE FABRICATION DE FABRICATION

3.1. Généralités

Le calcul des cotes de fabrication appelé simulation d'usinage est une opération très importante dans l'élaboration du dossier de fabrication d'une production en série.

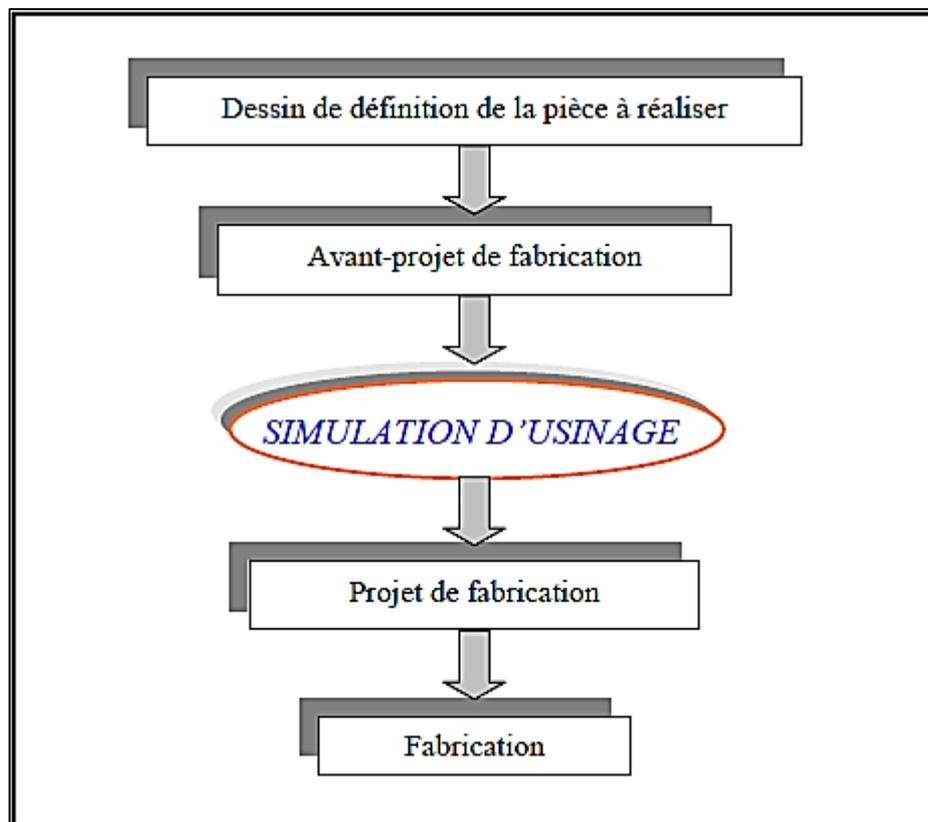


Figure 3-1 Organigramme de la production d'une pièce

Le bureau d'étude réalise le dessin de définition, sur lequel figurent toutes les spécifications dimensionnelles et géométriques. Le bureau des méthodes établit l'avant-projet d'étude de fabrication et la simulation vient l'approuver ou le désapprouver.

La simulation d'usinage a deux objectifs

- La vérification de l'avant-projet de l'étude de fabrication (faisabilité de la gamme d'usinage),
- Le calcul des cotes de fabrication optimisées.

Seules les spécifications suivant la direction de simulation sont reportées sur le dessin de définition. Le passage du modèle géométrique fonctionnel défini suivant le formalisme GPS à celui utilisé par les simulations de fabrication unidirectionnelles se réalisera sous un certain nombre d'hypothèses. Le processus de la simulation utilise le modèle équivalent (Figure 3.2).

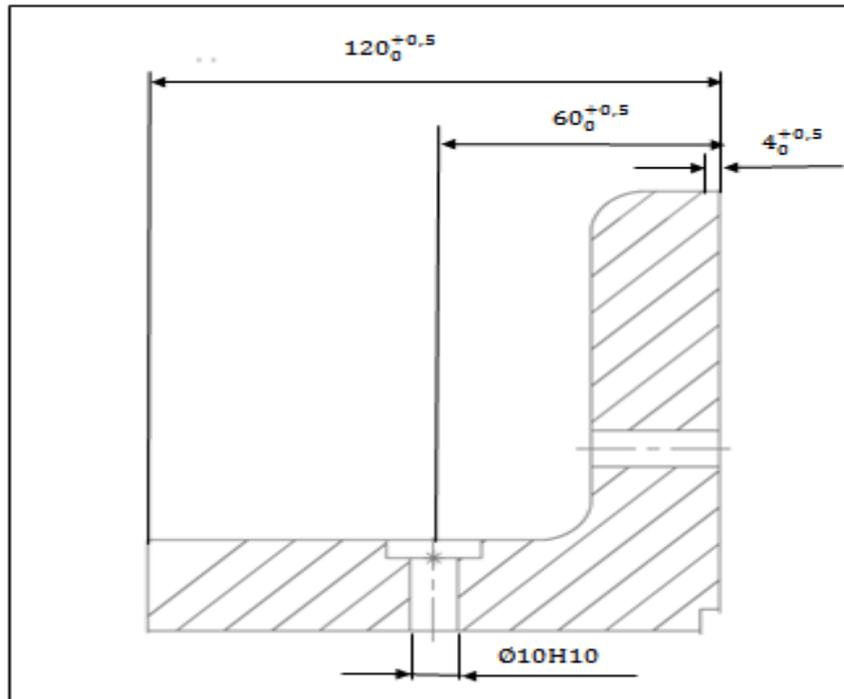


Figure 3-2 Modèle équivalent de la simulation

3.2. Simulation par la méthode Δl

La méthode Δl ou la méthode des dispersions a été mise au point par le Professeur [P. Bourdet en 1973]. Elle comporte trois procédures :

- Vérification des avant-projets de fabrication
- Optimisation des dispersions de fabrication
- Calcul des cotes de fabrication

3.2.1. Vérification des avant-projets de fabrication

Valider un avant-projet, revient à vérifier si le processus d'usinage et les moyens de fabrication disponibles dans l'atelier peuvent réaliser toutes les cotes fonctionnelles imposées par le bureau d'étude.

Cette condition est satisfaite lorsque l'intervalle de tolérance de la cote condition bi limite T_{CBE} , est supérieur ou égal à l'écart de fabrication qui la concerne. Soit :

$$T_{CBEj} \geq \sum \Delta l_i \tag{3.1}$$

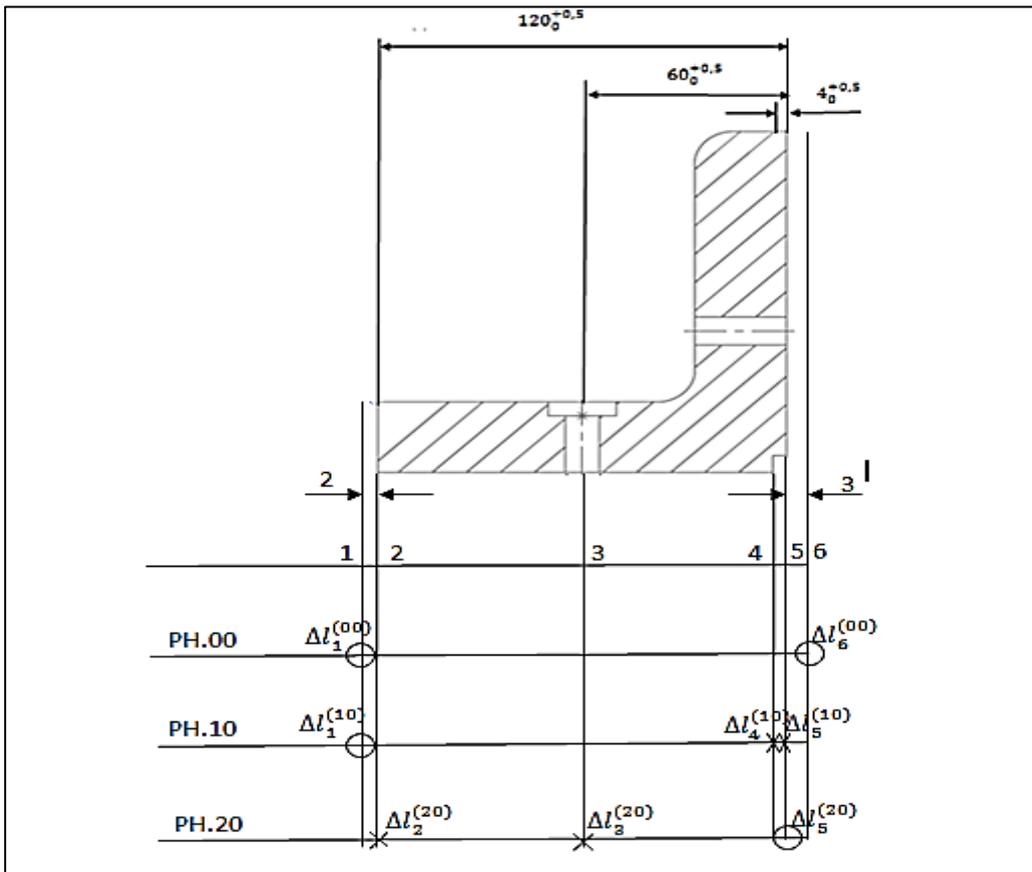


Figure 3-3 Processus de fabrication (Méthode Δl)

En fonction du parc machines-outils existant et en fonction de l'ordonnement de la gamme d'usinage illustrée par la figure 3-3, l'avant-projet est présenté sous une forme matricielle (tableau 3-1). Il devient une matrice d' I_s colonnes et d' I_p lignes. I_s représente le nombre de surfaces et I_p représente le nombre de phases. L'élément A_{I_s, I_p} contient la valeur de la dispersion uniquement lorsque la surface I_s intervient dans la phase I_p comme surface usinée ou surface de reprise. Dans le cas contraire, il est nul.

NB : Un symbole type rond représente une dispersion de reprise et un symbole type croix représente une dispersion d'usinage. Les surfaces seront numérotées par ordre croissant de gauche à droite.

	1	2	3	4	5	6
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(00)}$
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

Tableau 3-1 Représentation matricielle de l'avant-projet de fabrication

Pour pouvoir vérifier les avant-projets, nous devons calculer l'écart de fabrication $\sum \Delta l_i$. Ce dernier peut être calculé par trois méthodes :

- méthode du graphe CF [CHE 94],
- méthode des intersections des dispersions [BOU 73]
- méthode du transfert minimum [DUR 81].

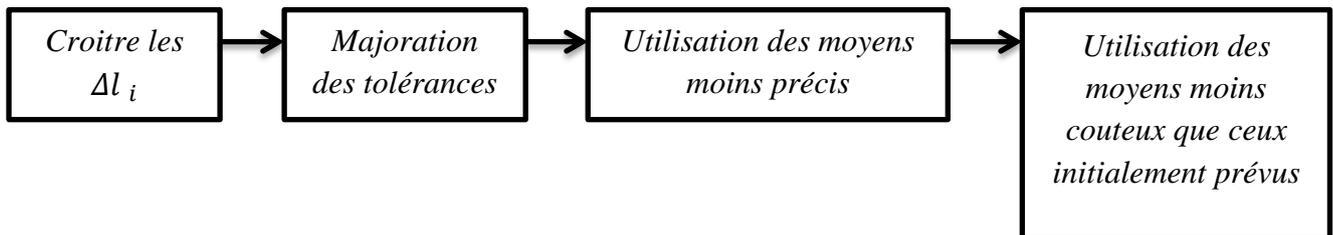
La méthode adoptée dans cette thèse est celle du transfert minimum. C'est une méthode matricielle et facilement programmable.

3.2.2. Optimisation des dispersions de fabrication

La tolérance d'une cote de fabrication est la résultante des dispersions affectées aux surfaces qui la délimitent. Le but de l'optimisation des dispersions est la majoration des tolérances des côtes de fabrication. Cela revient à faire croître dans la mesure du possible les valeurs des dispersions tout en respectant les équations limites (3.2).

$$T_{CBEj} = \sum \Delta l_i \quad (3.2)$$

Cette équation, nous permettra d'obtenir des pièces correctes vis-à-vis du dessin de définition en utilisant des moyens moins précis et moins coûteux que ceux initialement prévus.



L'optimisation des tolérances de fabrication peut être initiée en prenant comme données de départ, des dispersions minimales des procédés dans une base de données ($\Delta l_{i_{mini}}$) ou en posant les dispersions inconnues.

3.2.2.1. Optimisation des tolérances initiée avec des dispersions minimales

Une fois que les valeurs des dispersions minimales des différents procédés d'usinage et des montages d'usinage sont calculées ou choisies d'une base des données de dispersions, et que l'avant-projet d'étude de fabrication est vérifié par la relation (3.1), il est possible d'optimiser les valeurs de ces dispersions en appliquant les équations limites (3.2). Nous dressons le tableau d'optimisation et de répartition illustré par le tableau 3-2. Ensuite, nous calculons les différences entre les tolérances des cotes BE et leurs écarts de fabrication ε . Nous les ordonnons suivant l'ordre croissant afin de déterminer l'organisation du traitement de l'optimisation. [HAMOU 2004]

N	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_1^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(00)}$	T_{CBE}	$\sum \Delta l_i$	ϵ
1	0	0	0	0,025	0	0	0,025	0	0,5	0,05	0,45
2	0	0	0,025	0	0	0	0,025	0	0,5	0,05	0,45
3	0	0	0	0	0,4	0,1	0	0	0,5	0,5	0
4	0	0,025	0,025	0,025	0	0,1	0,025	0	-	0,2	-
5	0,5	0,025	0,025	0	0	0,1	0	0,5	-	1,15	-

Tableau 3-2 Tableau d'optimisation et de répartition (Δl mini)

En traitant rang par rang suivant l'ordre du traitement, nous calculons pour chaque cote condition BE, la répartition Ic_i par la relation suivante à chaque nouvelle itération :

$$k_j = \frac{T_{CBEj} - \sum_{i=1}^n \Delta l_i}{n'} \quad (3.3)$$

Où n' est le nombre des dispersions qui peuvent être augmentées et n le nombre de dispersions qui participent dans l'écart de fabrication de la cote condition. La distribution de la répartition Ic_i est équitable sur toutes les dispersions qui peuvent être augmentées. Ainsi, nous optimisons les différentes dispersions de fabrication en les calculant par la relation suivante :

$$\Delta l_{i_{opt}} = \Delta l_i + k_j \quad (3.4)$$

Enfin, nous calculons les tolérances des cotes de fabrication en additionnant les dispersions optimisées affectées aux surfaces qui délimitent la cote de fabrication CF. Soit :

$$T_{CFid-ia} = \Delta l_{i_{d_{opt}}} + \Delta l_{i_{a_{opt}}} \quad (3.5)$$

Où i_{d} et i_a sont les surfaces de départ et d'arrivée qui délimitent la cote de fabrication CF.

3.2.2.2. Optimisation des tolérances avec les dispersions inconnues

On procède à la reconnaissance des dispersions présentes dans les écarts de fabrication concernant les cotes conditions par la méthode de transfert minimum. Nous formons ainsi, un tableau d'optimisation et de vérification des APEF. Les dispersions présentes dans l'écart sont inconnues et repérées par la lettre x, tandis que celles qui ne participent pas, elles sont repérées par 0 comme le montre le tableau 3-3. [HAMOU 2004]

N	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_1^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(00)}$	T_{CBE}
1	0	0	x	0	0	0	x	0	0,5
2	0	0	0	x	0	0	x	0	0,5
3	0	0	0	0	x	x	0	0	0,5
4	0	x	x	0	0	x	x	0	-
5	x	x	0	0	0	x	0	x	-

Tableau 3-3 Tableau d'optimisation et de vérification

En premier lieu, nous calculons le coefficient de répartition k'_j pour toutes les cotes condition BE par la relation (3.6).

$$k'_j = \frac{T_{CBEj} - \sum_{i=1}^m \Delta l_i}{p} \quad (3.6)$$

Nous commençons par la ligne dont le coefficient k'_j est le plus petit. Une fois que les valeurs des dispersions de la ligne sont calculées, nous les affichons sur toute la colonne où elles sont présentes. Nous recommençons à calculer les nouveaux coefficients k'_j avec les nouvelles Δl_i jusqu'à l'épuisement des lignes des cotes condition BE bi limites comme le montre le tableau 3-4

N	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_1^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(00)}$	T_{CBE}	k_1	k_2	k_3
1	0	0	0,25	0	0	0	0,25	0	0,5	0,25	-	-
2	0	0	0	0,25	0	0	0,25	0	0,5	0,25	0,25	0,25
3	0	0	0	0	0,25	0,25	0	0	0,5	0,25	0,25	-
4	0	0,5	0,25	0	0	0,25	0,25	0	-	-	-	-
5	0,5	0,5	0	0	0	0,25	0	0,5	-	-	-	-

Tableau 3-4 Tableau de répartition et d'optimisation (Δl inconnues)

Une fois que les dispersions optimisées sont enregistrées, nous calculons les tolérances de fabrication par la relation (3.5).

3.2.3. Calcul des cotes de fabrication

Avant de calculer les cotes de fabrication participantes aux différentes cotes conditions, il faut tout d'abord les reconnaître et les recenser automatiquement. Dans le module de vérification une fois qu'on est en transfert minimum, les cotes de fabrication qui participent à la réalisation des conditions sont les cotes délimitées par les surfaces qui présentent deux dispersions. Ainsi, nous obtenons l'ensemble des cotes de fabrication nécessaires dans l'avant-projet d'étude de fabrication.

1	$T_{CBE_{2-5}} = T_{CF_{2-5}}$
2	$T_{CBE_{3-5}} = T_{CF_{3-5}}$
3	$T_{CBE_{4-5}} = T_{CF_{4-5}}$
4	$T_{CBM_{1-2}} = T_{CF_{1-5}} + T_{CF_{2-5}}$
5	$T_{CBM_{5-6}} = T_{CF_{1-6}} + T_{CF_{1-5}}$

Tableau 3-6 Chaînes de côtes de fabrication

Une fois que toutes les cotes de fabrication de l'APEF sont mises en place, nous calculons les longueurs de simulation l , en utilisant les longueurs moyennes de base. Nous construisons ainsi un système d'équations en utilisant les cotes condition moyennes CBE et CBM par les relations (3.7) et (3.8). [HAMOU 2004]

$$CBE_{id-ia} \text{ moy.} = l_{ia} - l_{id} \quad (3.7)$$

$$CBM_{id-ia} \text{ moy.} = l_{ia} - l_{id} \quad (3.8)$$

Où i_d et i_a sont les surfaces qui délimitent la cote condition en question

$$\text{Avec} \quad CBE_{id-ia} \text{ moy.} = \frac{CBE_{id-ia} \text{ max.} + CBE_{id-ia} \text{ min.}}{2} \quad (3.9)$$

$$\text{Et} \quad CBM_{id-ia} \text{ moy.} = \frac{Cpm_{id-ia} + (CBE_{id-ia} + \sum \Delta l_i)}{2} \quad (3.10)$$

Où Cpm_{id-ia} est la cote condition BM (copeau minimum).

Si la cote CBE est une limite, sa cote moyenne se calcule aussi par la relation (3.10) en remplaçant Cpm par CBE_{min} .

Une fois que les longueurs de simulation sont déterminées, nous calculons les cotes de fabrication moyennes par la relation suivante :

$$CF_{id-ia} \text{ moy.} = l_{ia} - l_{id} \quad (3.11)$$

Avec i_d et i_a les surfaces qui délimitent la cote de fabrication.

Les tolérances des cotes de fabrication sont données par la relation (3.5). Nous obtenons ainsi, le résultat des cotes de fabrication ordonnées par phase et présenté dans le tableau 3-7.

PH00	$CF_{1-6} = 126,875 \pm 0,5$
PH10	$CF_{1-5} = 123 \pm 0,375$ $CF_{4-5} = 4,25^{+0,5}_0$
Ph20	$CF_{2-5} = 120,25^{+0,5}_0$ $CF_{3-5} = 60,25^{+0,5}_0$

Tableau 3-7 Résultat des cotes de fabrication (Méthode ΔI)

3.3. Conclusion

Ce chapitre présente un bref aperçu sur l'application de la méthode des dispersions à la simulation des avants projets de fabrication et la synthèse des cotes de fabrication optimisées. La simulation est effectuée en utilisant la méthode du transfert minimum. Celle-ci présente l'avantage d'un calcul matriciel facilement programmable pour l'automatisation de la vérification des avants projets de fabrication, de l'optimisation des dispersions et de la synthèse des cotes de fabrication et leurs intervalles de tolérances optimisées.

CHAPITRE IV TOLERANCEMENT FONCTIONNEL ET DE FABRICATION APPLICATION

4.1. Introduction

Dans ce chapitre on va faire une application de la méthode des dispersions sur un assemblage (montage d'un galet), afin de déterminer la cotation fonctionnelle des différents dessins de définition et la cotation de fabrication des différentes géométries intermédiaire des différentes pièces.

4.2. Extraction des chaînes des cotes fonctionnelles

L'assemblage des pièces 1, 2, 3 et 4, contenant les cotes conditions (ou les jeux) a , et h est donnée par la figure 4-1. Sur cette même figure sont illustrées les deux chaînes de côtes fonctionnelles données par l'analyse vectorielle graphique. Appliquons la méthode des dispersions pour le calcul matriciel de chaque jeu fonctionnel et retrouvons ces chaînes.

$$IT_{CC} \geq \sum \Delta l_i \quad (4.1)$$

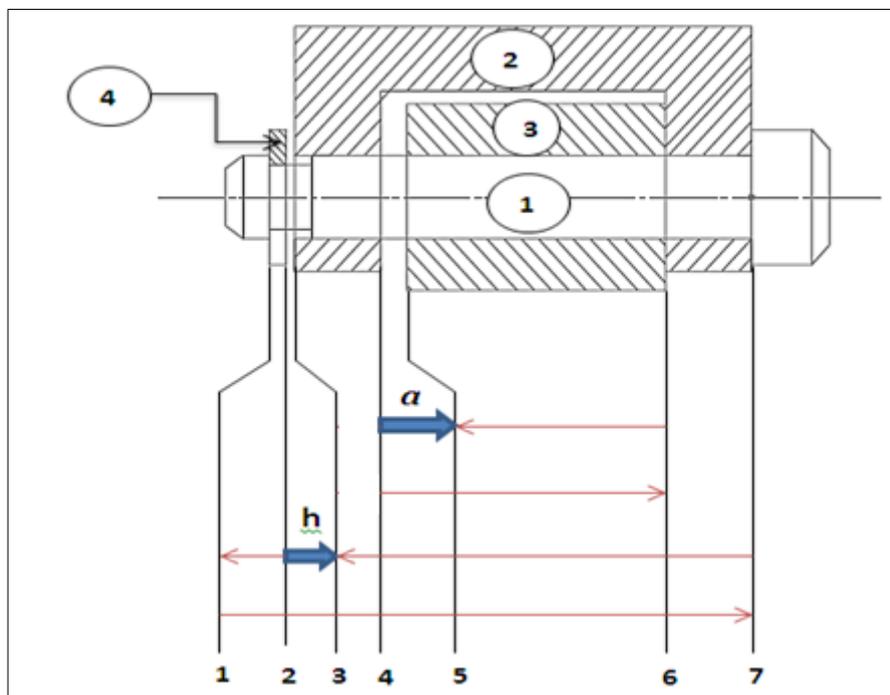


Figure 4-1 Sous-assemblage 1-2-3-4

Soit la représentation matricielle des dispersions pour le sous-assemblage 1-2-3-4, donnée par le tableau 4-1 suivant :

Tableau 4-1 Matrice des dispersions pour le sous –assemblage 1-2-3-4

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	0	0	0	0	0

a)-calcul pour la cote condition $a_{4,5}$ délimitée par les surfaces l=4 et m=5

I⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 2 et 3)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	$\Delta l_4^{(2)}$	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	0	0	0	0	0	0

I⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 4)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	$\Delta l_4^{(2)}$	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

2⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 1)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	$\Delta l_4^{(2)}$	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

2⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	0	0	0	0	0	0	0
Pièce2	0	0	0	$\Delta l_4^{(2)}$	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

3⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	0	0	0	0	0	0	0
Pièce2	0	0	0	$\Delta l_4^{(2)}$	0	$\Delta l_6^{(2)}$	0
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

On remarque que le tableau ne contient que des lignes et colonnes contenant 0 ou deux éléments (Δl_i) sauf les colonnes 4 et 5, on est alors en transfert minimum. L'intervalle de tolérance concernant la cote condition $a_{4,5}$ est donné en sommant les dispersions Δl comme suit :

$$\Delta a_{4,5} = \sum \Delta l_i = (\Delta l_4^{(2)} + \Delta l_6^{(2)}) + (\Delta l_5^{(3)} + \Delta l_6^{(3)}) \quad (4.2)$$

La chaîne de tolérance des cotes fonctionnelles pour la cote condition $a_{4,5}$ est donnée par :

$$ITa_{4,5} = ITcf_{4,6}^{(2)} + ITcf_{5,6}^{(3)} \quad (4.3)$$

Les cotes fonctionnelles qui influent sur la cote condition $a_{4,5}$ sont donc $Cf_{4,6}^{(2)}$ et $Cf_{5,6}^{(3)}$.

A partir des équations (4.1) et (4.2), la condition fonctionnelle $a_{4,5}$ est vérifiée en prenant des dispersions minimales de référence par la relation suivante :

$$ITa_{4,5} \geq (\Delta l_4^{(2)} + \Delta l_6^{(2)}) + (\Delta l_5^{(3)} + \Delta l_6^{(3)}) \quad (4.4)$$

b)-calcul pour la cote condition $h_{2,3}$ limitée par les surfaces l=2 et m=3

A partir du tableau 4-1 cherchons la condition du transfert minimum.

$I^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation des colonnes 4 et 5)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	$\Delta l_3^{(2)}$	0	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	0	0	0	0	0

$I^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 3)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	$\Delta l_3^{(2)}$	0	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	0	0	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	0	0	0	0	0

$2^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 6)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	$\Delta l_3^{(2)}$	0	0	0	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	0	0	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	0	0	0	0	0

On remarque que le tableau ne contient que des lignes et colonnes contenant 0 ou deux éléments (Δl_i) sauf les colonnes 2 et 3, on est alors en transfert minimum. L'intervalle de tolérance concernant la cote condition $h_{2,3}$ est donné en sommant les dispersions Δl comme suit :

$$\Delta h_{2,3} = \sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(1)} + \Delta l_7^{(1)}) + (\Delta l_3^{(2)} + \Delta l_7^{(2)}) + (\Delta l_1^{(4)} + \Delta l_2^{(4)}) \quad (4.5)$$

La chaîne de tolérance des cotes fonctionnelles pour la cote condition $h_{3,4}$ est donnée par :

$$ITh_{2,3} = ITcf_{1,7}^{(1)} + ITcf_{3,7}^{(2)} + ITcf_{1,2}^{(4)} \quad (4.6)$$

Les cotes fonctionnelles qui influent sur la cote condition $h_{2,3}$ sont donc $Cf_{1,7}^{(1)}$, $Cf_{3,7}^{(2)}$ et $Cf_{1,2}^{(4)}$.

A partir des équations (4.1) et (4.5), la condition fonctionnelle $h_{2,3}$ est vérifiée en prenant des dispersions minimales de référence par la relation suivante :

$$ITh_{2,3} \geq (\Delta l_1^{(1)} + \Delta l_7^{(1)}) + (\Delta l_3^{(2)} + \Delta l_7^{(2)}) + (\Delta l_1^{(4)} + \Delta l_2^{(4)}) \quad (4.7)$$

4.3. Application au sous-assemblage 1-2-3-4 par méthode des dispersions minimales

L'application de la procédure d'extraction des chaînes de côtes fonctionnelles appliquée au sous-assemblage 1-2-3-4 a permis d'avoir à partir des équations (4.2) et (4.5) les chaînes de tolérances associées suivantes :

$$\Delta a_{4,5} = \sum \Delta l_i = (\Delta l_4^{(2)} + \Delta l_6^{(2)}) + (\Delta l_5^{(3)} + \Delta l_6^{(3)})$$

$$\Delta h_{2,3} = \sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(1)} + \Delta l_7^{(1)}) + (\Delta l_3^{(2)} + \Delta l_7^{(2)}) + (\Delta l_1^{(4)} + \Delta l_2^{(4)})$$

Une fois les valeurs des dispersions minimales choisies d'une base de données de dispersions on les introduit dans la matrice d'optimisation suivante formée à partir des équations précédentes :

N ⁰	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT	$\sum \Delta l_i$	ε	n	$\frac{\varepsilon}{n}$
1	$a_{4,5}$	0	0	0	0	0.2	0.1	0.05	0.05	0	0	0.8	0.4	0.4	4	0.1
2	$h_{2,3}$	0.05	0.05	0.1	0.2	0	0	0	0	0.05	0.05	0.6	0.5	0.1	6	0.0166

Procédure d'optimisation :

Détermination de la ligne de traitement pour le rang 1 : après avoir calculé le reliquat ε et $\frac{\varepsilon}{n}$ on remarque que l'ordre du traitement des lignes est le suivant : 2-1

Rang 1 : traitement de la ligne 2

N ⁰	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT	$\sum \Delta l_i$	ε	n	$\frac{\varepsilon}{n}$
2	$h_{2,3}$	0.0666	0.0666	0.1166	0.2166	0	0	0	0	0.0666	0.0666	0.6	0.6	0	0	-

Report des dispersions optimisées et détermination du rang 2

N ⁰	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT	$\sum \Delta l_i$	ε	n	$\frac{\varepsilon}{n}$
1	$a_{4,5}$	0	0	0	0	0.2	0.1	0.05	0.05	0	0	0.8	0.4	0.4	4	0.1
2	$h_{2,3}$	0.0666	0.0666	0.1166	0.2166	0	0	0	0	0.0666	0.0666	0.6	0.6	0	0	-

Rang 2 : traitement de la ligne 1

N ⁰	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT	$\sum \Delta l_i$	ε	n	$\frac{\varepsilon}{n}$
1	$a_{4,5}$	0	0	0	0	0.3	0.2	0.15	0.15	0	0	0.8	0.8	0	0	0.1

Enfin on obtient le tableau final des dispersions optimisées

N°	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT	$\sum \Delta l_i$	ε	n	$\frac{\varepsilon}{n}$
1	$a_{4,5}$	0	0	0	0	0.3	0.2	0.15	0.15	0	0	0.8	0.8	0	0	-
2	$h_{2,3}$	0.0666	0.0666	0.1166	0.21266	0	0	0	0	0.0666	0.0666	0.6	0.6	0	0	-

Le calcul des intervalles de tolérances optimisées des cotes fonctionnelles est effectué à partir des dispersions optimisées comme le montre le tableau suivant :

Pièces	Cotes fonctionnelles	$\sum \Delta l_i$	IT
1	$cf_{1,7}^{(1)}$	$\Delta l_1^{(1)} + \Delta l_7^{(1)}$	0.1332
2	$cf_{4,6}^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)} + \Delta l_6^{(2)}$	0.45
	$cf_{3,7}^{(2)}$	$\Delta l_3^{(2)} + \Delta l_7^{(2)}$	0.2832
3	$cf_{5,6}^{(3)}$	$\Delta l_5^{(3)} + \Delta l_6^{(3)}$	0.35
4	$cf_{1,2}^{(4)}$	$\Delta l_1^{(4)} + \Delta l_2^{(4)}$	0.1832

4.4. Application au sous-assemblage 1-2-3-4 par méthode des dispersions inconnues

L'application de la procédure d'extraction des chaînes de côtes fonctionnelles appliquée au sous-assemblage 1-2-3-4 a permis d'avoir à partir des équations (4.2) et (4.5) les chaînes de tolérances associées suivantes :

$$\Delta a_{4,5} = \sum \Delta l_i = (\Delta l_4^{(2)} + \Delta l_6^{(2)}) + (\Delta l_5^{(3)} + \Delta l_6^{(3)})$$

$$\Delta h_{2,3} = \sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(1)} + \Delta l_7^{(1)}) + (\Delta l_3^{(2)} + \Delta l_7^{(2)}) + (\Delta l_1^{(4)} + \Delta l_2^{(4)})$$

A partir de ces équations on forme la matrice d'optimisation suivante :

N°	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT
1	$a_{4,5}$	0	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0.8
2	$h_{2,3}$	x	x	x	x	0	0	0	0	x	x	0.6

Procédure d'optimisation :

Détermination de la ligne de traitement pour le rang 1

N^0	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT	k'_1
1	$a_{4,5}$	0	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0.8	0.2
2	$h_{2,3}$	x	x	x	x	0	0	0	0	x	x	0.6	0.1

D'après le tableau on remarque que la ligne 2 a la plus petit coefficient donc on va commencer par traiter cette ligne.

Traitement de la ligne 2

N^0	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT	k'_1
2	$h_{2,3}$	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0.1	0.1	0.6	0.1

Report des dispersions calculées et détermination de la ligne de traitement pour le rang 2

N^0	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT	k'_1	k'_2
1	$a_{4,5}$	0	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0.8	0.2	0.2
2	$h_{2,3}$	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0.1	0.1	0.6	0.1	-

Traitement de la ligne 1

N^0	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT	k'_1	k'_2
1	$a_{4,5}$	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0.8	0.2	0.2

Tableau des dispersions optimisées

N^0	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT
1	$a_{4,5}$	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0.8
2	$h_{2,3}$	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0.1	0.1	0.6

Le calcul des intervalles de tolérances optimisées des cotes fonctionnelles est effectué à partir des dispersions optimisées comme le montre le tableau suivant :

Pièces	Cotes fonctionnelles	$\sum \Delta l_i$	IT
1	$cf_{1,7}^{(1)}$	$\Delta l_1^{(1)} + \Delta l_7^{(1)}$	0.2
2	$cf_{4,6}^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)} + \Delta l_6^{(2)}$	0.4
	$cf_{3,7}^{(2)}$	$\Delta l_3^{(2)} + \Delta l_7^{(2)}$	0.2
3	$cf_{5,6}^{(3)}$	$\Delta l_5^{(3)} + \Delta l_6^{(3)}$	0.4
4	$cf_{1,2}^{(4)}$	$\Delta l_1^{(4)} + \Delta l_2^{(4)}$	0.2

4.5. Application des cotes fonctionnelles optimisées au sous-assemblage 1-2-3-4

Pour cet exemple nous avons 7 surfaces alors nous avons besoins de 6 cotes conditions.

On complète donc les 2 exigences fonctionnelles a et h par 4 autres cotes conditions comme cotes mini. Celle-ci sont données par les pièces standards ou de sous-traitant. Pour notre cas, on prend l'axe ($CS_{1,7}^{(1)} = 54.1 \text{ mini}$), le galet ($CS_{5,6}^{(3)} = 29.4 \text{ mini}$), la rondelle ($CS_{1,2}^{(4)} = 2.4 \text{ mini}$) et la chape ($CS_{3,7}^{(2)} = 50.1 \text{ mini}$).

4.5.1. Calcul des écarts de fabrication des cotes condition unilimites

Reprenons la représentation matricielle des dispersions pour le sous-assemblage 1-2-3-4, donnée précédemment par le tableau 4-1 comme suit :

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	0	0	0	0	0

a) Calcul pour la cote condition $CS_{1,7}^{(1)}$ délimitée par les surfaces l=1 et m=7

$I^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 2-3- 4 et 5)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	0	0	0	0	0	0

$I^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 3 et 4)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	0	0	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

$2^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 6)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	0	0	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

$2^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	0	0	0	0
Pièce3	0	0	0	0	0	0	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

On remarque que le tableau ne contient que des lignes et colonnes contenant 0 ou deux éléments (Δl_i) sauf les colonnes 1 et 7, on est alors en transfert minimum. L'intervalle de tolérance concernant la cote condition $CS_{1,7}^{(1)}$ est donné en sommant les dispersions Δl comme suit :

$$CS_{1,7}^{(1)} = \sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(1)} + \Delta l_7^{(1)}) \quad (4.8)$$

b) Calcul pour la cote condition $CS_{5,6}^{(1)}$ délimitée par les surfaces l=5 et m=6

$1^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 2-3 et 4)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	0	0	0	0	0	0

$1^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 4)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

$2^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 1)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

$2^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	0	0	0	0	0	0	0
Pièce2	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

$3^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	0	0	0	0	0	0	0
Pièce2	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(2)}$	0
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

$3^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	0	0	0	0	0	0	0
Pièce2	0	0	0	0	0	0	0
Pièce3	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	0	0	0	0	0	0	0

On remarque que le tableau ne contient que des lignes et colonnes contenant 0 ou deux éléments (Δl_i) sauf les colonnes 5 et 6, on est alors en transfert minimum. L'intervalle de tolérance concernant la cote condition $CS_{5,6}^{(3)}$ est donné en sommant les dispersions Δl comme suit :

$$CS_{5,6}^{(3)} = \sum \Delta l_i = (\Delta l_5^{(3)} + \Delta l_6^{(3)}) \quad (4.9)$$

c) Calcul pour la cote condition $CS_{1,2}^{(4)}$ délimitée par les surfaces l=1 et m=2

$I^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 3-4 et 5)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(3)}$	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	0	0	0	0	0

$I^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 3)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	0	0	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	0	0	0	0	0

$2^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 6)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(2)}$
Pièce3	0	0	0	0	0	0	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	0	0	0	0	0

$2^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(1)}$
Pièce2	0	0	0	0	0	0	0
Pièce3	0	0	0	0	0	0	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	0	0	0	0	0

3⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	$\Delta l_1^{(1)}$	0	0	0	0	0	0
Pièce2	0	0	0	0	0	0	0
Pièce3	0	0	0	0	0	0	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	0	0	0	0	0

3⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4	5	6	7
Pièce1	0	0	0	0	0	0	0
Pièce2	0	0	0	0	0	0	0
Pièce3	0	0	0	0	0	0	0
Pièce4	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	0	0	0	0	0

On remarque que le tableau ne contient que des lignes et colonnes contenant 0 ou deux éléments (Δl_i) sauf les colonnes 1 et 2, on est alors en transfert minimum. L'intervalle de tolérance concernant la cote condition $CS_{1,2}^{(4)}$ est donné en sommant les dispersions Δl comme suit :

$$CS_{1,2}^{(4)} = \sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(4)} + \Delta l_2^{(4)}) \quad (4.10)$$

4.5.2. Matrice élargie d'optimisation

La matrice élargie avant optimisation est donnée pour l'exemple comme suit :

N ⁰	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT	$\sum \Delta l_i$	ε	n'	$\frac{\varepsilon}{n'}$
1	$a_{4,5}$	0	0	0	0	0.2	0.1	0.05	0.05	0	0	0.8	0.4	0.4	4	0.1
2	$h_{2,3}$	0.05	0.05	0.1	0.2	0	0	0	0	0.05	0.05	0.6	0.5	0.1	6	0.0166
3	$CS_{1,7}^{(1)}$	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	-	0.1	-	-	-
4	$CS_{3,7}^{(2)}$	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0.05	0	-	0.25	-	-	-
5	$CS_{5,6}^{(3)}$	0	0	0	0	0	0.1	0	0.05	0	0	-	0.15	-	-	-
6	$CS_{1,2}^{(4)}$	0	0.05	0.1	0	0	0	0	0	0	0	-	0.15	-	-	-

La matrice élargie après optimisation des dispersions à l'aide des IT des cotes conditions bilatérales pour cet exemple est donnée comme suit :

N°	CC	$\Delta l_1^{(1)}$	$\Delta l_1^{(4)}$	$\Delta l_2^{(4)}$	$\Delta l_3^{(2)}$	$\Delta l_4^{(2)}$	$\Delta l_5^{(3)}$	$\Delta l_6^{(2)}$	$\Delta l_6^{(3)}$	$\Delta l_7^{(1)}$	$\Delta l_7^{(2)}$	IT	$\sum \Delta l_i$	ε	n'	$\frac{\varepsilon}{n'}$
1	$a_{4,5}$	0	0	0	0	0.3	0.2	0.15	0.15	0	0	0.8	0.8	0	0	-
2	$h_{2,3}$	0.0666	0.0666	0.1166	0.2166	0	0	0	0	0.0666	0.0666	0.6	0.6	0	0	-
3	$CS_{1,7}^{(1)}$	0.0666	0	0	0	0	0	0	0	0.0666	0	-	0.1332	-	-	-
4	$CS_{1,7}^{(1)}$	0	0	0	0.2166	0	0	0	0	0.0666	0	-	0.2832	-	-	-
5	$CS_{5,6}^{(3)}$	0	0	0	0	0	0.2	0	0.15	0	0	-	0.35	-	-	-
6	$CS_{1,2}^{(4)}$	0	0.0666	0.1166	0	0	0	0	0	0	0	-	0.1832	-	-	-

4.5.3. Calcul des cotes fonctionnelles moyennes

- Calcul des longueurs moyennes de base L_i

Pour cet exemple nous avons 7 surfaces, il y'aura alors 7 longueurs moyennes de base inconnues à déterminer, (donc 7 équations à résoudre, avec $L_1 = 0$)

Les équations des conditions bi limites sont données par :

$$\text{Equation 1: } a_{4,5} = L_5 - L_4 = 3$$

$$\text{Equation 2: } h_{2,3} = L_3 - L_2 = 1$$

Les équations des conditions uni limites sont données par :

$$\text{Equation 3: } CS_{1,7}^{(1)} = L_7 - L_1 = 55.0666$$

$$\text{Equation 4: } CS_{3,7}^{(2)} = L_7 - L_3 = 50.975$$

$$\text{Equation 5: } CS_{5,6}^{(3)} = L_6 - L_5 = 29.175$$

$$\text{Equation 6: } CS_{1,2}^{(4)} = L_2 - L_1 = 3.0916$$

Et comme équation 7: $L_1 = 0$

Après calcul nous obtenons les valeurs suivantes des longueurs moyennes :

$$L_1 = 0 \quad L_2 = 3.0916 \quad L_3 = 4.0916 \quad L_4 = 14.0916 \quad L_5 = 17.0916$$

$$L_6 = 46.2666 \quad L_7 = 55.0666$$

Ceci nous permet par la suite de calculer les cotes fonctionnelles moyennes.

- Calcul des cotes fonctionnelles moyennes

La relation précédente nous permet d'avoir les cotes fonctionnelles moyennes du sous-assemblage, ce qui donne :

$$Cf_{1,7moy} = L_7 - L_1 = 55.0666$$

$$Cf_{4,6moy} = L_6 - L_4 = 32.175$$

$$Cf_{3,7moy} = L_7 - L_3 = 50.975$$

$$Cf_{5,6moy} = L_6 - L_5 = 29.175$$

$$Cf_{1,2moy} = L_2 - L_1 = 3.0916$$

- Calcul des cotes fonctionnelles avec leurs intervalles de tolérance

$$Cf_{1,7} = 55.0666 \pm 0.0666$$

$$Cf_{4,6} = 32.175 \pm 0.225$$

$$Cf_{3,7} = 50.975 \pm 0.416$$

$$Cf_{5,6} = 29.175 \pm 0.175$$

$$Cf_{1,2} = 3.0916 \pm 0.0916$$

4.6. Simulation d'un avant-projet d'étude de fabrication par la méthode Δl pièce1

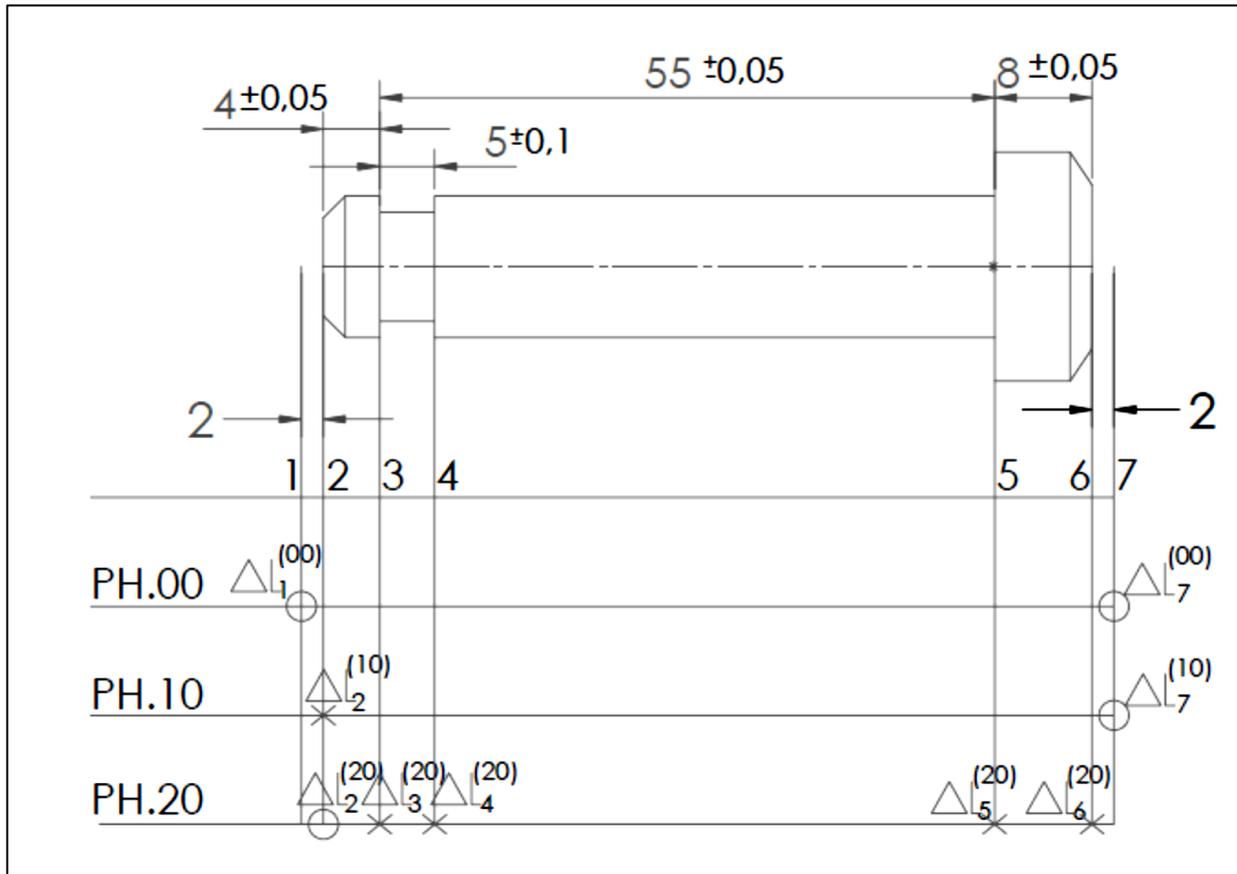


Figure 4-2 Processus de fabrication (méthode Δl)

4.6.1. Matrice de l'avant-projet de fabrication

Soit la représentation matricielle de l'APEF donnée le tableau 4-2 suivant :

Tableau 4-2 Représentation matricielle de l'APEF

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	0

4.6.2. Vérification d'avant-projet de fabrication

a) Cote $CBE_{3,5} = 55^{\pm 0.05}$

$1^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 1, 4 et 6)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0	0

$1^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0	0

$2^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0	0

$2^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0	0

$3^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 2)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	0	$\Delta l_3^{(20)}$	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote $CBE_{3,5}$ est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_3^{(20)} + \Delta l_5^{(20)})$$

La cote de fabrication qui réalise la cote CBE₃₋₅ est CF₃₋₅

b) Cote CBE₃₋₄ = 5^{±0.1}

1⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 1, 5 et 6)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	0	0	0

1⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	0	0	0

2⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	0	0	0

2⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	0	0	0

3⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 2)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	0	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBE_{3-4} est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_3^{(20)} + \Delta l_4^{(20)})$$

La cote de fabrication qui réalise la cote CBE_{3-4} est CF_{3-4}

c) Cote $CBE_{5-6} = 8^{\pm 0.05}$

$1^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 1, 3 et 4)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	0

$1^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	0

$2^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	0

$2^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	0

$3^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 2)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBE₅₋₆ est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_5^{(20)} + \Delta l_6^{(20)})$$

La cote de fabrication qui réalise la cote CBE₅₋₆ est CF₅₋₆

d) Cote CBE_{2,3} = 4^{±0.05}

1⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 1, 4, 5 et 6)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	Δl ₇ ⁽⁰⁰⁾
PH10	0	Δl ₂ ⁽¹⁰⁾	0	0	0	0	Δl ₇ ⁽¹⁰⁾
PH20	0	Δl ₂ ⁽²⁰⁾	Δl ₃ ⁽²⁰⁾	0	0	0	0

1⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	Δl ₂ ⁽¹⁰⁾	0	0	0	0	Δl ₇ ⁽¹⁰⁾
PH20	0	Δl ₂ ⁽²⁰⁾	Δl ₃ ⁽²⁰⁾	0	0	0	0

2⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	Δl ₂ ⁽¹⁰⁾	0	0	0	0	0
PH20	0	Δl ₂ ⁽²⁰⁾	Δl ₃ ⁽²⁰⁾	0	0	0	0

2⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	Δl ₂ ⁽²⁰⁾	Δl ₃ ⁽²⁰⁾	0	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBE₂₋₃ est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_3^{(20)})$$

La cote de fabrication qui réalise la cote CBE₂₋₃ est CF₂₋₃

e) Cote $CBM_{1-2} = 2 \text{ mini}$

$I^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 3, 4, 5 et 6)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0

$I^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 3)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$
PH20	0	0	0	0	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM_{1-2} est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(00)} + \Delta l_7^{(00)}) + (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_7^{(10)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM_{1-2} sont $CF_{1-7} + CF_{2-7}$

f) Cote $CBM_{6-7} = 2 \text{ mini}$

$I^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 1, 3, 4 et 5)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	$\Delta l_6^{(20)}$	0

$I^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 3)

	1	2	3	4	5	6	7
PH00	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	$\Delta l_6^{(20)}$	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM_{6-7} est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_7^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_6^{(20)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM_{6-7} sont $CF_{2-7} + CF_{2-6}$

4.6.3. Optimisation de tolérances de fabrication

4.6.3.1. Optimisation des dispersions (inconnues)

Tous les écarts de fabrication sont affichés dans le tableau d'optimisation et de vérification suivant :

N	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	$\Delta l_7^{(00)}$	$\Delta l_7^{(10)}$	T_{CBE}
1	0	0	0	x	0	x	0	0	0	0,1
2	0	0	0	x	x	0	0	0	0	0,2
3	0	0	0	0	0	x	x	0	0	0,1
4	0	0	x	x	0	0	0	0	0	0,1
5	x	x	0	0	0	0	0	x	x	-
6	0	x	x	0	0	0	x	0	x	-

Tableau 4-3 Tableau d'optimisation et de vérification

L'optimisation des dispersions est élaborée dans le tableau de répartition et d'optimisation suivant :

N	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	$\Delta l_7^{(00)}$	$\Delta l_7^{(10)}$	T_{CBE}	k_1	k_2	k_3	k_4
1	0	0	0	0,05	0	0,05	0	0	0	0,1	0,05	-	-	-
2	0	0	0	0,05	0,15	0	0	0	0	0,2	0,1	0,15	0,15	0,15
3	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0	0	0,1	0,05	-	-	-
4	0	0	0,05	0,05	0	0	0	0	0	0,1	0,05	0,05	0,05	-
5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0,5	0,5	-	-	-	-	-
6	0	0,5	0,05	0	0	0	0,05	0	0,5	-	-	-	-	-

Tableau 4-4 Tableau de répartition et d'optimisation

4.6.3.2. Optimisation des tolérances de fabrication

$\Delta L_1^{(00)}$	$\Delta L_2^{(10)}$	$\Delta L_2^{(20)}$	$\Delta L_3^{(20)}$	$\Delta L_4^{(20)}$	$\Delta L_5^{(20)}$	$\Delta L_6^{(20)}$	$\Delta L_7^{(00)}$	$\Delta L_7^{(10)}$
0.5	0.5	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.5	0.5

a) On calcule la cote CBM_{1-2} moy :

$$CBM_{1-2 \text{ mini}} = 2$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = \frac{CBM_{\text{max}} + CBM_{\text{min}}}{2}$$

$$\begin{aligned} CBM_{1-2 \text{ max}} &= CBM_{1-2 \text{ min}} + IT \text{ } CBM_{1-2} \\ &= CBM_{1-2 \text{ min}} + \sum \Delta L_i \\ &= 2 + [(\Delta L_1^{(00)} + \Delta L_7^{(00)}) + (\Delta L_2^{(10)} + \Delta L_7^{(10)})] \\ &= 2 + 0.5 + 0.5 + 0.5 + 0.5 \end{aligned}$$

$$CBM_{1-2 \text{ max}} = 4$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = \frac{4+2}{2}$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = 3$$

b) On calcule la cote CBM_{6-7} moy :

$$CBM_{6-7 \text{ mini}} = 2$$

$$CBM_{6-7 \text{ moy}} = \frac{CBM_{\text{max}} + CBM_{\text{min}}}{2}$$

$$\begin{aligned} CBM_{6-7 \text{ max}} &= CBM_{6-7 \text{ min}} + IT \text{ } CBM_{6-7} \\ &= CBM_{6-7 \text{ min}} + \sum \Delta L_i \\ &= 2 + [(\Delta L_2^{(10)} + \Delta L_7^{(10)}) + (\Delta L_2^{(20)} + \Delta L_6^{(20)})] \\ &= 2 + 0.5 + 0.5 + 0.05 + 0.05 \end{aligned}$$

$$CBM_{6-7 \text{ max}} = 3,1 \quad CBM_{6-7 \text{ moy}} = \frac{3,1+2}{2}$$

$$CBM_{6-7\text{moy}} = 2,55$$

4.6.3.2.1. Présentation des chaînes des cotes synthèses

$$N^{\circ}: 1: \sum \Delta l_i = (\Delta l_3^{(20)} + \Delta l_5^{(20)})$$

$$\rightarrow ITCBE_{3-5} = IT_{CF3-5}^{(20)}$$

$$N^{\circ}: 2: \sum \Delta l_i = (\Delta l_3^{(20)} + \Delta l_4^{(20)})$$

$$\rightarrow ITCBE_{3-4} = IT_{CF3-4}^{(20)}$$

$$N^{\circ}: 3: \sum \Delta l_i = (\Delta l_5^{(20)} + \Delta l_6^{(20)})$$

$$\rightarrow ITCBE_{5-6} = IT_{CF5-6}^{(20)}$$

$$N^{\circ}: 4: \sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_3^{(20)})$$

$$\rightarrow ITCBE_{2-3} = IT_{CF2-3}^{(20)}$$

$$N^{\circ}: 5: \sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(00)} + \Delta l_7^{(00)}) + (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_7^{(10)})$$

$$\rightarrow ITCBM_{1-2} = IT_{CF1-7}^{(00)} + IT_{CF2-7}^{(10)}$$

$$N^{\circ}: 6: \sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_7^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_6^{(20)})$$

$$\rightarrow ITCBM_{6-7} = IT_{CF2-7}^{(10)} + IT_{CF2-6}^{(20)}$$

4.6.3.2.2. Les Intervalles de tolérance des cotes de fabrication

A partir des chaînes des côtes et le Tableau de répartition et d'optimisation on trouve :

PH00	PH10	PH20
$IT_{CF1-7}^{(00)} = 0.5 + 0.5 = 1$	$IT_{CF2-7}^{(10)} = 0.5 + 0.5 = 1$	$IT_{CF2-3}^{(20)} = 0.05 + 0.05 = 0.1$ $IT_{CF3-4}^{(20)} = 0.05 + 0.15 = 0.2$ $IT_{CF3-5}^{(20)} = 0.05 + 0.05 = 0.1$ $IT_{CF2-6}^{(20)} = 0.05 + 0.05 = 0.1$ $IT_{CF5-6}^{(20)} = 0.05 + 0.05 = 0.1$

4.6.4. Cotes de Fabrication

4.6.4.1. Calcul des longueurs moyennes de base

$$CBE_{i-j \text{ moy}} = l_j - l_i$$

$$CBE_{3-5 \text{ moy}} = l_5 - l_3 \quad l_1 = 0$$

$$CBE_{3-4 \text{ moy}} = l_4 - l_3 \quad l_2 = 3$$

$$CBE_{5-6 \text{ moy}} = l_6 - l_5 \quad l_3 = 7$$

$$CBE_{2-3 \text{ moy}} = l_3 - l_2 \quad l_5 = 62$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = l_2 - l_1 \quad l_4 = 12$$

$$CBM_{6-7 \text{ moy}} = l_7 - l_6 \quad l_6 = 70$$

$$L_7 = 72.55$$

4.6.4.2. Calcul des cotes moyennes de fabrication

$$CF_{1-7 \text{ moy}} = l_7 - l_1 = 72.55 - 0 = 72.55$$

$$CF_{2-7 \text{ moy}} = l_7 - l_2 = 72.55 - 3 = 69.55$$

$$CF_{2-3 \text{ moy}} = l_3 - l_2 = 7 - 3 = 4$$

$$CF_{3-4 \text{ moy}} = l_4 - l_3 = 12 - 7 = 5$$

$$CF_{3-5 \text{ moy}} = l_5 - l_3 = 62 - 7 = 55$$

$$CF_{2-6 \text{ moy}} = l_6 - l_2 = 70 - 3 = 67$$

$$CF_{5-6 \text{ moy}} = l_6 - l_5 = 70 - 62 = 8$$

4.6.4.3. Affichage des cotes de fabrication

	CF_{i-j} moy	IT CF_{i-j}	CF_{i-j}
<u>PH.00</u>	CF_{1-7} moy = 72.55	IT _{CF1-7} = 1	$CF_{1-7} = 72.55 \pm 0.5$
<u>PH.10</u>	CF_{2-7} moy = 69.55	IT _{CF2-7} = 1	$CF_{2-7} = 69.55 \pm 0.5$
<u>PH.20</u>	CF_{2-3} moy = 4	IT _{CF2-3} = 0.1	$CF_{1-2} = 4 \pm 0.05$
	CF_{3-4} moy = 5	IT _{CF3-4} = 0.2	$CF_{1-11} = 5 \pm 0.1$
	CF_{3-5} moy = 55	IT _{CF3-5} = 0.1	$CF_{3-5} = 55 \pm 0.05$
	CF_{2-6} moy = 67	IT _{CF2-6} = 0.1	$CF_{2-6} = 67 \pm 0.05$
	CF_{5-6} moy = 8	IT _{CF5-6} = 0.1	$CF_{5-6} = 8 \pm 0.05$

Tableau 4-5 Résultat des cotes de fabrication (Méthode Δ)

4.7. Simulation d'un avant-projet d'étude de fabrication par la méthode ΔI pièce2

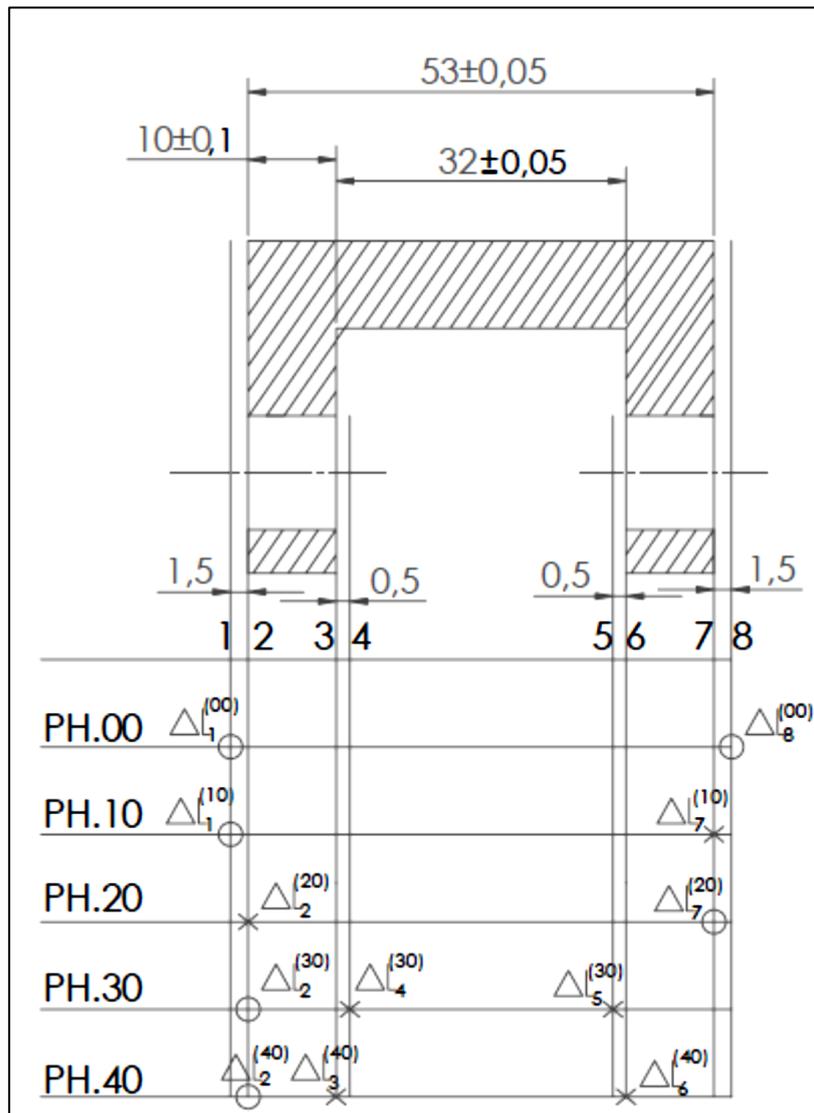


Figure 4-3 Processus de fabrication (méthode ΔI)

4.7.1. Matrice de l'avant-projet de fabrication

Soit la représentation matricielle de l'APEF donnée le tableau 4-6 suivant :

Tableau 4-6 Représentation matricielle de l'APEF

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_8^{(00)}$
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	$\Delta l_4^{(30)}$	$\Delta l_5^{(30)}$	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

4.7.2. Vérification de l'avant-projet de fabrication

a) Cote $CBE_{2,7} = 53^{\pm 0.05}$

I⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 3, 4, 5, 6 et 8)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	0	0	0	0	0	0

I⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1,3 et 4)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	0	0	0	0	0	0	0

2⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	0	0	0	0	0	0	0

2⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	0	0	0	0	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBE₂₋₇ est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_7^{(20)})$$

La cote de fabrication qui réalise la cote CBE₂₋₇ est CF₂₋₇

b) Cote CBE₃₋₆ = 32^{±0.05}

1⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 4, 5, et 8)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

$1^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1 et 3)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

$2^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 1)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

$2^{(2)}$ annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

$3^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

3⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	0	0	0	0	0	0	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

4⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 2)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	0	0	0	0	0	0	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	0	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBE₃₋₆ est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_3^{(40)} + \Delta l_6^{(40)})$$

La cote de fabrication qui réalise la cote CBE₃₋₆ est CF₃₋₆

c) Cote CBE₂₋₃ = 10^{±0.1}

1⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 4, 5, 6 et 8)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	0	0	0

$1^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1 et 3)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	0	0	0

$2^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 1)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	0	0	0

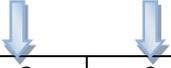
$2^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	0	0	0

$3^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

3⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)



	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	0	0	0	0	0	0	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBE₂₋₃ est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(40)} + \Delta l_3^{(40)})$$

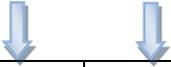
La cote de fabrication qui réalise la cote CBE₂₋₃ et CF₂₋₃

d) Cote CBM_{1,2} = 1.5 mini

1⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 3,4,5, 6 et 8)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	0	0	0	0	0	0

1⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1 et 3)



	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	0	0	0	0	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM₁₋₂ est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(10)} + \Delta l_7^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_7^{(20)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM_{1-2} sont $CF_{1-7} + CF_{2-7}$

e) Cote $CBM_{3,4} = 0.5 \text{ mini}$

1⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 5,6 et 8)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	$\Delta l_4^{(30)}$	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	0	0	0

1⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	$\Delta l_4^{(30)}$	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	0	0	0

2⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 1)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	$\Delta l_4^{(30)}$	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	0	0	0

2⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	$\Delta l_4^{(30)}$	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	0	0	0

3⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	$\Delta l_4^{(30)}$	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	0	0	0

3⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 3)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	0	0	0	0	0	0	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	$\Delta l_4^{(30)}$	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	0	0	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM_{3-4} est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(30)} + \Delta l_4^{(30)}) + (\Delta l_2^{(40)} + \Delta l_3^{(40)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM_{3-4} sont $CF_{2-4} + CF_{2-3}$

f) Cote $CBM_{5-6} = 0.5$ mini

1⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 5,6 et 8)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	0	$\Delta l_5^{(30)}$	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	0	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

1⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	0	$\Delta l_5^{(30)}$	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	0	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

2⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 1)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	0	$\Delta l_5^{(30)}$	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	0	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

2⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	0	$\Delta l_5^{(30)}$	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	0	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

3⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 7)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	0	$\Delta l_5^{(30)}$	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	0	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

3⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 3)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	0	0	0	0	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0	0	0	0	0
PH20	0	0	0	0	0	0	0	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	0	$\Delta l_5^{(30)}$	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	0	0	0	$\Delta l_6^{(40)}$	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM_{5-6} est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(30)} + \Delta l_5^{(30)}) + (\Delta l_2^{(40)} + \Delta l_6^{(40)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM_{5-6} sont $CF_{2-5} + CF_{2-6}$

g) Cote $CBM_{7,8} = 1.5 \text{ mini}$

1⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation des colonnes 3, 4, 5 et 6)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_8^{(00)}$
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	$\Delta l_2^{(30)}$	0	0	0	0	0	0
PH40	0	$\Delta l_2^{(40)}$	0	0	0	0	0	0

1⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 4 et 5)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_8^{(00)}$
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	0	0	0	0	0	0	0

2⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 2)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_8^{(00)}$
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	0	0	0	0	0	0	0

2⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 4 et 5)

	1	2	3	4	5	6	7	8
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_8^{(00)}$
PH10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(10)}$	0
PH20	0	0	0	0	0	0	0	0
PH30	0	0	0	0	0	0	0	0
PH40	0	0	0	0	0	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM_{7-8} est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(00)} + \Delta l_8^{(00)}) + (\Delta l_1^{(10)} + \Delta l_7^{(10)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM_{7-8} sont $CF_{1-8} + CF_{1-7}$

4.7.3. Optimisation de tolérances de fabrication

4.7.3.1. Optimisation des dispersions

Tous les écarts de fabrication sont affichés dans le tableau d'optimisation et de vérification suivant :

N	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_1^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_2^{(30)}$	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	$\Delta l_4^{(30)}$	$\Delta l_5^{(30)}$	$\Delta l_6^{(40)}$	$\Delta l_7^{(10)}$	$\Delta l_7^{(20)}$	$\Delta l_8^{(00)}$	T_{CBE}
1	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0,1
2	0	0	0	0	0	x	0	0	x	0	0	0	0,1
3	0	0	0	0	x	x	0	0	0	0	0	0	0,2
4	0	x	x	0	0	0	0	0	0	x	x	0	-
5	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0	0	0	-
6	0	0	0	x	x	0	0	x	x	0	0	0	-
7	x	x	0	0	0	0	0	0	0	x	0	x	-

Tableau 4-7 Tableau d'optimisation et de vérification

L'optimisation des dispersions est élaborée dans le tableau de répartition et d'optimisation suivant :

N	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_1^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_2^{(30)}$	$\Delta l_2^{(40)}$	$\Delta l_3^{(40)}$	$\Delta l_4^{(30)}$	$\Delta l_5^{(30)}$	$\Delta l_6^{(40)}$	$\Delta l_7^{(10)}$	$\Delta l_7^{(20)}$	$\Delta l_8^{(00)}$	T_{CBE}	k_1	k_2	k_3
1	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0,1	0.05	-	-
2	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0.05	0	0	0	0,1	0,05	0,05	-
3	0	0	0	0	0.15	0.05	0	0	0	0	0	0	0,2	0,1	0,15	0,15
4	0	0.05	0.05	0	0	0	0	0	0	0.5	0.05	0	-	-	-	-
5	0	0	0	0.05	0.15	0.05	0.05	0	0	0	0	0	-	-	-	-
6	0	0	0	0.05	0.15	0	0	0.05	0.05	0	0	0	-	-	-	-
7	0.05	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0.05	-	-	-	-

Tableau 4-8 Tableau de répartition et d'optimisation

4.7.3.2. Optimisation des tolérances de fabrication

$\Delta L_1^{(00)}$	$\Delta L_1^{(10)}$	$\Delta L_2^{(20)}$	$\Delta L_2^{(30)}$	$\Delta L_2^{(40)}$	$\Delta L_3^{(40)}$	$\Delta L_4^{(30)}$	$\Delta L_5^{(30)}$	$\Delta L_6^{(40)}$	$\Delta L_7^{(10)}$	$\Delta L_7^{(20)}$	$\Delta L_8^{(00)}$
0.5	0.5	0.05	0.5	0.15	0.05	0.5	0.5	0.05	0.5	0.05	0.5

a) On calcule la cote CBM_{1-2} moy :

$$CBM_{1-2 \text{ mini}} = 1.5$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = \frac{CBM_{\text{max}} + CBM_{\text{min}}}{2}$$

$$\begin{aligned} CBM_{1-2 \text{ max}} &= CBM_{1-2 \text{ min}} + IT \text{ } CBM_{1-2} \\ &= CBM_{1-2 \text{ min}} + \sum \Delta L_i \\ &= 1.5 + [(\Delta L_1^{(10)} + \Delta L_7^{(10)}) + (\Delta L_2^{(20)} + \Delta L_7^{(20)})] \\ &= 1.5 + 0.5 + 0.5 + 0.05 + 0.05 \end{aligned}$$

$$CBM_{1-2 \text{ max}} = 2.6$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = \frac{2.6 + 1.5}{2}$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = 2.05$$

b) On calcule la cote CBM_{3-4} moy :

$$CBM_{3-4 \text{ mini}} = 0.5$$

$$CBM_{3-4 \text{ moy}} = \frac{CBM_{\text{max}} + CBM_{\text{min}}}{2}$$

$$\begin{aligned} CBM_{3-4 \text{ max}} &= CBM_{3-4 \text{ min}} + IT \text{ } CBM_{3-4} \\ &= CBM_{3-4 \text{ min}} + \sum \Delta L_i \\ &= 0.5 + [(\Delta L_2^{(30)} + \Delta L_4^{(30)}) + (\Delta L_2^{(40)} + \Delta L_3^{(40)})] \\ &= 0.5 + 0.5 + 0.5 + 0.15 + 0.05 \end{aligned}$$

$$CBM_{3-4 \text{ max}} = 1.7$$

$$CBM_{3-4 \text{ moy}} = \frac{1.7+0.5}{2}$$

$$CBM_{3-4 \text{ moy}} = 1.1$$

c) On calcule la cote $CBM_{5-6 \text{ moy}}$:

$$CBM_{5-6 \text{ mini}} = 0.5$$

$$CBM_{5-6 \text{ moy}} = \frac{CBM_{\text{max}}+CBM_{\text{min}}}{2}$$

$$\begin{aligned} CBM_{5-6 \text{ max}} &= CBM_{5-6 \text{ min}} + IT \text{ } CBM_{5-6} \\ &= CBM_{5-6 \text{ min}} + \sum \Delta L_i \\ &= 0.5 + [(\Delta L_2^{(30)} + \Delta L_5^{(30)}) + (\Delta L_2^{(40)} + \Delta L_6^{(40)})] \\ &= 0.5 + 0.5 + 0.5 + 0.15 + 0.05 \end{aligned}$$

$$CBM_{5-6 \text{ max}} = 1.7$$

$$CBM_{5-6 \text{ moy}} = \frac{1.7+0.5}{2}$$

$$CBM_{5-6 \text{ moy}} = 1.1$$

d) On calcule la cote $CBM_{7-8 \text{ moy}}$:

$$CBM_{7-8 \text{ mini}} = 1.5$$

$$CBM_{7-8 \text{ moy}} = \frac{CBM_{\text{max}}+CBM_{\text{min}}}{2}$$

$$\begin{aligned} CBM_{7-8 \text{ max}} &= CBM_{7-8 \text{ min}} + IT \text{ } CBM_{7-8} \\ &= CBM_{7-8 \text{ min}} + \sum \Delta L_i \\ &= 1.5 + [(\Delta L_1^{(00)} + \Delta L_8^{(00)}) + (\Delta L_1^{(10)} + \Delta L_7^{(10)})] \\ &= 1.5 + 0.5 + 0.5 + 0.5 + 0.5 \end{aligned}$$

$$CBM_{6-7 \text{ max}} = 3,5$$

$$CBM_{6-7 \text{ moy}} = \frac{3,5+1,5}{2}$$

$$CBM_{6-7 \text{ moy}} = 2,5$$

4.7.3.2.1. Présentation des chaînes des cotes synthèse

$$N^{\circ}: 1: \sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_7^{(20)})$$

$$\rightarrow ITCBE_{2-7} = IT_{CF 2-7}^{(20)}$$

$$N^{\circ}: 2: \sum \Delta l_i = (\Delta l_3^{(40)} + \Delta l_6^{(40)})$$

$$\rightarrow ITCBE_{3-6} = IT_{CF 3-6}^{(40)}$$

$$N^{\circ}: 3: \sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(40)} + \Delta l_3^{(40)})$$

$$\rightarrow ITCBE_{2-3} = IT_{CF 2-3}^{(40)}$$

$$N^{\circ}: 4: \sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(10)} + \Delta l_7^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_7^{(20)})$$

$$\rightarrow ITCBM_{1-2} = IT_{CF 1-7}^{(10)} + IT_{CF 2-7}^{(20)}$$

$$N^{\circ}: 5: \sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(30)} + \Delta l_4^{(30)}) + (\Delta l_2^{(40)} + \Delta l_3^{(40)})$$

$$\rightarrow ITCBM_{3-4} = IT_{CF 2-4}^{(30)} + IT_{CF 2-3}^{(40)}$$

$$N^{\circ}: 6: \sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(30)} + \Delta l_5^{(30)}) + (\Delta l_2^{(40)} + \Delta l_6^{(40)})$$

$$\rightarrow ITCBM_{5-6} = IT_{CF 2-5}^{(30)} + IT_{CF 2-6}^{(40)}$$

$$N^{\circ}: 4: \sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(00)} + \Delta l_8^{(00)}) + (\Delta l_1^{(10)} + \Delta l_7^{(10)})$$

$$\rightarrow ITCBM_{7-8} = IT_{CF 1-8}^{(00)} + IT_{CF 1-7}^{(10)}$$

4.7.3.2.2. Les Intervalles de tolérance des cotes de fabrication

A partir des chaines des côtes et le Tableau de répartition et d'optimisation on trouve :

PH.00	$IT_{CF1-8}^{(00)} = 0.5 + 0.5 = 1$
PH.10	$IT_{CF1-7}^{(10)} = 0.5 + 0.5 = 1$
PH.20	$IT_{CF2-7}^{(20)} = 0.05 + 0.05 = 0.1$
PH.30	$IT_{CF2-4}^{(30)} = 0.5 + 0.5 = 1$ $IT_{CF2-5}^{(30)} = 0.5 + 0.5 = 1$
PH.40	$IT_{CF2-3}^{(40)} = 0.15 + 0.05 = 0.2$ $IT_{CF2-6}^{(40)} = 0.5 + 0.05 = 0.55$ $IT_{CF3-6}^{(40)} = 0.05 + 0.05 = 0.1$

4.7.4. Cotes de Fabrication

4.7.4.1. Calcul des longueurs moyennes de base

$$CBE_{i-j \text{ moy}} = l_j - l_i$$

$$CBE_{2-7 \text{ moy}} = l_7 - l_2$$

$$l_1 = 0$$

$$CBE_{3-6 \text{ moy}} = l_6 - l_3$$

$$l_2 = 2.05$$

$$CBE_{2-3 \text{ moy}} = l_3 - l_2$$

$$l_3 = 12.05$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = l_2 - l_1$$

$$l_4 = 13.15$$

$$CBM_{3-4 \text{ moy}} = l_4 - l_3$$

$$l_5 = 42.95$$

$$CBM_{5-6 \text{ moy}} = l_6 - l_5$$

$$l_6 = 44.05$$

$$CBM_{7-8 \text{ moy}} = l_8 - l_7$$

$$l_7 = 55.05$$

$$l_8 = 57.55$$

4.7.4.2. Calcul des cotes moyennes de fabrication

$$CF_{1-8 \text{ moy}} = l_8 - l_1 = 57.55 - 0 = 57.55$$

$$CF_{1-7 \text{ moy}} = l_7 - l_1 = 55.05 - 0 = 55.05$$

$$CF_{2-7 \text{ moy}} = l_7 - l_2 = 55.05 - 2.05 = 53$$

$$CF_{2-4\text{moy}} = l_4 - l_2 = 13.15 - 2.05 = 11.1$$

$$CF_{2-5\text{moy}} = l_5 - l_2 = 42.95 - 2.05 = 40.9$$

$$CF_{2-3\text{moy}} = l_3 - l_2 = 12.05 - 2.05 = 10$$

$$CF_{2-6\text{moy}} = l_6 - l_2 = 44.05 - 2.05 = 42$$

$$CF_{3-6\text{moy}} = l_6 - l_3 = 44.05 - 12.05 = 32$$

4.7.4.3. Affichage des cotes de fabrication

	CF_{i-j} moy	IT CF_{i-j}	CF_{i-j}
<u>PH.00</u>	CF ₁₋₈ moy = 57.55	IT _{CF1-8} = 1	CF ₁₋₈ = 57.55 ^{±0.5}
<u>PH.10</u>	CF ₁₋₇ moy = 69.55	IT _{CF1-7} = 1	CF ₁₋₇ = 55.05 ^{±0.5}
<u>PH.20</u>	CF ₂₋₇ moy = 53	IT _{CF2-7} = 0.1	CF ₂₋₇ = 53 ^{±0.05}
<u>PH.30</u>	CF ₂₋₄ moy = 11.1 CF ₂₋₅ moy = 40.9	IT _{CF2-4} = 1 IT _{CF2-5} = 1	CF ₂₋₄ = 11.1 ^{±0.5} CF ₂₋₅ = 40.9 ^{±0.5}
<u>PH.40</u>	CF ₂₋₃ moy = 10 CF ₂₋₆ moy = 42 CF ₃₋₆ moy = 32	IT _{CF2-3} = 0.2 IT _{CF2-6} = 0.55 IT _{CF3-6} = 0.1	CF ₂₋₃ = 10 ^{±0.1} CF ₂₋₆ = 42 ^{±0.275} CF ₃₋₆ = 32 ^{±0.05}

Tableau 4-9 Résultat des cotes de fabrication (Méthode ΔI)

4.8. Simulation d'un avant-projet d'études de fabrication par la méthode ΔI pièce 3

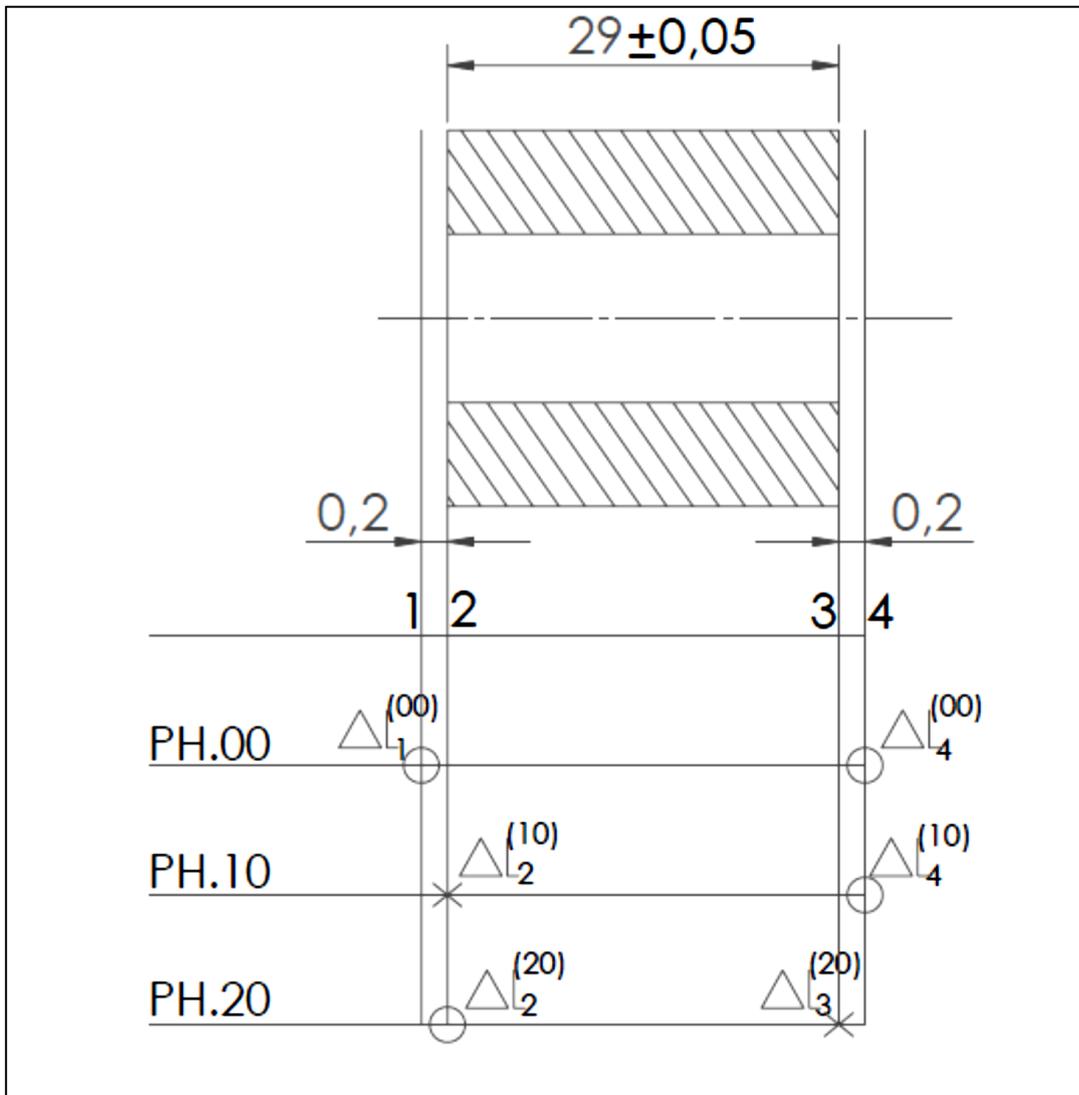


Figure 4-4 Processus de fabrication (méthode ΔI)

4.8.1. Matrice d'avant-projet de fabrication

Soit la représentation matricielle de l'APEF donnée le tableau 4-10 suivant :

Tableau 4-10 Représentation matricielle de l'APEF

	1	2	3	4
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	$\Delta l_4^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

4.8.2. Vérification d'avant-projet de fabrication

a) Cote $CBE_{2-3} = 29^{\pm 0.05}$

$I^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation de colonne 1)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	$\Delta l_4^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

$I^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

$2^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 4)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

$2^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBE_{2-3} est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_3^{(20)})$$

La cote de fabrication qui réalise la cote CBE_{2-3} est CF_{2-3}

b) Cote $CBM_{1-2} = 0.2 \text{ mini}$

$I^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation de colonne 3)

	1	2	3	4
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	$\Delta l_4^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0

$I^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 3)

	1	2	3	4
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	$\Delta l_4^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM_{1-2} est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(00)} + \Delta l_4^{(00)}) + (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_4^{(10)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM_{1-2} sont $CF_{1-4} + CF_{2-4}$

c) Cote $CBM_{3-4} = 0.2\text{mini}$

$I^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation de colonne 1)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	$\Delta l_4^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

$I^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM_{3-4} est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_4^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_3^{(20)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM_{3-4} sont $CF_{2-4} + CF_{2-3}$

4.8.3. Optimisation des tolérances de fabrication

4.8.3.1. Optimisation des dispersions

Tous les écarts de fabrication sont affichés dans le tableau d'optimisation et de vérification suivant :

N	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(00)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	T_{CBE}
1	0	0	x	x	0	0	0,1
2	x	x	0	0	x	x	-
3	0	x	x	x	0	x	-

Tableau 4-11 Tableau d'optimisation et de vérification

L'optimisation des dispersions est élaborée dans le tableau de répartition et d'optimisation suivante :

N	$\Delta L_1^{(00)}$	$\Delta L_2^{(10)}$	$\Delta L_2^{(20)}$	$\Delta L_3^{(20)}$	$\Delta L_4^{(00)}$	$\Delta L_4^{(10)}$	T_{CBE}	k_r
1	0	0	0,05	0,05	0	0	0,1	0,05
2	0,5	0,5	0	0	0,5	0,5	-	-
3	0	0,5	0,05	0,05	0	0,5	-	-

Tableau 4-12 Tableau de répartition et d'optimisation

4.8.3.2. Optimisation des tolérances de fabrication

$\Delta L_1^{(00)}$	$\Delta L_2^{(10)}$	$\Delta L_2^{(20)}$	$\Delta L_3^{(20)}$	$\Delta L_4^{(00)}$	$\Delta L_4^{(10)}$
0,5	0,5	0,05	0,05	0,5	0,5

a) On calcule la cote $CBM_{1-2 \text{ moy}}$:

$$CBM_{1-2 \text{ mini}} = 0.2$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = \frac{CBM_{\text{max}} + CBM_{\text{min}}}{2}$$

$$\begin{aligned} CBM_{1-2 \text{ max}} &= CBM_{1-2 \text{ min}} + IT_{CBM_{1-2}} \\ &= CBM_{1-2 \text{ min}} + \sum \Delta L_i \\ &= 0.2 + [(\Delta L_1^{(00)} + \Delta L_4^{(00)}) + (\Delta L_2^{(10)} + \Delta L_4^{(10)})] \\ &= 0.2 + 0.5 + 0.5 + 0.5 + 0.5 \end{aligned}$$

$$CBM_{1-2 \text{ max}} = 2.2$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = \frac{2.2 + 0.2}{2}$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = 1.2$$

b) On calcule la cote CBM_{3-4} moy :

$$CBM_{3-4 \text{ mini}} = 0.2$$

$$CBM_{3-4 \text{ moy}} = \frac{CBM_{\text{max}} + CBM_{\text{min}}}{2}$$

$$\begin{aligned} CBM_{3-4 \text{ max}} &= CBM_{3-4 \text{ min}} + IT \text{ } CBM_{3-4} \\ &= CBM_{3-4 \text{ min}} + \sum \Delta L_i \\ &= 2 + [(\Delta L_2^{(10)} + \Delta L_4^{(10)}) + (\Delta L_2^{(20)} + \Delta L_3^{(20)})] \\ &= 0.2 + 0.5 + 0.5 + 0.05 + 0.05 \end{aligned}$$

$$CBM_{3-4 \text{ max}} = 1.3$$

$$CBM_{3-4 \text{ moy}} = \frac{1.3 + 0.2}{2}$$

$$CBM_{3-4 \text{ moy}} = 0.75$$

4.8.3.2.1. Présentation des chaînes des cotes synthèse

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ: 1: \sum \Delta l_i &= (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_3^{(20)}) \\ &\rightarrow ITCBE_{2-3} = IT_{CF2-3}^{(20)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ: 2: \sum \Delta l_i &= (\Delta l_1^{(00)} + \Delta l_4^{(00)}) + (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_4^{(10)}) \\ &\rightarrow ITCBM_{1-2} = IT_{CF1-4}^{(00)} + IT_{CF2-4}^{(10)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ: 3: \sum \Delta l_i &= (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_4^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_3^{(20)}) \\ &\rightarrow ITCBM_{3-4} = IT_{CF2-4}^{(10)} + IT_{CF2-3}^{(20)} \end{aligned}$$

4.8.3.2.2. Les Intervalles de tolérance des cotes de fabrication

A partir des chaines des côtes et le Tableau de répartition et d'optimisation on trouve :

PH00	PH10	PH20
$IT_{CF1-4}^{(00)} = 0.5 + 0.5 = 1$	$IT_{CF2-4}^{(10)} = 0.5 + 0.5 = 1$	$IT_{CF2-3}^{(20)} = 0.05 + 0.05 = 0.1$

4.8.4. Cotes de Fabrication

4.8.4.1. Calcul des longueurs moyennes de base

$$CBE_{i-j} \text{moy} = l_j - l_i$$

$$CBE_{2-3} \text{moy} = l_3 - l_2 \qquad l_1 = 0$$

$$CBM_{1-2} \text{moy} = l_2 - l_1 \qquad l_2 = 1.2$$

$$CBM_{3-4} \text{moy} = l_4 - l_3 \qquad l_3 = 30.2$$

$$l_4 = 30.95$$

4.8.4.2. Calcul des cotes moyennes de fabrication

$$CF_{1-4} \text{moy} = l_4 - l_1 = 30.95 - 0 = 30.95$$

$$CF_{2-4} \text{moy} = l_4 - l_2 = 30.95 - 1.2 = 29.75$$

$$CF_{2-3} \text{moy} = l_3 - l_2 = 30.2 - 1.2 = 29$$

4.8.4.3. Affichage des cotes de fabrication

	$CF_{i-j} \text{moy}$	$IT_{CF_{i-j}}$	CF_{i-j}
<u>PH.00</u>	$CF_{1-4} \text{moy} = 30.95$	$IT_{CF_{1-4}} = 1$	$CF_{1-4} = 30.95^{\pm 0.5}$
<u>PH.10</u>	$CF_{2-4} \text{moy} = 29.75$	$IT_{CF_{2-4}} = 1$	$CF_{2-4} = 29.75^{\pm 0.5}$
<u>PH.20</u>	$CF_{2-3} \text{moy} = 29$	$IT_{CF_{2-3}} = 0.1$	$CF_{2-3} = 29^{\pm 0.05}$

Tableau 4-13 Résultat des cotes de fabrication (Méthode ΔI)

4.9. Simulation d'un avant-projet d'étude de fabrication par la méthode Δl pièce 4

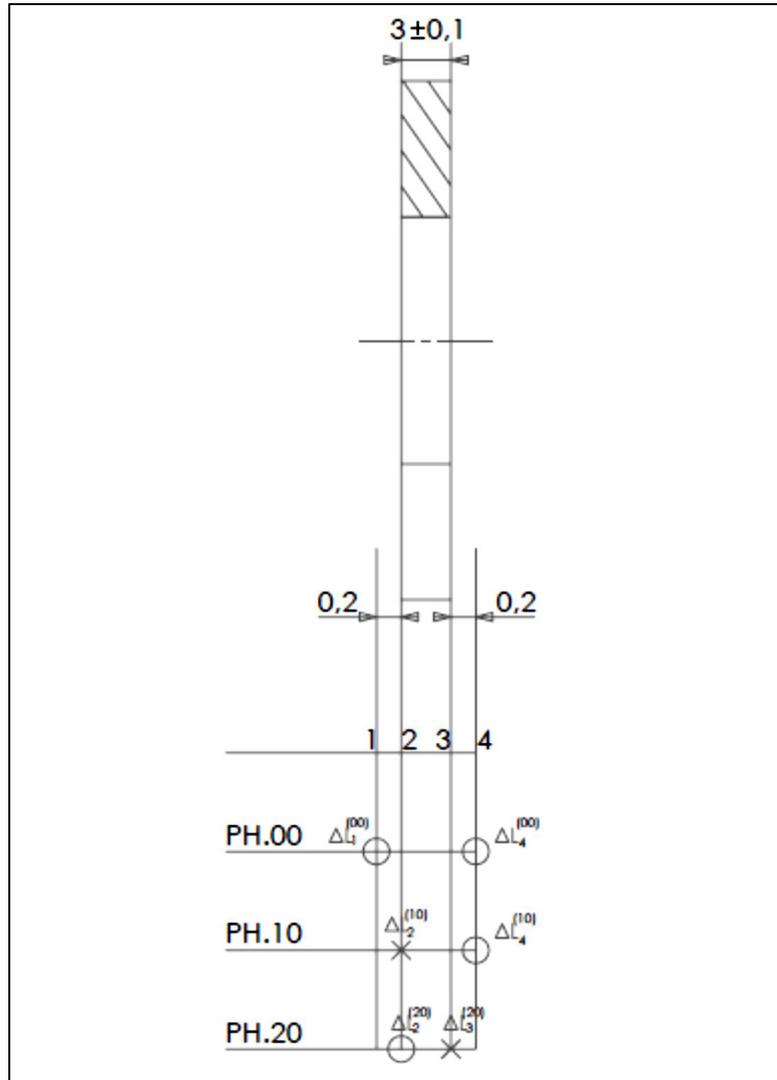


Figure 4-5 Processus de fabrication (méthode Δl)

4.9.1. Matrice d'avant-projet de fabrication

Soit la représentation matricielle de l'APEF donnée le tableau 4-14 suivant :

Tableau 4-14 Représentation matricielle de l'APEF

	1	2	3	4
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	$\Delta l_4^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

4.9.2. Vérification d'avant-projet de fabrication

a) Cote $CBE_{2-3} = 3^{\pm 0.1}$

$I^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation de colonne 1)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	$\Delta l_4^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

$I^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

$2^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément sauf l et m (annulation de la colonne 4)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

2⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 2)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	0
PH10	0	0	0	0
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBE₂₋₃ est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_3^{(20)})$$

La cote de fabrication qui réalise la cote CBE₂₋₃ est CF₂₋₃

b) Cote CBM₁₋₂ = 0.2mini

1⁽¹⁾-annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation de colonne 3)

	1	2	3	4
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	$\Delta l_4^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0

1⁽²⁾-annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 3)

	1	2	3	4
PH00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	$\Delta l_4^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM₁₋₂ est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(00)} + \Delta l_4^{(00)}) + (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_4^{(10)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM₁₋₂ sont CF₁₋₄ + CF₂₋₄

c) Cote $CBM_{3-4} = 0.2\text{mini}$

$I^{(1)}$ -annulation des colonnes à un seul élément Δl sauf l et m (donc annulation de colonne 1)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	$\Delta l_4^{(00)}$
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

$I^{(2)}$ -annulation des lignes à un seul élément (annulation de la ligne 1)

	1	2	3	4
PH00	0	0	0	0
PH10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	$\Delta l_4^{(10)}$
PH20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM_{3-4} est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_4^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_3^{(20)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM_{3-4} sont $CF_{2-4} + CF_{2-3}$

4.9.3. Optimisation de tolérances de fabrication

4.9.3.1. Optimisation des dispersions

Tous les écarts de fabrication sont affichés dans le tableau d'optimisation et de vérification suivant :

N	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(00)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	T_{CBE}
1	0	0	x	x	0	0	0,2
2	x	x	0	0	x	x	-
3	0	x	x	x	0	x	-

Tableau 4-15 Tableau d'optimisation et de vérification

L'optimisation des dispersions est élaborée dans le tableau de répartition et d'optimisation suivant :

N	$\Delta L_1^{(00)}$	$\Delta L_2^{(10)}$	$\Delta L_2^{(20)}$	$\Delta L_3^{(20)}$	$\Delta L_4^{(00)}$	$\Delta L_4^{(10)}$	T_{CBE}	k_r
1	0	0	0,1	0,1	0	0	0,2	0,1
2	0,5	0,5	0	0	0,5	0,5	-	-
3	0	0,5	0,1	0,1	0	0,5	-	-

Tableau 4-16 Tableau de répartition et d'optimisation

4.9.3.2. Optimisation des tolérances de fabrication

$\Delta L_1^{(00)}$	$\Delta L_2^{(10)}$	$\Delta L_2^{(20)}$	$\Delta L_3^{(20)}$	$\Delta L_4^{(00)}$	$\Delta L_4^{(10)}$
0,5	0,5	0,1	0,1	0,5	0,5

a) On calcule la cote CBM_{1-2} moy :

$$CBM_{1-2 \text{ mini}} = 0.2$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = \frac{CBM_{\text{max}} + CBM_{\text{min}}}{2}$$

$$\begin{aligned} CBM_{1-2 \text{ max}} &= CBM_{1-2 \text{ min}} + IT \text{ } CBM_{1-2} \\ &= CBM_{1-2 \text{ min}} + \sum \Delta L_i \\ &= 0.2 + [(\Delta L_1^{(00)} + \Delta L_4^{(00)}) + (\Delta L_2^{(10)} + \Delta L_4^{(10)})] \\ &= 0.2 + 0.5 + 0.5 + 0.5 + 0.5 \end{aligned}$$

$$CBM_{1-2 \text{ max}} = 2.2$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = \frac{2.2 + 0.2}{2}$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = 1.2$$

b) On calcule la cote CBM_{3-4} moy :

$$CBM_{3-4 \text{ mini}} = 0.2$$

$$CBM_{3-4 \text{ moy}} = \frac{CBM_{\text{max}} + CBM_{\text{min}}}{2}$$

$$\begin{aligned} CBM_{3-4 \text{ max}} &= CBM_{3-4 \text{ min}} + IT_{CBM_{3-4}} \\ &= CBM_{3-4 \text{ min}} + \sum \Delta L_i \\ &= 2 + [(\Delta L_2^{(10)} + \Delta L_4^{(10)}) + (\Delta L_2^{(20)} + \Delta L_3^{(20)})] \\ &= 0.2 + 0.5 + 0.5 + 0.1 + 0.1 \end{aligned}$$

$$CBM_{3-4 \text{ max}} = 1.2$$

$$CBM_{3-4 \text{ moy}} = \frac{1.2 + 0.2}{2}$$

$$CBM_{3-4 \text{ moy}} = 0.7$$

4.7.3.2.1. Présentation des chaînes des cotes synthèse

$$N^{\circ}: 1: \sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_3^{(20)})$$

$$\rightarrow ITCBE_{2-3} = IT_{CF2-3}^{(20)}$$

$$N^{\circ}: 2: \sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(00)} + \Delta l_4^{(00)}) + (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_4^{(10)})$$

$$\rightarrow ITCBM_{1-2} = IT_{CF1-4}^{(00)} + IT_{CF2-4}^{(10)}$$

$$N^{\circ}: 3: \sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_4^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_3^{(20)})$$

$$\rightarrow ITCBM_{3-4} = IT_{CF2-4}^{(10)} + IT_{CF2-3}^{(20)}$$

4.9.3.2.2. Les intervalles de tolérance des cotes de fabrication

A partir des chaînes des côtes et le Tableau de répartition et d'optimisation on trouve :

PH00	PH10	PH20
$IT_{CF1-4}^{(00)} = 0.5 + 0.5 = 1$	$IT_{CF2-4}^{(10)} = 0.5 + 0.5 = 1$	$IT_{CF2-3}^{(20)} = 0.1 + 0.1 = 0.2$

4.9.4. Calcul des cotes de Fabrication

4.9.4.1. Calcul des longueurs moyennes de base

$$CBE_{i-j \text{ moy}} = l_j - l_i$$

$$CBE_{2-3 \text{ moy}} = l_3 - l_2$$

$$l_1 = 0$$

$$CBM_{1-2 \text{ moy}} = l_2 - l_1$$

$$l_2 = 1.2$$

$$CBM_{3-4 \text{ moy}} = l_4 - l_3$$

$$l_3 = 4.2$$

$$l_4 = 4.9$$

4.9.4.2. Calcul des cotes moyennes de fabrication

$$CF_{1-4 \text{ moy}} = l_4 - l_1 = 4.9 - 0 = 4.9$$

$$CF_{2-4 \text{ moy}} = l_4 - l_2 = 4.9 - 1.2 = 3.7$$

$$CF_{2-3 \text{ moy}} = l_3 - l_2 = 4.2 - 1.2 = 3$$

4.9.4.3. Affichage des cotes de fabrication

	CF_{i-j} moy	IT CF_{i-j}	CF_{i-j}
<u>PH.00</u>	CF_{1-4} moy = 4.9	IT _{CF1-4} = 1	$CF_{1-4} = 4.9^{\pm 0.5}$
<u>PH.10</u>	CF_{2-4} moy = 3.7	IT _{CF2-4} = 1	$CF_{2-4} = 3.7^{\pm 0.5}$
<u>PH.20</u>	CF_{2-3} moy = 3	IT _{CF2-3} = 0.2	$CF_{2-3} = 3^{\pm 0.1}$

Tableau 4-17 Résultat des cotes de fabrication (Méthode Δ)

4.10. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté l'application de la méthode des dispersions pour l'optimisation du tolérancement fonctionnel de l'assemblage et la synthèse des côtes fonctionnelle optimisées (montage d'un galet). Puis, on a appliqué aussi la méthode des dispersions pour chaque pièce de cet assemblage afin de simuler leurs avant-projets de fabrication et de calculer les cotes de fabrication de toutes les géométries intermédiaires de la pièce.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au début de cette recherche, le problème posé était la maîtrise de la nouvelle méthode de tolérancement fonctionnel et de fabrication. Cette nouvelle méthode est la méthode des dispersions dite des Δl . Malgré que beaucoup de travaux ont été faits sur le sujet, cette méthode reste méconnue au grand public. Pour cela, dans ce travail, une vaste recherche bibliographique a été entamée. La première partie a traité le tolérancement fonctionnel. Le tolérancement de fabrication faisait l'objet de la deuxième partie. Dans la troisième partie ; une application de tolérancement sur un ensemble a été exécutée. Dans cette application, une mise au point d'une liaison entre la tolérancement fonctionnel et le tolérancement de fabrication a été mise en place.

En gros, ce travail nous permis de bien maîtriser la méthode des dispersions et de l'appliquer sur un produit industriel. A partir de jeux fonctionnels sur le dessin d'ensemble, on est arrivé à coter les géométries intermédiaires (Dessins de fabrication) de la pièce au niveau de chaque phase de fabrication.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau 1-1	Tableau d'analyse de contraintes d'antériorités.....	9
Tableau 1-2	Tableau des niveaux.....	9
Tableau 1-3	Tableau de groupement des phases.....	10
Tableau 1-4	Tableau d'analyse de contraintes d'antériorités	15
Tableau 1-5	Tableau des niveaux	16
Tableau 1-3	Tableau de groupement des phases	17
Tableau 1-7	Présentation de processus de fabrication.....	17

Chapitre II

Tableau 2-1	Représentation matricielle de l'assemblage.....	21
Tableau 2-2	Valeurs des dispersions mini pour l'exemple.....	22
Tableau 2-4	Matrice globale d'optimisation.....	23

Chapitre III

Tableau 3-1	Représentation matricielle de l'avant-projet de fabrication.....	29
Tableau 3-2	Tableau d'optimisation et de répartition (Δl mini).....	31
Tableau 3-3	Tableau d'optimisation et de vérification.....	31
Tableau 3-4	Tableau de répartition et d'optimisation (Δl inconnues).....	32
Tableau 3-5	Chaînes de cotes de fabrication.....	32
Tableau 3-6	Résultat des cotes de fabrication (Méthode Δl).....	33

Chapitre IV

Tableau 4-1	Matrice des dispersions pour le sous-assemblage 1-2-3-4.....	36
Tableau 4-2	Représentation matricielle de l'APEF.....	49
Tableau 4-3	Tableau d'optimisation et de vérification.....	55
Tableau 4-4	Tableau de répartition et d'optimisation.....	55
Tableau 4-5	Résultat des cotes de fabrication (Méthode Δl).....	59
Tableau 4-6	Représentation matricielle de l'APEF.....	61
Tableau 4-7	Tableau d'optimisation et de vérification.....	72
Tableau 4-8	Tableau de répartition et d'optimisation.....	72
Tableau 4-9	Résultat des cotes de fabrication (Méthode Δl).....	77

Tableau 4-10	Représentation matricielle de l'APEF.....	79
Tableau 4-11	Tableau d'optimisation et de vérification.....	81
Tableau 4-12	Tableau de répartition et d'optimisation.....	82
Tableau 4-13	Résultat des cotes de fabrication (Méthode ΔI).....	85
Tableau 4-14	Représentation matricielle de l'APEF.....	87
Tableau 4-15	Tableau d'optimisation et de vérification.....	89
Tableau 4-16	Tableau de répartition et d'optimisation.....	90
Tableau 4-17	Résultat des cotes de fabrication (Méthode ΔI).....	93

LISTES DES FIGURES

Chapitre I

Figure1-1	Processus d'industrialisation d'un produit.....	4
Figure 1-2	Dessin de définition.....	11

Chapitre II

Figure 2-1	Exemple de conditions fonctionnelles d'un assemblage.....	20
Figure 2-2	Surfaces et cotes fonctionnelles de l'assemblage.....	21

Chapitre III

Figure 3-1	Organigramme de la production d'une pièce.....	27
Figure 3-2	Modèle équivalent de la simulation.....	28
Figure 3-3	Processus de fabrication (Méthode ΔI)	

Chapitre IV

Figure 4-1	Sous-assemblage 1-2-3-4.....	35
Figure 4-2	Processus de fabrication (méthode ΔI).....	49
Figure 4-3	Processus de fabrication (méthode ΔI).....	60
Figure 4-4	Processus de fabrication (méthode ΔI).....	78
Figure 4-5	Processus de fabrication (méthode ΔI).....	86

NOTATIONS

Δl	Dispersion de fabrication
$\Delta l_{i_{opt}}$	Dispersion de fabrication optimisée
ε	Différence entre tolérance de la cote BE et l'écart de fabrication
$\sum \Delta l_i$	Ecart de fabrication concernant une cote condition
I_s	Nombre de surfaces
I_p	Nombre de phases
A_{I_s, I_p}	Élément de la matrice des dispersions
B_{I_c, I_d}	Élément de la matrice d'optimisation
I_c	Indice des cotes dans la matrice d'optimisation
I_d	Indice des dispersions dans la matrice d'optimisation
j	Numéro de la cote condition, numéro de la chaîne de cotes
APEF	Avant-projet d'étude de fabrication
BE	Bureau d'études
BM	Bureau des méthodes
CBE	Cote condition bureau d'étude
CBM	Cote condition bureau des méthodes
CF	Cote de fabrication
C_f	Cote fonctionnelle (cote condition du bureau d'étude)
CFAO	Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur
C_{pm}	Copeau minimum
GPS	Geométrical Product Spécification
i	Indice de la cote fonctionnelle dans une chaîne
ISO	International standard organisation
IT	Intervalle de Tolérance
k	Répartition équitable du reliquat
k'	Coefficient de répartition
l	Nombre de segments de tolérance pour une cote
l_i	Longueur moyenne de base
nc	Nombre de cotes conditions dans l'assemblage
nd	Nombre de dispersions de toute les surfaces fonctionnelles

p	Indice de la méthode de fabrication
P	Facteur de précision
p	Nombre de dispersions inconnues
CC	Note condition de conception
T	Tolérance
T_{CCj}	Tolérance de la cote condition
T_{CF}	Tolérance de fabrication
T_{CBE}	Tolérance d'une cote BE
w	Nombre de choix de méthode pour réaliser une cote

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AUBLIN 1999] M. Aulbin ; «*Exploitation du concept G.P.S. et de la normalisation pour la spécification géométrique des produits*», CERPET. Janvier 1999.
- [BOURDET 1973] P. Bourdet ; «*Chaînes de cotes de fabrication*», Revue de l'Ingénieur et le Technicien de l'Enseignement Technique.
- [CHE 1994] Chevalier A et J. Bohan ; «*guide de technicien en productique*», Hachette technique, Paris 1994.
- [DURET 1981] D. Duret ; «*simulation de gamme d'usinage*», Revue de l'Ingénieur et le Technicien de l'Enseignement Technique.
- [HAMOU 1998] S. Hamou ; «*Automatisation de la simulation de la gamme d'usinage et de l'emploi de transfert de cotes dans les systèmes F.A.O.*», Thèse de Magister, ENSET-Oran, juin 1998.
- [HAMOU 2004] S. Hamou ; «*Contribution à l'optimisation de la spécification des états intermédiaires dans le processus de fabrication*», Thèse de doctorat, Faculté technologie, Université Tlemcen.
- [HAMOU 2010] S. Hamou ; «*Chronologie des opérations d'usinage*», Cour HAMOU, Faculté technologie, Université Tlemcen.
- [Mme CHEIKH 2005] N. Mme Cheikh ; «*Modélisation de l'optimisation des tolérances des cotes fonctionnelles par la méthode des dispersions*», Thèse magister, Faculté technologie, Université Tlemcen.

Résumé

Ce travail avait pour but d'étudier les tolérances fonctionnelles de l'assemblage de montage d'un galet et tolérances de fabrication des différentes pièces de cet assemblage. Pour cela une simulation des expériences fonctionnelles et simulation d'un avant-projet d'étude de fabrication par la méthode des dispersions a été élaboré se servant des différents travaux effectués sur le sujet. Pour valider ces méthodes, une application de simulation fonctionnelle et de fabrication a été exécutée sur un ensemble.

Mots clés : tolérancement fonctionnel, tolérancement de fabrication, synthèse, optimisation, méthode des dispersions.

1.3.4. Tableau des niveaux

Faculté sciences de l'ingénieur département génie mécanique		Tableau des niveaux															Pièce : EQUERRE DE MONTAGE												
Matrice des antériorités																	Niveaux												
	B	A _E	A _{1/2F}	A _F	C _F	D _F	4 _E	4 _{1/2F}	4 _F	6 _E	6 _{1/2F}	6 _F	8 _F	13 _E	13 _{1/2F}	13 _F	11 _F	T CBE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
B																		0	B										
A _E								1			1							2	2	2	2	1	1	1	0	A _E			
A _{1/2F}		1																1	1	1	1	1	1	1	1	0	A _{1/2F}		
A _F			1															1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	A _F	
C _F								1			1				1			3	3	3	3	2	2	2	1	0	C _F		
D _F				1				1			1							3	3	3	3	2	2	2	1	1	0	D _F	
4 _E	1										1							2	1	1	1	0	4 _E						
4 _{1/2F}							1											1	1	1	1	1	0	4 _{1/2F}					
4 _F								1										1	1	1	1	1	1	0	4 _F				
6 _E	1																	1	0	6 _E									
6 _{1/2F}										1								1	1	0	6 _{1/2F}								
6 _F											1							1	1	1	0	6 _F							
8 _F				1												1		2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	8 _F	
13 _E	1								1			1						3	2	2	2	1	1	1	0	13 _E			
13 _{1/2F}														1				1	1	1	1	1	1	1	1	0	13 _{1/2F}		
13 _F															1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	13 _F	
11 _F													1					1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	11 _F	

Tableau 1-5 Tableau des niveaux

1. Détermination des écarts de fabrication et reconnaissance des cotes CF

Soit la représentation matricielle de l'APEF donnée par le tableau 3-1 du chapitre III

	1	2	3	4	5	6
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(00)}$
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

1.1. Cote CBE₂₋₅ (l=2 et m=5)

$I^{(1)}$ -annulation de toutes les colonnes à un seul élément sauf l et m

	1	2	3	4	5	6
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

$I^{(2)}$ -annulation de toutes les lignes à un seul élément

	1	2	3	4	5	6
PH.00	0	0	0	0	0	0
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

$2^{(1)}$ -annulation de toutes les colonnes à un seul élément sauf l et m

	1	2	3	4	5	6
PH.00	0	0	0	0	0	0
PH.10	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

$2^{(2)}$ -annulation de toutes les lignes à un seul élément

	1	2	3	4	5	6
PH.00	0	0	0	0	0	0
PH.10	0	0	0	0	0	0
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBE_{2-5} et le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_5^{(20)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBE_{2-5} sont CF_{2-5}

1.2. Cotes CBE_{3-5} ($l=3$ et $m=5$)

$1^{(1)}$ -annulation de toutes les colonnes à un seul élément sauf l et m

	1	2	3	4	5	6
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	0	$\Delta l_3^{(20)}$	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

$1^{(2)}$ -annulation de toutes les lignes à un seul élément

	1	2	3	4	5	6
PH.00	0	0	0	0	0	0
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	0	$\Delta l_3^{(20)}$	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

$2^{(1)}$ -annulation de toutes les colonnes à un seul élément sauf l et m

	1	2	3	4	5	6
PH.00	0	0	0	0	0	0
PH.10	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	0	$\Delta l_3^{(20)}$	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

$2^{(2)}$ -annulation de toutes les lignes à un seul élément

	1	2	3	4	5	6
PH.00	0	0	0	0	0	0
PH.10	0	0	0	0	0	0
PH.20	0	0	$\Delta l_3^{(20)}$	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBE_{3-5} et le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_3^{(20)} + \Delta l_5^{(20)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBE_{3-5} sont CF_{3-5}

1.3. Cotes CBE_{4-5} ($l=4$ et $m=5$)

$I^{(1)}$ -annulation de toutes les colonnes à un seul élément sauf l et m

	1	2	3	4	5	6
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

$I^{(2)}$ -annulation de toutes les lignes à un seul élément

	1	2	3	4	5	6
PH.00	0	0	0	0	0	0
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	0	0	0	0	0

$I^{(1)}$ -annulation de toutes les colonnes à un seul élément sauf l et m

	1	2	3	4	5	6
PH.00	0	0	0	0	0	0
PH.10	0	0	0	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	0	0	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBE_{4-5} et le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_4^{(10)} + \Delta l_5^{(10)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBE_{4-5} sont CF_{4-5}

1.4. Cotes CBM_{1-2} ($l=1$ et $m=2$)

$I^{(1)}$ -annulation de toutes les colonnes à un seul élément sauf l et m

	1	2	3	4	5	6
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

$I^{(2)}$ -annulation de toutes les lignes à un seul élément

	1	2	3	4	5	6
PH.00	0	0	0	0	0	0
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM_{1-2} et le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(10)} + \Delta l_5^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_5^{(20)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM_{1-2} sont $CF_{1-5} + CF_{2-5}$

1.5. Cotes CBM_{5-6} ($l=5$ et $m=6$)

$I^{(1)}$ -annulation de toutes les colonnes à un seul élément sauf l et m

	1	2	3	4	5	6
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(00)}$
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	0	0	0	$\Delta l_5^{(20)}$	0

$I^{(2)}$ -annulation de toutes les lignes à un seul élément

	1	2	3	4	5	6
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	$\Delta l_6^{(00)}$
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	0	$\Delta l_5^{(10)}$	0
PH.20	0	0	0	0	0	0

On est en transfert minimum. L'écart de fabrication concernant la cote CBM_{5-6} et le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(00)} + \Delta l_6^{(00)}) + (\Delta l_1^{(10)} + \Delta l_5^{(10)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisent la cote CBM_{5-6} sont $CF_{1-6} + CF_{1-5}$

2. Optimisation des tolérances de fabrication

2.1-Optimisation des dispersions

Tous les écarts de fabrication soit affichés dans le tableau d'optimisation et de vérification suivant :

N	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_1^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(00)}$	T_{CBE}
1	0	0	x	0	0	0	x	0	0,5
2	0	0	0	x	0	0	x	0	0,5
3	0	0	0	0	x	x	0	0	0,5
4	0	x	x	0	0	x	x	0	-
5	x	x	0	0	0	x	0	x	-

L'optimisation des dispersions est élaborée dans le tableau de répartition et d'optimisation suivant :

N	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_1^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(00)}$	T_{CBE}	k_1	k_2	k_3
1	0	0	0,25	0	0	0	0,25	0	0,5	0,25	-	-
2	0	0	0	0,25	0	0	0,25	0	0,5	0,25	0,25	0,25
3	0	0	0	0	0,25	0,25	0	0	0,5	0,25	0,25	-
4	0	0,5	0,25	0	0	0,25	0,25	0	-	-	-	-
5	0,5	0,5	0	0	0	0,25	0	0,5	-	-	-	-

2.2-Optimisation des tolérances de fabrication

Le résultat des dispersions optimisées (en mm) est donné par le tableau suivant :

$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_1^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(00)}$
0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5

De même, les tolérances de fabrication optimisées sont données par le tableau suivant :

$T_{CF_{1-6}}$	$T_{CF_{1-5}}$	$T_{CBE_{4-5}}$	$T_{CBE_{2-5}}$	$T_{CBE_{3-5}}$
$\Delta l_1^{(00)} + \Delta l_6^{(00)}$	$\Delta l_1^{(10)} + \Delta l_5^{(10)}$	$\Delta l_4^{(10)} + \Delta l_5^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_3^{(20)} + \Delta l_5^{(20)}$
1	0,75	0,5	0,75	0,75

3. Calcul des cotes de fabrication

3.1-Calcul des longueurs moyennes de base

$$l_1 = 0$$

$$l_5 - l_2 = 120,25$$

$$l_5 - l_3 = 60,25$$

$$l_5 - l_4 = 4,25$$

$$l_2 - l_1 = 2,75$$

$$l_6 - l_5 = 3,875$$

l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6
0	2,75	62,75	118,75	123	126,875

3.2-Calcul des cotes moyennes de fabrication

Les cotes moyennes de fabrication sont données par le tableau suivant :

$CF_{1-6 \text{ moy}}$	$CF_{1-5 \text{ moy}}$	$CF_{4-5 \text{ moy}}$	$CF_{2-5 \text{ moy}}$	$CF_{3-5 \text{ moy}}$
$l_6 - l_1$	$l_5 - l_1$	$l_5 - l_4$	$l_5 - l_2$	$l_5 - l_3$
126,875	123	4,25	120,25	60,25

3.3-Affichage des cotes de fabrication

PH00	$CF_{1-6} = 126,875 \pm 0,5$
PH10	$CF_{1-5} = 123 \pm 0,375$ $CF_{4-5} = 4,25^{+0,5}_0$
Ph20	$CF_{2-5} = 120,25^{+0,5}_0$ $CF_{3-5} = 60,25^{+0,5}_0$