

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



**Mémoire**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En :** Génie Mécanique

**Spécialité :** Construction Mécanique

**Par :**

SAMRI YOUSOUF

RAKHROUKH YUCEF

**Sujet**

**CALCUL DES ÉCARTS DE FABRICATION PAR LA MÉTHODE DES  
DISPERSIONS "TRAITEMENT MANUEL".**

**Soutenu en juin 2025**

**devant le jury composé de :**

M CHELKH Abdelmadjid	Pr	Université de Tlemcen	Président
M GHERNAOUT Mohammed	Pr	Université de Tlemcen	Examineur
M HAMOU Said	Pr	Université de Tlemcen	Encadreur

**Année universitaire 2024-2025**

## **Dédicace**

Nous dédions ce travail à nos parents respectifs, pour leur soutien inconditionnel, leurs sacrifices silencieux et leurs encouragements constants tout au long de notre parcours académique. Leur amour et leur confiance ont été pour nous une source inépuisable de motivation.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à nos enseignants et encadreurs, dont les conseils avisés, l'expertise et la disponibilité ont grandement enrichi la qualité de ce travail.

À nos amis, pour leur soutien moral, leur bienveillance et les moments de partage qui nous ont permis d'alléger la pression des responsabilités universitaires.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, nous adressons nos remerciements les plus sincères.

Votre soutien a été essentiel dans l'accomplissement de cette étape précieuse de notre vie académique.

Rakhroukh Youcef & Samri Youssouf

## **Remercîment**

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadreur, Monsieur le Professeur Hamou Said, pour son accompagnement attentif, ses conseils éclairés et sa disponibilité constante tout au long de ce travail. Son expertise et sa rigueur ont été des éléments clés dans la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également les membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer notre travail de fin d'études. Leur présence et leur implication apportent une reconnaissance précieuse à nos efforts, ainsi qu'une rigueur académique essentielle à cette étape finale de notre parcours.

Nous exprimons enfin notre reconnaissance à tous les enseignants, techniciens, camarades et amis qui nous ont soutenus, encouragés, ou aidés, de près ou de loin, durant la préparation et l'élaboration de ce mémoire.

Rakhroukh Youcef & Samri Youssouf

## ملخص:

تتناول هذه المذكرة دراسة الانحرافات الصناعية في مجال الهندسة الميكانيكية، من خلال تطبيق طريقة لحساب الانحرافات يدويًا. وبعد تحديد مختلف مصادر هذه الانحرافات (العشوائية، الحرارية،  $\Delta$  المنهجية)، ركّز التحليل على التحقق من سلاسل الأبعاد الوظيفية وتحسينها باستخدام طريقة النقل الأدنى. يتمثل الهدف الرئيسي في ضمان احترام الأبعاد الوظيفية مع توسيع التفاوتات المسموح بها، بهدف تقليل تكاليف التصنيع دون التأثير على جودة القطع المُنتجة. وتُظهر النتائج تحسُّنًا ملحوظًا في صلابة العمليات الصناعية، بالإضافة إلى إمكانية تحقيق مكاسب اقتصادية معتبرة. يُعد هذا العمل مساهمة فعلية في التحكم في عمليات التشغيل في سياق الإنتاج التسلسلي.

## كلمات مفتاحية

، CF ، التفاوتات البعدية، السلاسل الوظيفية، النقل الأدنى، مخطط  $\Delta$  الانحرافات الصناعية، طريقة حساب الانحراف، مراقبة الجودة، الإنتاج الميكانيكي، تحسين العملية.

## **Abstract**

This thesis deals with the study of manufacturing dispersions in the field of mechanical engineering, through the application of the  $\Delta I$  method for manual calculation of dimensional deviations. After identifying the various sources of dispersion (random, thermal, and systematic), the analysis focused on the verification and optimization of functional dimension chains using complementary approach: the minimum transfer method.

The main objective is to ensure compliance with functional dimensions while expanding permissible tolerances in order to reduce manufacturing costs without compromising product quality. The results reveal a significant improvement in the robustness of industrial processes, as well as notable economic potential.

This work thus represents a concrete contribution to the control of machining processes in the context of serial production.

## **Keywords**

Manufacturing dispersions,  $\Delta I$  method, dimensional tolerancing, functional chains, minimum transfer, CF graph, deviation calculation, quality control, mechanical production, process optimization.

## Résumé

Ce mémoire traite de l'étude des dispersions de fabrication dans le domaine du génie mécanique, à travers l'application de la méthode des  $\Delta I$  pour le calcul manuel des écarts. Après avoir identifié les différentes sources de dispersions (aléatoires, thermiques, systématiques), l'analyse s'est portée sur la vérification et l'optimisation des chaînes de côtes fonctionnelles à l'aide d'approche complémentaires : la méthode du transfert minimum. L'objectif principal est de garantir le respect des dimensions fonctionnelles tout en élargissant les tolérances admissibles, afin de réduire les coûts de fabrication sans compromettre la qualité des pièces produites. Les résultats montrent une amélioration significative de la robustesse des processus industriels, ainsi qu'un potentiel de gain économique appréciable. Ce travail constitue ainsi une contribution concrète à la maîtrise des procédés d'usinage dans le cadre de la production en série.

## Mots-clés

Dispersion dimensionnelles, tolérancement fonctionnel, méthode des  $\Delta I$ , cotes de fabrication, transfert minimum, simulation d'usinage, optimisation des tolérances, chaîne de côtes, qualité géométrique, procédés industriels.

# Table des Matières

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : .....</b>	<b>2</b>
<b>VERIFICATION DES AVANT-PROJETS DE FABRICATION PAR LA METHODE DES <math>\Delta L</math> .....</b>	<b>2</b>
I.1 INTRODUCTION : .....	3
I.2 GENERALITES : .....	3
I.3 HISTORIQUE : .....	3
I.4 DISPERSION DE FABRICATION : .....	4
I.5 DIFFERENTS TYPES DE DISPERSIONS : .....	4
I.5.1 <i>Dispersion aléatoire</i> : .....	4
I.5.2 <i>Dispersion thermique</i> : .....	5
I.5.3 <i>Dispersion systématique</i> : .....	6
I.6 SIMULATION DES AVANT-PROJETS DE FABRICATION PAR LA METHODE DES $\Delta L$ : [HM 12].....	6
I.7 VERIFICATION DES AVANT-PROJETS DE FABRICATION : [HM 12] .....	10
I.7.1 <i>Calcul de l'écart de fabrication</i> : .....	11
I.7.1.1 Méthode du graphe CF .....	12
I.8 METHODE DES INTERSECTIONS DES DISPERSIONS [HM 12].....	13
I.9 METHODE DE TRANSFERT MINIMUM : [HM 12] .....	16
I.9.1.1 Reconnaissance des cotes de fabrication CF .....	18
I.9.1.2 Détermination des chaînes de cotes .....	19
I.9.1.3 Application .....	21
I.10 CONCLUSION .....	33
<b>CHAPITRE II : .....</b>	<b>34</b>
<b>OPTIMISATION DES DISPERSIONS ET TOLERANCES DE FABRICATION.....</b>	<b>41</b>
II.1 INTRODUCTION.....	35
II.2 PRINCIPE DE LA METHODE DES DISPERSIONS .....	35
II.3 FORMATION DE LA MATRICE GLOBALE D'OPTIMISATION DES DISPERSIONS [HM 12] .....	36
II.4 OPTIMISATION DES DISPERSIONS DE FABRICATION : [HM 12] .....	36
II.4.1 <i>Optimisation des tolérances initiée avec des dispersions minimales</i> .....	37
II.4.2 <i>Optimisation des tolérances avec les dispersions inconnues</i> : .....	39
II.5 RÉSULTATS ET ANALYSE.....	42
II.5.1 <i>Comparaison des tolérances avant et après optimisation</i> .....	42
II.5.2 <i>Interprétation des Résultats</i> .....	43
II.5.3 <i>Gains Économiques</i> .....	44
II.5.3.1 Diminution des rebuts : .....	44
II.5.3.2 Optimisation des temps d'usinage : .....	44
II.6 IMPACT SUR LA QUALITE ET LA FONCTIONNALITE .....	45
II.6.1 <i>Discussion et limites</i> .....	45
II.6.1.1 Avantages .....	45
II.6.1.2 Limites .....	45
II.7 IMPACT ECONOMIQUE ET INDUSTRIEL.....	45
II.7.1 <i>Réduction des Coûts de Fabrication</i> .....	46
II.7.1.1 Élargissement des tolérances .....	46
II.8 CONCLUSION .....	46
<b>CHAPITRE III.....</b>	<b>47</b>

## **CALCUL DES COTES DE FABRICATION**

...54

III.1	INTRODUCTION.....	48
III.2	ROLE DES COTES DE FABRICATION .....	48
III.3	CALCUL DES COTES DE FABRICATION [HM 12].....	49
III.3.1	<i>Interprétation de la matrice APEF en transfert minimum</i> .....	49
III.3.2	<i>Établissement des chaînes de cotes de fabrication</i> .....	50
III.3.3	<i>Principe des zones de dispersions</i> .....	51
III.3.4	<i>Calcul des longueurs moyennes de base</i> .....	52
III.3.5	<i>Système d'équations pour la simulation des longueurs</i> .....	52
III.3.6	<i>Calcul des cotes moyennes de fabrication</i> .....	54
III.3.7	<i>Résultats par phase (méthode <math>\Delta I</math>)</i> .....	55
III.4	CONCLUSION .....	55

## **CHAPITRE IV ..... 57**

### **APPLICATION.....**

.....64

IV.1	VERIFICATION DES AVANT-PROJETS DE FABRICATION [HM 12] .....	58
IV.2	D'OPTIMISATION ET DE VERIFICATION[HM 12] .....	62
IV.3	CALCUL DES COTES DE FABRICATION [HM 12] .....	64
IV.3.1	<i>longueur moyennes de base en mm</i> .....	65
IV.3.2	<i>Les cotes moyennes de fabrication</i> .....	65

## **CONCLUSION GÉNÉRALE ..... 66**

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 67**

## Liste des tableau

Tableau 1:Base de données des dispersions totales. ....	6
Tableau 2 : Représentation matricielle de l'avant-projet de fabrication .....	12
Tableau 3 :parcours de graphe.....	14
Tableau 7 Matrice de l'APEF en transfert minimum .....	18
Tableau 50:matrice globale d'optimisation.....	36
Tableau 51:Tableau d'optimisation et de répartition ( $\Delta l$ mini ).....	38
Tableau 52:Tableau d'optimisation et de vérification .....	39
Tableau 53:Tableau de répartition et d'optimisation ( $\Delta l$ inconnues).....	40
Tableau 54:Tableau de répartition et d'optimisation ( $\Delta l$ inconnues).....	40
Tableau 55:Tableau de répartition et d'optimisation ( $\Delta l$ inconnues).....	41
Tableau 56:Tableau de répartition et d'optimisation ( $\Delta l$ inconnues).....	41
Tableau 57:Matrice de l'APEF en cas de transfert minimum .....	49
Tableau 58 :Longueurs moyennes de base.....	54
Tableau 59 :Cotes moyennes de fabrication .....	54
Tableau 60 : Résultat des cotes de fabrication (méthode $\Delta l$ ).....	55

## liste des figures

Figure 1 Modèle équivalent de la simulation .....	10
Figure 2 Processus de fabrication (méthode de $\Delta l$ ).....	11
Figure 3 Graphe CF .....	13
Figure 4 Organigramme de la méthode du transfert minimum .....	15
Figure 5 processus de détermination des chaînes de cotes.....	20
Figure 6 L'optimisation des tolérances de fabrication peut être initiée en prenant ...	37
Figure 7 diagramme de comparaison entre les paramètres avant et après l'optimisation.....	43
Figure 8 Modèle des $\Delta l$ .....	51
Figure 9 Exemple de la pièce .....	58

## Liste des abréviations

APEF : Avant-projet d'étude de fabrication  
BE : Bureau d'études  
BM (BM) : Bureau des méthodes  
CBE : Cote condition bureau d'étude  
CBM : Cote condition bureau des méthodes  
CF : Cote de fabrication  
cpm : Capabilité  
LMD : Longueur moyenne de base  
Max : Maximale  
Min : Minimale  
Moy : Moyenne  
PEF : Projet d'étude de fabrication  
IT : Intervalle de tolérance  
Tco : Tolérance de la cote condition  
Tcf : Tolérance de fabrication  
Tcbe : Tolérance d'une cote BE

## Symboles

$\mu$ : Ecart de fabrication concernant une cote condition  
N: Nombre de phases  
  
i, j : Numéro de cote condition, numéro de la chaîne de cotes  
k : Coefficient de répartition de l'excédent de la tolérance  
  
 $\Delta l$  : Dispersion élémentaire  
 $\Delta l_{opti}$  : Dispersion de fabrication (usinage) optimisée  
 $\Delta l_r$  : Dispersion de reprise  
  
AB : Dispersion sur la tolérance de la cote BE et l'écart de fabrication  
 $\Sigma \Delta l_i$  : Somme des dispersions élémentaires  
  
Ⓞ: L'exigence d'enveloppe impose que la pièce respecte simultanément la taille et la forme

## INTRODUCTION GENERALE

Dans un environnement industriel en constante évolution, où la compétitivité, la qualité et la précision sont des exigences fondamentales, le contrôle efficace des procédés d'usinage constitue un enjeu stratégique majeur pour toute entreprise de fabrication. Bien que les dispersions dimensionnelles soient inévitables au cours du processus de production, leur maîtrise rigoureuse est indispensable pour garantir le bon fonctionnement et l'interchangeabilité des pièces mécaniques.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce mémoire, consacré à l'étude et à l'optimisation des écarts de fabrication à travers la méthode des dispersions, connue sous le nom de méthode des  $\Delta I$ , développée par le Professeur Bourdet. Cette approche analytique permet de modéliser avec précision les déviations générées lors des différentes étapes d'usinage, qu'elles soient d'origine aléatoire, thermique ou systématique.

L'objectif principal de ce travail est de démontrer la pertinence et l'efficacité de cette méthode dans le calcul manuel des écarts de fabrication, tout en explorant son potentiel pour optimiser les tolérances et réduire les coûts de production. Pour ce faire, des outils complémentaires tels que le graphe CF, l'intersection des dispersions et la méthode du transfert minimum ont été utilisés.

L'étude s'appuie sur une application concrète en contexte de production en série, où l'enjeu est de concilier précision géométrique et performance économique. À travers cette démarche, nous proposons une méthodologie rigoureuse, structurée et applicable, visant à renforcer la robustesse des procédés industriels.

# ***chapitre I :***

## *Vérification des avant- projets de fabrication par la méthode des $\Delta I$*

## **I.1 Introduction :**

Ce chapitre traite de l'impact de la dispersion sur la tolérance fonctionnelle en fabrication. La dispersion, résultant de variations aléatoires ou systématiques (usure, température, défauts d'assemblage), est inévitable et modélisée souvent par une loi normale. La vérification des procédés repose sur la condition  $TCBE \geq \sum \Delta l_i$ .

Le chapitre présente la technique des  $\Delta l$  (Professeur Bourdet, 1973) utilisée pour vérifier et calculer les cotes de fabrication (CF) dans les Avant-Projets de Fabrication (APEF), et décrit plusieurs méthodes de calcul de la dispersion totale, dont le transfert minimal. L'objectif est de déterminer efficacement les cotes qui garantissent le respect des dimensions fonctionnelles.

## **I.2 Généralités :**

La dispersion dans le contexte de la fabrication et du tolérancement fonctionnel se réfère aux variations dimensionnelles qui apparaissent lors de la production d'une pièce. Ces variations peuvent être systématiques (prévisibles) ou aléatoires (imprévisibles) et sont influencées par divers facteurs tels que l'usure des outils, les erreurs de montage, ou les changements de température. [BEN 09]

## **I.3 Historique :**

C'est en 1973 que le Professeur P. Bourdet a élaboré la technique de dispersion appelée « méthode des  $\Delta l$  ». Avant de nous plonger dans cette technique, nous allons d'abord expliquer ce qu'on entend par dispersions de fabrication. [HM 12]

## **I.4 Dispersion de fabrication :**

Dispersion produites en usine Dans un processus de fabrication en série, lorsque l'on usine une longueur  $l$  sous des conditions de production constantes (production stabilisée) et avec un même paramétrage.

On définit la dispersion comme étant l'écart entre la dimension maximale et la dimension minimale mesurée sur une série de pièces fabriquées dans des conditions identiques et avec le même réglage. [HM 12]

## **I.5 Différents types de dispersions :**

Le processus de fabrication engendre plusieurs types de dispersions géométriques qui influencent directement la qualité dimensionnelle et fonctionnelle des pièces usinées. Parmi les dispersions les plus courantes, on distingue :

### **I.5.1 Dispersion aléatoire :**

Dans le processus de fabrication de chaque pièce, divers facteurs liés à l'usinage peuvent connaître des fluctuations accidentelles plus ou moins significatives.

- **La machine :**

Prendre les jeux

Manier les objets (arrêt à une limite...)

Changements de forme lors de la découpe

- **L'outil :**

- Usure de l'arête de coupe

- Forces de coupe appliquées

- **La Pièce :**

- Paramètres de passe d'usinage
- Tolérances et excédents de matière
- Qualité de surface du métal usiné
- Méthode de fixation et surfaces de contact
- Déformations induites par le serrage et l'usinage

Ces variations se cumulent sur chaque pièce, déterminant ainsi ses dimensions finales. Chaque facteur individuel peut être modélisé comme une variable aléatoire suivant une distribution normale (loi de Gauss), facilement vérifiable expérimentalement. La dispersion globale résulte de la combinaison de ces différentes variables aléatoires normalement distribuées. [BEN 17]

### **I.5.2 Dispersion thermique :**

Quand une machine-outil est activée après un long moment d'inactivité, chaque composant commence à se réchauffer graduellement depuis la température ambiante jusqu'à atteindre sa propre température « d'équilibre », qui varie selon son positionnement au sein de la machine. Cependant, ces pièces ne parviennent pas à atteindre l'équilibre thermique simultanément, ce qui provoque des dilatations inégales dans les éléments reliant l'outil à la pièce en cours d'usinage. Ces expansions influencent la précision de l'élément à transformer et peuvent provoquer des changements dimensionnels pouvant atteindre des fractions de millimètre. Parfois, ces modifications sont peu significatives, mais dans d'autres situations, elles peuvent être suffisamment majeures pour nécessiter une période d'attente jusqu'à ce que l'équipement parvienne à

un état de « stabilité thermique » avant de démarrer la production réelle.  
[BEN 17]

### **I.5.3 Dispersion systématique :**

L'écart de taille qui se produit pendant la fabrication vient de l'usure de l'outil de coupe, qui a lieu entre la première et la dernière pièce fabriquée dans un même cycle. Après le premier réglage de la machine, les dimensions obtenues sont les mêmes que la valeur prévue. Mais, au fil du temps, l'outil s'use et les dimensions des pièces changent. Quand on produit plus de pièces, les dimensions augmentent jusqu'à atteindre  $d + \Delta s$ , où  $\Delta s$  est l'écart causé par l'usure de l'outil. [BEN 17]

### **I.6 Simulation des avant-projets de fabrication par la méthode des $\Delta I$ : [HM 12]**

La simulation des avant-projets de fabrication avec la méthode des  $\Delta I$  comprend trois étapes : Vérifier et optimiser les avant-projets de fabrication puis calculer les cotes de fabrication, on va utiliser un modèle similaire qui est illustré dans la Figure 1.

*Tableau 1: Base de données des dispersions totales.*

<b>N°</b>	<b>Designation</b>	<b>Les Valeurs des dispersions (mm)</b>	<b>Références bibliographiques</b>
<b>1</b>	Dispersion sur brut de fonderie (Moulage en sable)	$\Delta B = 0,5$	[CHE 94]

<b>2</b>	Dispersion sur brut (coquille sous pression)	$\Delta B = 0.1$	[CHE 94]
<b>3</b>	Dispersion sur brut (forgée ou laminée)	$\Delta B = 0.3$	[GEL 95]
<b>4</b>	Dispersion obtenue par sciage	$\Delta B = 0.4$	[CHE 94]
<b>5</b>	Dispersion de reprise sur une surface brute de fonderie	$\Delta l' = 0.5$	[CHE 94]
<b>6</b>	Dispersion de reprise sur une surface usinée	$\Delta l' = 0.03$	[CHE 94]
<b>7</b>	Dispersion de reprise sur une surface sciée	$\Delta l' = 0.4$	[GEL 95]
<b>8</b>	Dispersion de reprise en mandrin trois mors neufs	$\Delta l' = 0.1$	[GEL 95]
<b>9</b>	Dispersion de reprise en mandrin trois mors rectifiés	$\Delta l' = 0.03$	[GEL 95]
<b>10</b>	Dispersion de reprise en mandrin trois mors doux	$\Delta l' = 0.03$	[CHE 94]
<b>11</b>	Dispersion de reprise en mandrin expansible	$\Delta l' = 0.02$	[GEL 95]
<b>12</b>	Dispersion de reprise en mandrin conique	$\Delta l' = 0.02$	[GEL 95]
<b>13</b>	Dispersion de reprise en mandrin de type Ringspann	$\Delta l' = 0.01$	[GEL 95]

<b>14</b>	Dispersion d'usinage ébauche d'une surface plane	$\Delta l = 0.2$	[CHE 94]
<b>15</b>	Dispersion d'usinage finition d'une surface plane	$\Delta l = 0.05$	[CHE 94]
<b>16</b>	Dispersion d'usinage ébauche d'une surface cylindrique	$\Delta l = 0.1$	[CHE 94]
<b>17</b>	Dispersion d'usinage finition d'une surface cylindrique	$\Delta l = 0.05$	[CHE 94]
<b>18</b>	Dispersion d'usinage en montage de perçage	$\Delta l = 0.07$	[CHE 94]
<b>19</b>	Dispersion d'usinage finition d'un chanfrein	$\Delta l = 0.1$	[CHE 94]
<b>20</b>	Dispersion d'usinage ébauche en utilisant une butée fixe	$\Delta l = 0.06$	[CHE 94]
<b>21</b>	Dispersion d'usinage finition en utilisant une butée fixe	$\Delta l = 0.03$	[CHE 94]
<b>22</b>	Dispersion d'usinage ébauche en utilisant une butée débrayable mec	$\Delta l = 0.15$	[CHE 94]
<b>23</b>	Dispersion d'usinage fin. En utilisant une butée débrayable mec	$\Delta l = 0.07$	[CHE 94]

<b>24</b>	Dispersion d'usinage ébauche en utilisant une butée débrayable électrique	$\Delta l = 0.07$	[CHE 94]
<b>25</b>	Dispersion d'usinage fin. En utilisant une butée débrayable électrique	$\Delta l = 0.01$	[CHE 94]
<b>26</b>	Dispersion de surface usinée Ra 6.3	$\Delta l = 0.03$	[GEL 95]
<b>27</b>	Dispersion de surface usinée Ra 3.2	$\Delta l = 0.02$	[GEL 95]
<b>28</b>	Dispersion de surface usinée Ra 0.4	$\Delta l = 0.01$	[GEL 95]
<b>29</b>	Dispersion d'usinage sur MOCN	$\Delta l \leq 0.01$	[GEL 95]

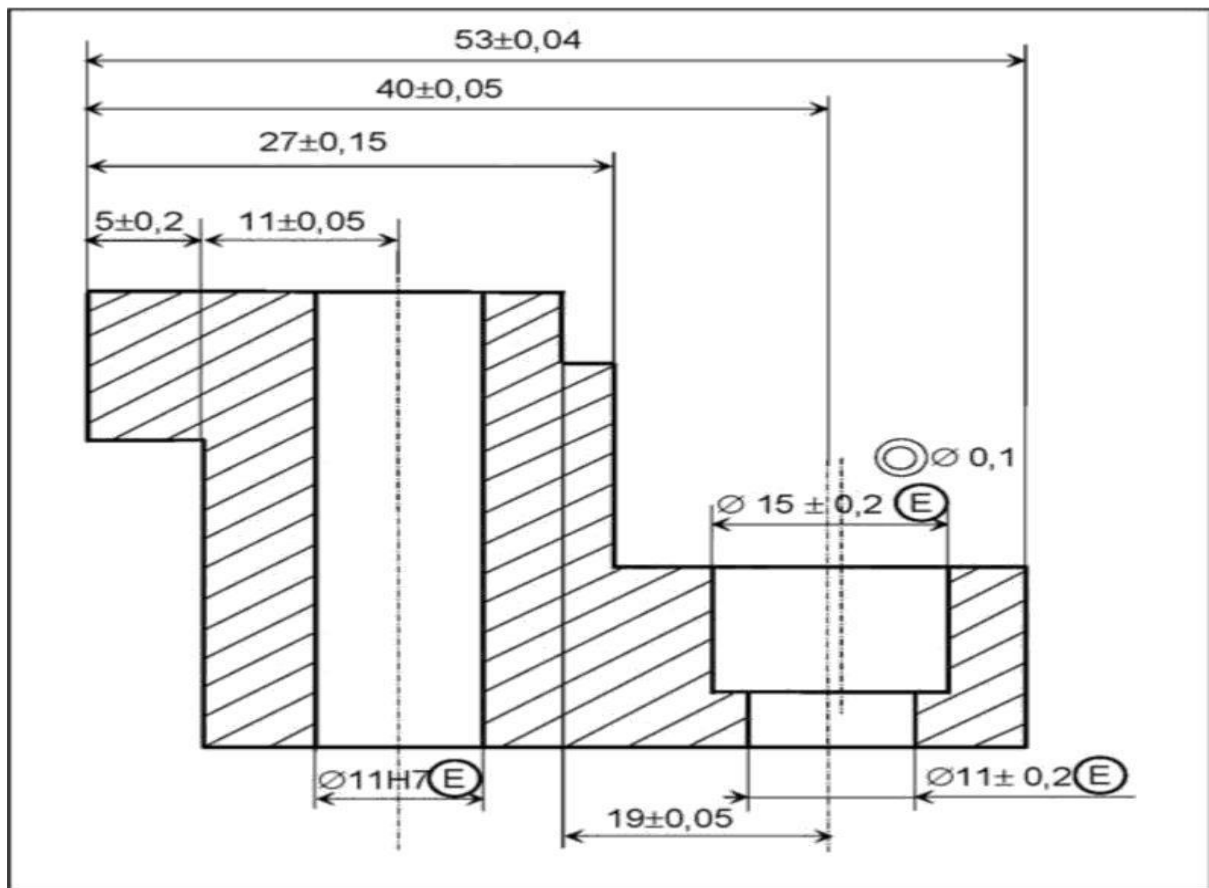


Figure 1 Modèle équivalent de la simulation

### I.7 Vérification des avant-projets de fabrication : [HM 12]

L'approbation d'avant-projets consiste à contrôler si les procédés d'usinage et les équipements de production présents dans l'atelier sont capables de respecter toutes les dimensions fonctionnelles requises par le bureau d'études.

Cette condition est remplie quand l'écart de tolérance de la dimension condition biblique  $T_{CBE}$  est supérieur ou égal au défaut de fabrication qui lui est associé. Soit :

$$T_{CBE} \geq \sum \Delta l_i \quad [R1].$$

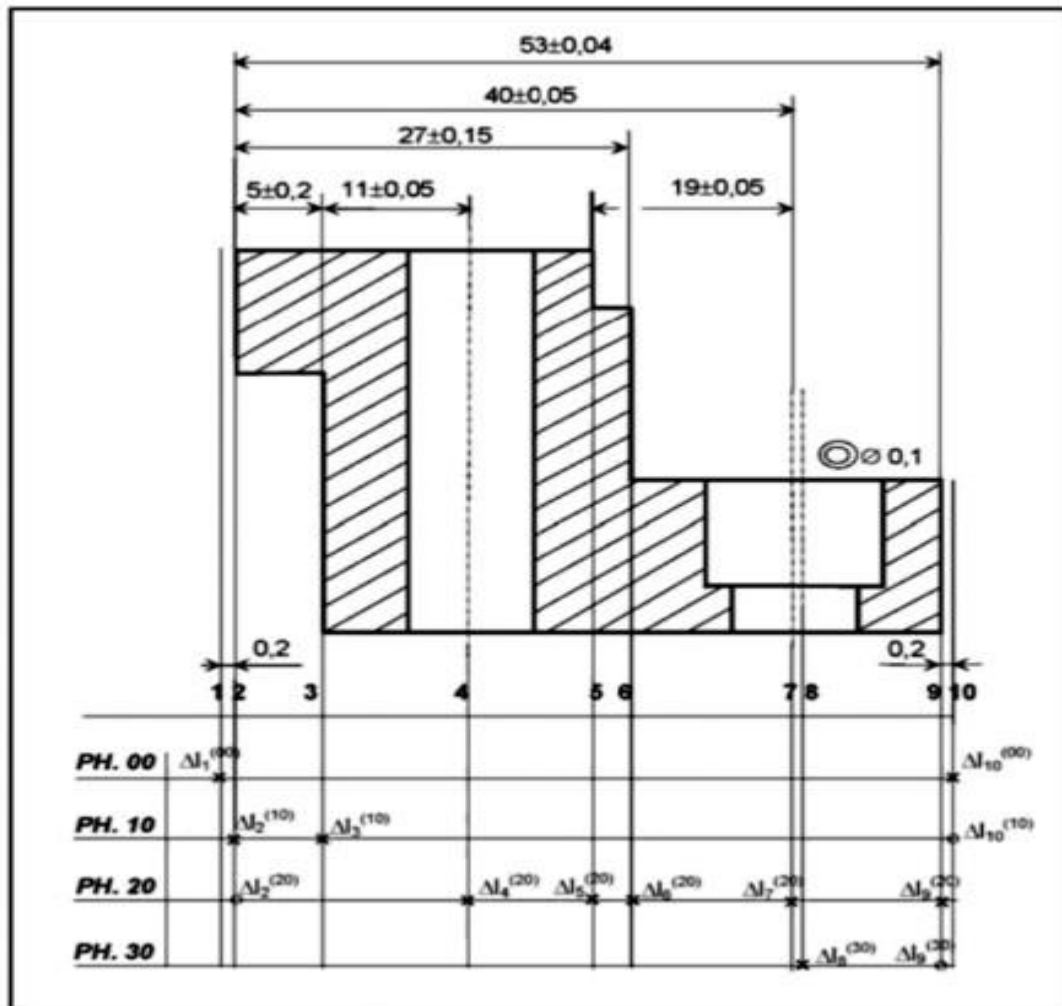


Figure 2 Processus de fabrication (méthode de  $\Delta$ )

### I.7.1 Calcul de l'écart de fabrication :

Selon le parc de machines-outils disponible et la séquence d'usinage spécifiée dans la Figure 1, l'avant-projet est exposé sous forme de tableau (Tableau I). Il se convertit en une matrice comportant  $I_s$  colonnes et  $I_p$  lignes. Le nombre de surfaces est représenté par le symbole et  $I_p$  fait référence au nombre de phases. L'élément  $A_{I_s, I_p}$  comprend la valeur de dispersion qui ne se manifeste dans l'élément que lorsque la surface  $I_s$

est impliquée dans la phase Ip en tant que surface exploitée ou surface de reprise. Autrement, il est sans valeur.

**Remarque :**

Un symbole type rond indique une dispersion liée à la reprise, tandis qu'un symbole en forme de croix dénote une dispersion due à l'usinage. Les surfaces seront désignées en ordre croissant de gauche à droite.

*Tableau 2 : Représentation matricielle de l'avant-projet de fabrication*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	$\Delta l_4^{(20)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	$\Delta l_7^{(20)}$	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	0

Afin de vérifier les avant-projets, nous sommes tenus de calculer l'écart de fabrication  $\sum \Delta l_i$ . Trois méthodes peuvent être utilisées pour le calculer :

- méthode du graphe CF
- méthode des intersections des dispersions
- méthode du transfert minimum

***1.7.1.1 Méthode du graphe CF***

Pour obtenir la condition CBE<sub>3-4</sub> du modèle de simulation équivalente de la Figure I 5, par exemple, on calcule toutes les cotes CF qui représentent l'écart de fabrication en rapport avec cette condition. Cette approche nous

donne le graphique illustré par la Figure 3. À partir de ce dernier, nous calculons l'écart de fabrication  $\sum \Delta l_i$  :

$$IT\ CBE_{3-4} = (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_3^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_4^{(20)}). \quad [HM\ 12]$$

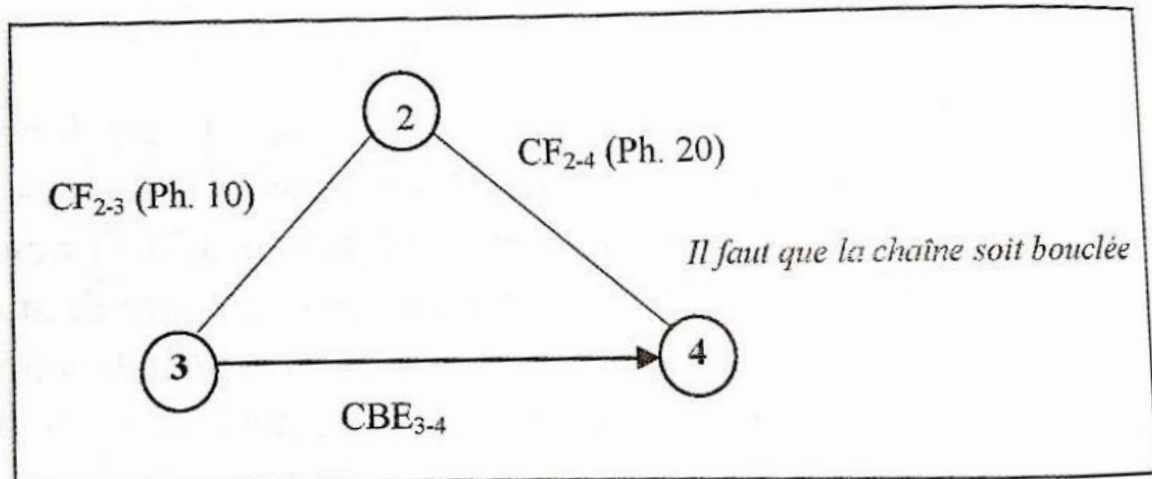


Figure 3 Graphe CF

### 1.8 Méthode des intersections des dispersions [HM 12]

Cette méthode est une méthode automatique et programmable. Elle est développée par le Professeur P. Bourdet en 1973

#### REGLES-

Toute cote condition CBE ou CBM est déterminée par deux colonnes (en d'autres termes, deux surfaces). Par exemple, la cote CBE  $11 \pm 0,05$  se situe entre la surface 3 et la surface 4.

b. le parcours du graphe (Tableau III)

1) On peut se déplacer de la colonne  $i$  à la colonne  $j$  sur une ligne, lorsque  $\Delta l$  est présent aux deux points d'intersection de la ligne et des colonnes. On effectue alors à l'addition des deux  $\Delta l$  ;

2) on peut passer d'une ligne  $p$  à une autre ligne  $q$  par la colonne  $k$  lorsqu'un  $\Delta l$  figure aux deux intersections de la colonne  $k$  et des deux lignes considérées. On effectue ainsi la somme des deux  $\Delta l$  ;

3) En appliquant ces deux règles, on peut toujours déterminer un parcours optimal (avec le minime de lignes possible) pour passer d'une colonne à une autre.

*Tableau 3 :parcours de graphe*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	$\Delta l_4^{(20)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	$\Delta l_7^{(20)}$	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	0

De même, à partir de ce graphe, on détermine l'écart de fabrication  $\sum \Delta l_i$  :

$$IT CBE_{3-4} = (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_3^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_4^{(20)})$$

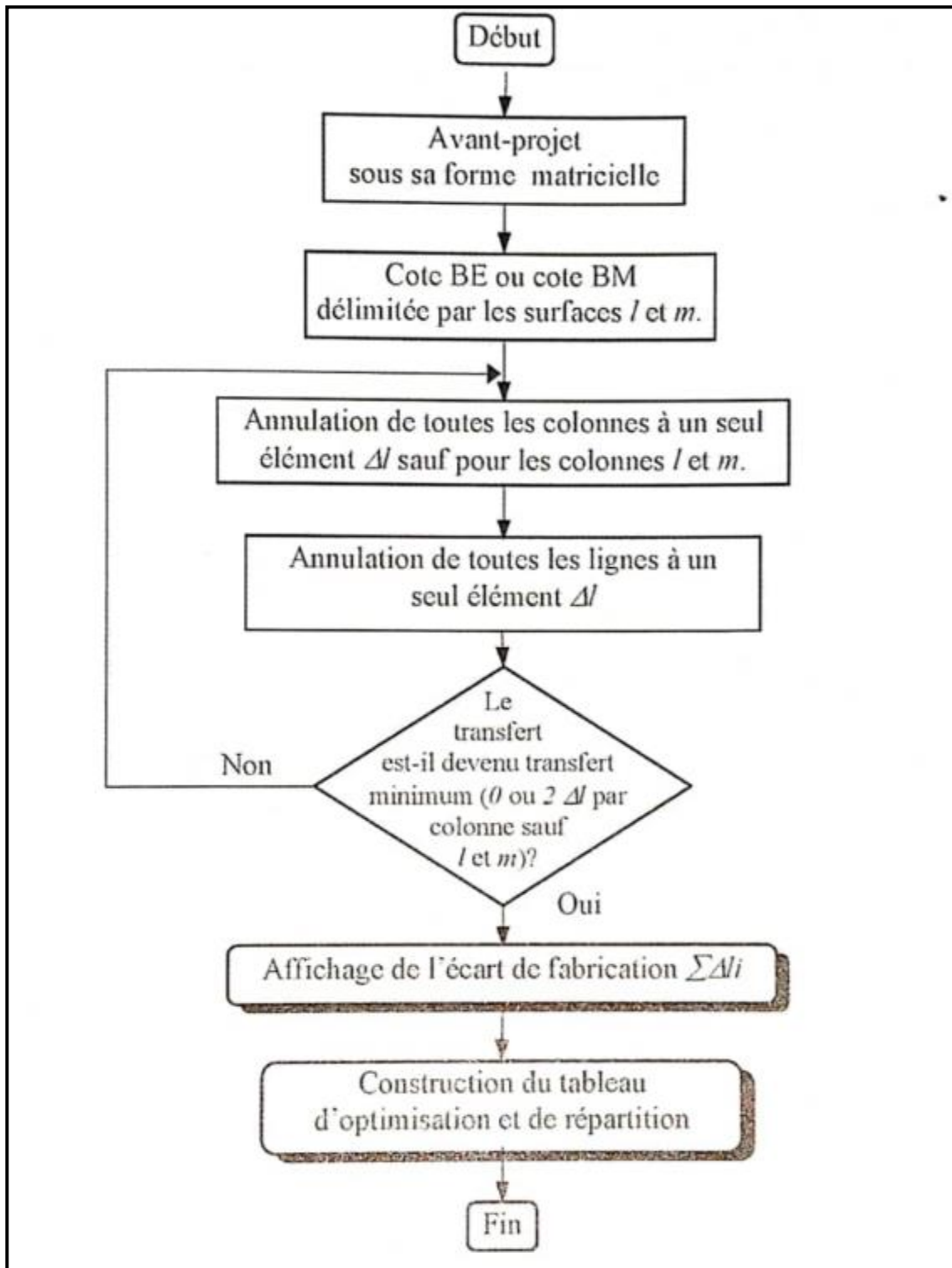


Figure 4 Organigramme de la méthode du transfert minimum

## **I.9 Méthode de transfert minimum : [HM 12]**

C'est en 1981 que le professeur D. Duret a introduit cette méthode pour la première fois. La méthode a d'abord identifié les surfaces qui définissent une cote condition. On les désigne par les lettres l et m. On effectue l'annulation des dispersions uniques qui existent dans toutes les colonnes, sauf celles situées dans les colonnes l et m. On suit le même processus pour les lignes, mais cette fois sans exception. On procède à ces opérations de manière répétée jusqu'à parvenir à un transfert minimum. L'organigramme de la Figure I6 présente les différentes phases de cette méthode.

On applique la même méthode pour toutes les cotes condition. On élabore donc un tableau de répartition et d'optimisation (Tableau LII).

Afin de détailler les diverses phases de résolution de cette méthode, nous faisons référence à la matrice de l'avant-projet de fabrication illustrée au Tableau II :

a. Consultation du cote conditionnel CBE ou CBM. La condition de la cote doit être déterminée par les surfaces qui l'encadrent, à savoir :

- surface initiale (source) : l ;
- surface finale (cible) : m ;

b. recherche du transfert minimal. Pour déterminer l'écart de fabrication d'une cote condition (par exemple, la cote CBE  $11 \pm 0,05$ ), on suit la procédure suivante :

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	$\Delta l_4^{(20)}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	$\Delta l_9^{(30)}$	0

2. Annulation de toutes les lignes à un seul élément «  $\Delta l$  » :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	$\Delta l_4^{(20)}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

Ces deux opérations sont répétées jusqu'à atteindre un transfert minimal, c'est-à-dire, jusqu'à ce qu'il ne subsiste dans les colonnes (sauf les surfaces l et m) que des zéros ou seulement deux éléments  $\Delta l$ .

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	$\Delta l_4^{(20)}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0

Nous sommes en phase de transfert minimale car, à l'exception des colonnes l et m, il ne reste que des zéros ou deux éléments  $\Delta l$ . Ainsi, afin de déterminer l'écart de fabrication, on additionne les dispersions restantes dans la matrice soit :

$$IT\ CBE_{3-4} = (\Delta l_2 (10) + \Delta l_4 (10)) + (\Delta l_5(20) + \Delta l_7(00))$$

La technique du transfert minimum facilite l'identification des cotes de fabrication qui répondent aux exigences spécifiques. Elle permet aussi de déterminer les chaînes de côtes synthèse par calcul sans avoir recours à une analyse graphique.

### ***1.9.1.1 Reconnaissance des cotes de fabrication CF***

Au lieu de s'appuyer sur la méthode vectorielle non rationnelle, où un préparateur suggère une série de cotes de fabrication qui définira le processus, la méthode des  $\Delta I$  établit automatiquement l'ensemble des cotes CF. Une fois que l'on atteint le transfert minimum (Tableau VII), les cotes de fabrication contribuant à l'établissement des cotes conditions sont celles définies par les surfaces qui acceptent les deux dispersions situées dans la même phase. [HM 12]

*Tableau 7 Matrice de l'APEF en transfert minimum*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta I_2^{(10)}$	$\Delta I_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta I_2^{(20)}$	0	$\Delta I_4^{(20)}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0

Pour la phase 10, on observe deux dispersions  $\Delta I_2(10)$  et  $\Delta I_3(10)$  qui sont placées sur les surfaces 2 et 3. Donc, lors de cette étape, la valeur CF qui contribue à l'établissement de cette cote BE est  $CF_{2-3}$ .

Pour la phase 20, le score CF correspond à  $CF_{2-4}$ . De ce fait, on obtient l'intégralité des cotes de production requises pour réaliser toutes les cotes CBE et CBM.

### ***1.9.1.2 Détermination des chaînes de cotes***

Une fois les surfaces limites identifiées, on cumule leurs dispersions présentes au sein de la même phase. On procède ensuite au calcul de l'écart de fabrication relative à la dimension conditionnelle spécifique. L'équation synthèse de la chaîne de côtes est automatiquement obtenue, car la tolérance de fabrication est la somme des dispersions qui lui sont attribuées. De ce fait, on est en mesure d'identifier l'intégralité des chaînes de côtes, comme illustré par la Figure I-8 :

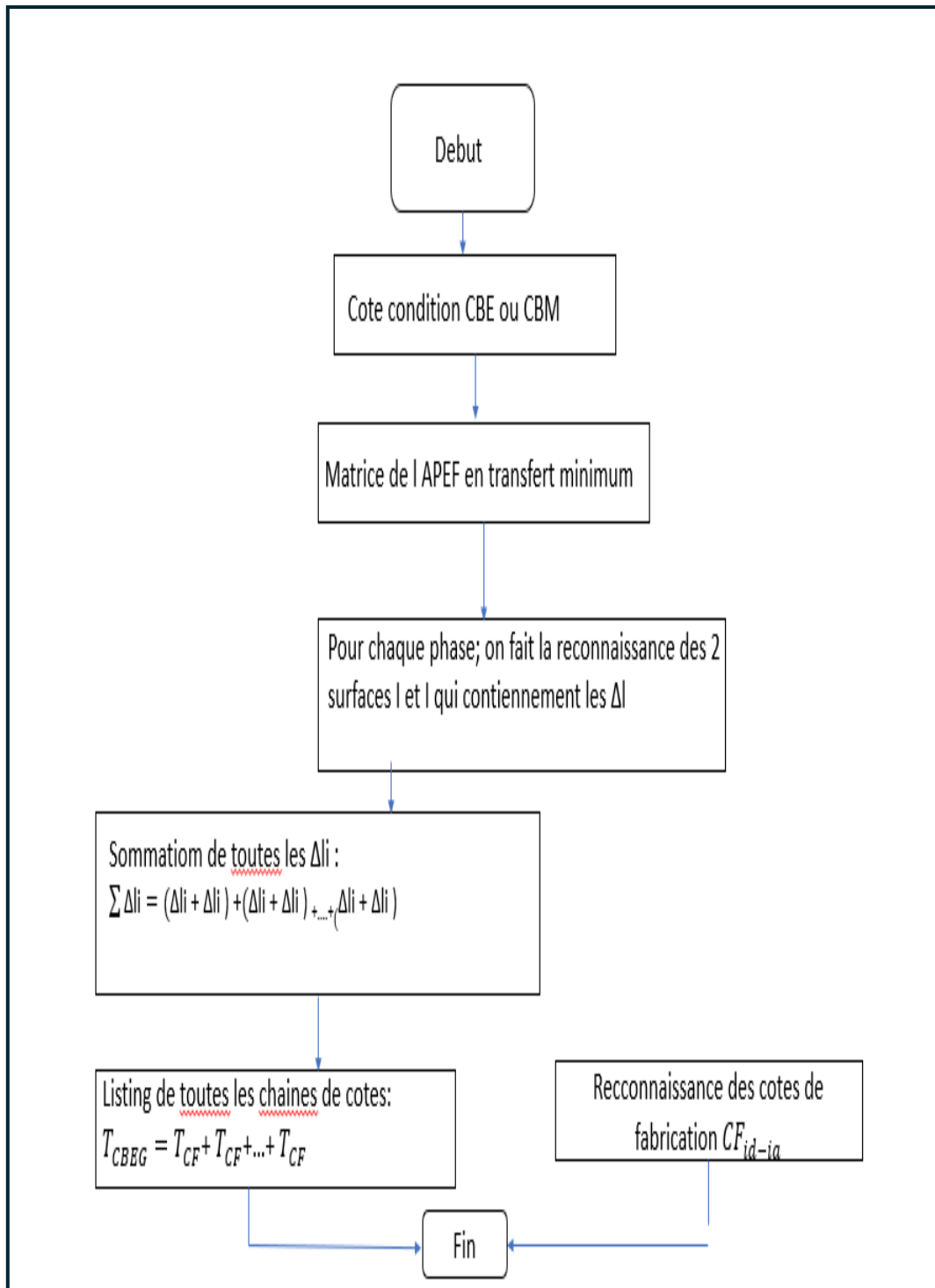


Figure 5 processus de determination des chaines de cotes

### I.9.1.3 Application

Nous continuons avec l'exemple d'application présenté dans la figure 2. La matrice de l'APEF est fournie dans le tableau VIII.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	$\Delta l_4^{(20)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	$\Delta l_7^{(20)}$	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	0

a) Cote  $CBE_{2-3}$  ( $l = 2$  et  $m = 3$ )

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf  $l$  et  $m$ :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	$\Delta l_9^{(30)}$	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf  $l$  et  $m$ :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

Dans le cadre d'un transfert minimum, la variation de fabrication liée à la mesure CBE2-3 est la suivante :

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

Ainsi, la cote de fabrication qui produit la cote CBE2-3 correspond à CF2-3.

B) Cote CBE<sub>3-4</sub>(l=3 et m=4)

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	<b>0</b>	$\Delta l_4^{(20)}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	$\Delta l_9^{(30)}$	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	$\Delta l_4^{(20)}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	<b>0</b>	$\Delta l_4^{(20)}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

Dans le cadre d'un transfert minimal, l'écart de fabrication pour la dimension CBE3-4 est le suivant :

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

Les cotes de fabrication qui mettent en œuvre la cote CBE3-4 sont

CF2-3 et CF2-4.

c) Cote CBE<sub>5-7</sub> (l=5 et m=7)

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	$\Delta l_5^{(20)}$	<b>0</b>	$\Delta l_7^{(20)}$	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_9^{(30)}$	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	$\Delta l_5^{(20)}$	<b>0</b>	$\Delta l_7^{(20)}$	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	$\Delta l_5^{(20)}$	<b>0</b>	$\Delta l_7^{(20)}$	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	0	0	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	$\Delta l_5^{(20)}$	<b>0</b>	$\Delta l_7^{(20)}$	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	$\Delta l_5^{(20)}$	<b>0</b>	$\Delta l_7^{(20)}$	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	0	0	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0

On est en transfert minimal de l'écart de fabrication relatif à la dimension CBE5-7 comme suit :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_5^{(20)} + \Delta l_7^{(20)})$$

Les cotes de fabrication qui exécutent les codes CBE5-7 et CF5-7.

d) Cote CBE 2-7 (l=2 et m=7)

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_7^{(20)}$	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_9^{(30)}$	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_7^{(20)}$	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_7^{(20)}$	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_7^{(20)}$	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_7^{(20)}$	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0

Nous sommes en train de procéder à un transfert minimal, et concernant l'écart de fabrication lié à la cote CBE2-7, il est le suivant :

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

Les cotes de fabrication impliquent les cotes CBE2-7 et CF2-7.

e) Cote CBE 2-6 (l=2, m=6).

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_6^{(20)}$	<b>0</b>	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	$\Delta l_9^{(30)}$	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_6^{(20)}$	<b>0</b>	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_6^{(20)}$	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_6^{(20)}$	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_6^{(20)}$	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0
PH.30	0	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0

Dans le cadre d'un transfert minimum, voici l'écart de fabrication relatif à la dimension CBE2-6 :

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

Les cotes de fabrication qui effectuent la référence CBE2-6 et CF2-6.

f) Cote CBE2-9 (l=2 et m=9)

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	0	0	0	<b>0</b>	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0	<b>0</b>	$\Delta l_9^{(30)}$	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PH.10	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0
PH.10	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0

On est en transfert minimum l'écart de fabrication concernant la cote CBE2-9 est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_9^{(20)})$$

Les cotes de fabrication qui réalisant la cote CBE2-9 et CF2-9.

g) Cote CBE 7-8 (l=7 et m=8)

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	<b>0</b>	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	$\Delta l_7^{(20)}$	<b>0</b>	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	0

2. Annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	<b>0</b>
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	<b>0</b>	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PH.10	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0
PH.10	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0
PH.20	0	<b>0</b>	0	0	0	0	$\Delta l_7^{(20)}$	<b>0</b>	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	0

On est en transfert minimum, l'écart de production pour la référence CBE7-8 est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_7^{(20)} + \Delta l_9^{(20)}) + (\Delta l_8^{(30)} + \Delta l_9^{(30)})$$

Les cotes de production qui respectent la cote CBE7-8 sont CF7-9 et CF8-9.

h) Cote CBE 1-2 (l=1 et m=2)

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	<b>0</b>	$\Delta l_2^{(10)}$	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	<b>0</b>	$\Delta l_2^{(20)}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	<b>0</b>	$\Delta l_9^{(30)}$	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	<b>0</b>	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	<b>0</b>	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0
PH.30	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	$\Delta l_1^{(00)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

On est en transfert minimal, la variation de fabrication pour la mesure CBM1-2 est la suivante :

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

Les cotes de fabrication exécutant la cote  $CBM_{1-2}$  sont  $CF_{1-10}$  et  $CF_{2-10}$ .

i) Cote  $CBM_{9-10}$  (l=9 et m=10)

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(00)}$
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_9^{(30)}$	0

2. annulation de toutes les lignes a un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_9^{(20)}$	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément «  $\Delta l$  » sauf l et m:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
PH.10	0	$\Delta l_2^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	$\Delta l_{10}^{(10)}$
PH.20	0	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0	0	0	0	$\Delta l_9^{(20)}$	<b>0</b>
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>

On est en transfert minimum l'écart de fabrication concernant la cote  $CBM_{9-10}$  est le suivant :  $\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_{10}^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_9^{(20)})$

Les cotes de fabrication qui réalisant la cote  $CBM_{9-10}$  sont  $CF_{2-10}$  et

$CF_{2-9}$ .

## I.10 Conclusion

Ce chapitre consiste à déterminer les écarts de fabrication de chaque cote condition CBE et CBM pour la vérification de l'avant-projet d'étude de fabrication.

## ***chapitre II :***

# *Optimisation des dispersions et tolérances de fabrication*

## **II.1 Introduction**

L'optimisation des dispersions repose sur la modélisation de ces fluctuations dimensionnelles au sein des chaînes de cotes fonctionnelles d'un assemblage mécanique, en se concentrant particulièrement sur l'utilisation de la méthode des dispersions inconnues combinée à la technique du transfert minimum. Ce modèle permet l'extraction automatique des chaînes fonctionnelles et l'optimisation des dispersions correspondantes pour chaque dimension. [MCH 11]

## **II.2 Principe de la méthode des dispersions**

La méthode des dispersions repose sur l'analyse des écarts dimensionnels (dispersions) qui apparaissent durant la fabrication en série.

La méthode des dispersions repose sur l'analyse des écarts dimensionnels (dispersions) qui apparaissent durant la fabrication en série.

Cette méthode repose sur l'approche du cas supérieur, c'est-à-dire qu'elle prend en compte le maximum possible des variations potentielles dans une série de cotes (ensemble des dimensions fonctionnelles liées à un assemblage). Elle est liée à la méthode du transfert minimal, qui privilégie l'extraction automatique des séquences de cotes fonctionnelles via un calcul matriciel, facilitant ainsi la simulation et l'optimisation. [MCH 11]

### II.3 Formation de la matrice globale d'optimisation des dispersions [HM 12]

Nous construisons une matrice d'optimisation globale de  $n_c$  lignes et  $n_d$  colonnes à partir des chaînes de tolérance exprimées en termes de dispersions. Dans cette matrice, chaque ligne  $l_c$  correspond à un score conditionnel tandis que chaque colonne  $l_d$  fait référence à une dispersion, comme illustré dans le tableau L. Il est observable que chaque ligne est reliée à une série de tolérances associées à une série de cotes fonctionnelles. Dans chaque colonne, nous insérons la valeur de la dispersion identifiée par la variable  $x$  si elle se trouve dans la gamme de tolérance. Sinon, nous inscrivons la valeur 0.

Tableau 50 :matrice globale d'optimisation

$N^0$	CC	$\Delta l_1$	$\Delta l_2$	...	$\Delta l_{nd}$	IT
1	$CC_1$	X	X	...	0	
2	$CC_2$	0	X	...	X	
...	...	...	...	...	...	
P	$CC_{n_c}$	X	0	...	X	

### II.4 Optimisation des dispersions de fabrication : [HM 12]

Les variations qui le caractérisent déterminent l'écart de fabrication. La finalité de l'optimisation des dispersions est de renforcer les tolérances relatives aux dimensions de production. Il s'agit d'optimiser au maximum les valeurs des dispersions tout en respectant les équations limites

$$T_{CBE} = \sum \Delta L_i \quad [R2].$$

Cette équation rend possible l'acquisition de pièces conformes au design de référence en utilisant des techniques moins onéreuses et moins exactes que celles prévues initialement. [HM 12]

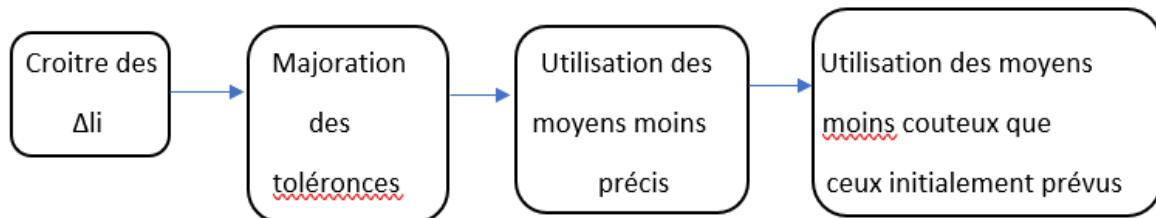


Figure 6 L'optimisation des tolérances de fabrication peut être initiée en prenant

En se basant sur des dispersions minimales des procédés dans une base de données ( $\Delta li_{\text{mini}}$ ), comme démontré dans le tableau I, ou en considérant les dispersions non déterminées.

#### II.4.1 Optimisation des tolérances initiée avec des dispersions minimales

Une fois les valeurs minimales de dispersion pour différents procédés d'usinage et montages définies ou choisies à partir du tableau de dispersion (Tableau I), et après contrôle de l'ébauche du projet d'étude de fabrication grâce à la formule [R1]. Il est possible d'optimiser les valeurs de ces dispersions en recourant aux équations limites [R2]. Comme le montre le tableau LI, nous mettons en place le plan d'optimisation et de distribution. Cette optimisation fait référence à l'exemple d'application présenté à la Figure II 2. Nous identifions ensuite les différences entre les tolérances dimensionnelles CBE et leurs écarts de production  $\mathcal{E}$ . Nous les organisons de manière ascendante pour définir la structure du processus d'optimisation.

*Tableau 51 : Tableau d'optimisation et de répartition ( $\Delta l$  mini )*

C.C.	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	$\Delta l_7^{(20)}$	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(20)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	$\Delta l_{10}^{(0)}$	$\Delta l_{10}^{(1)}$	$T_{CBE}$	$\Sigma \Delta li$	$\epsilon$
CBE <sub>2-3</sub>	0	0.025	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.05	0.35
CBE <sub>3-4</sub>	0	0.025	0.025	0.025	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0
CBE <sub>5-7</sub>	0	0	0	0	0	0.05	0	0.02	0	0	0	0	0	0.1	0.07	0.03
CBE <sub>2-7</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0.1	0.045	0.055
CBE <sub>2-6</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0.3	0.075	0.225
CBE <sub>2-9</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0.08	0.045	0.035
CBE <sub>7-8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0.02	0.02	0	0	0.1	0.08	0.02
CBE <sub>1-2</sub>	0.5	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0.5	-	1.525	-
CBE <sub>9-10</sub>	0	0.025	0.025	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0.5	-	0.57	-

En suivant le processus étape par étape, nous calculons pour chaque condition BE la distribution  $k_j$  grâce à l'équation ci-dessous à chaque itération :

$$k_j = \frac{T_{CBE} - \sum_{i=1}^n \Delta li}{n'} \quad [R3]$$

On note  $n$  comme le nombre de dispersions susceptibles d'être amplifiées, et  $n'$  comme le nombre de dispersions qui participent à l'écart de production du score conditionnel. La distribution de la répartition  $k_j$  est uniforme sur toutes les dispersions qui pourraient être amplifiées. Ainsi, nous perfectionnons les différentes variabilités de production en les mesurant grâce à la formule suivante :

$$\Delta li_{opt} = \Delta li + k_j \quad [R4]$$

En conclusion, nous établissons les tolérances des cotes de production en additionnant les écarts optimisés assignés aux surfaces qui définissent la cote de production CF. :

$$T_{CF_{id-ia}} = \Delta li_{d opt} + \Delta li_{a opt} \quad [R5]$$

Où  $i_d$  et  $i_a$  sont les surfaces de départ et d'arrivée qui délimitent la cote de fabrication CF.

## II.4.2 Optimisation des tolérances avec les dispersions inconnues :

La technique du transfert minimum est employée pour déceler les divergences existantes dans les tolérances de production. Nous élaborons donc un tableau pour optimiser et contrôler les avant-projets d'étude de fabrication (APEF). Le tableau LII illustre que les déviations non identifiées dans la dispersion sont marquées par la lettre x, tandis que celles qui ne sont pas concernées sont signalées par le chiffre 0.

*Tableau 52: Tableau d'optimisation et de vérification*

N °	C.C.	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	$\Delta l_7^{(20)}$	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(20)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	$\Delta l_{10}^{(0)}$	$\Delta l_{10}^{(1)}$	T <sub>CBE</sub>
1	CBE <sub>2-3</sub>	0	x	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4
2	CBE <sub>3-4</sub>	0	x	x	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
3	CBE <sub>5-7</sub>	0	0	0	0	0	x	0	X	0	0	0	0	0	0.1
4	CBE <sub>2-7</sub>	0	0	x	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0.1
5	CBE <sub>2-6</sub>	0	0	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0.3
6	CBE <sub>2-9</sub>	0	0	x	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0.08
7	CBE <sub>7-8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	X	x	x	x	0	0	0.1
8	CBE <sub>1-2</sub>	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x	Mini
9	CBE <sub>9-10</sub>	0	x	x	0	0	0	0	0	0	X	0	0	x	Mini

D'abord, on détermine le coefficient de répartition k'<sub>j</sub> pour toutes les cotes condition BE en utilisant la formule suivante :

$$K'_j = \frac{T_{CBE} - \sum_{i=1}^n \Delta l_i}{p} \quad [R]$$

Soit m le total des dispersions identifiées, p le total des dispersions non reconnues, et j l'indice de répétition associé à la position du traitement d'une cote sous condition BE.

On commence avec la ligne qui a le coefficient le plus faible, soit k'<sub>j</sub>. Une fois que les valeurs de dispersion de la ligne ont été calculées, on les représente visuellement sur toute la colonne où elles sont situées. Nous continuons à calculer les nouveaux coefficients k'<sub>j</sub> en utilisant les nouvelles  $\Delta l_i$  jusqu'à ce que toutes les lignes des cotes condition BE bi

limitées soient épuisées, comme démontré dans les tableaux LIII, LIV, LV et LVI.

Les indices CBE3-4 et CBE7-8 affichent le coefficient k'j le plus bas. On commence par la première, qui est la cote CBE3-4. On montre également la dispersion calculée sur l'ensemble de la colonne dans laquelle elle se trouve (Tableau LIII).

On refait les calculs des coefficients k'2 en se servant de la formule [R6]. Dans cette version, le coefficient le plus faible est associé à la note CBE7-8 (0.025).

*Tableau 53: Tableau de répartition et d'optimisation ( $\Delta l$  inconnues).*

N°	C.C.	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	$\Delta l_7^{(20)}$	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(20)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	$\Delta l_{10}^{(0)}$	$\Delta l_{10}^{(1)}$	T <sub>CBE</sub>	K'1
1	CBE <sub>2-3</sub>	0	0.025	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.2
2	CBE <sub>3-4</sub>	0	0.025	0.025	0.025	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.025
3	CBE <sub>5-7</sub>	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	0.1	0.05
4	CBE <sub>2-7</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0.1	0.05
5	CBE <sub>2-6</sub>	0	0	0.025	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0.3	0.15
6	CBE <sub>2-9</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0.08	0.04
7	CBE <sub>7-8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	0	0	0.1	0.025
8	CBE <sub>1-2</sub>	x	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	Mini	-
9	CBE <sub>9-10</sub>	0	0.025	0.025	0	0	0	0	0	0	X	0	0	X	Mini	-

*Tableau 54: Tableau de répartition et d'optimisation ( $\Delta l$  inconnues).*

N°	C.C.	$\Delta l_1^{(00)}$	$\Delta l_2^{(10)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	$\Delta l_4^{(20)}$	$\Delta l_5^{(20)}$	$\Delta l_6^{(20)}$	$\Delta l_7^{(20)}$	$\Delta l_8^{(30)}$	$\Delta l_9^{(20)}$	$\Delta l_9^{(30)}$	$\Delta l_{10}^{(0)}$	$\Delta l_{10}^{(1)}$	T <sub>CBE</sub>	K'1	K'2
1	CBE <sub>2-3</sub>	0	0.025	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.2	-
2	CBE <sub>3-4</sub>	0	0.025	0.025	0.025	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.025	-
3	CBE <sub>5-7</sub>	0	0	0	0	0	X	0	0.025	0	0	0	0	0	0.1	0.05	0.075
4	CBE <sub>2-7</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0	0.025	0	0	0	0	0	0.1	0.05	0.075
5	CBE <sub>2-6</sub>	0	0	0.025	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0.3	0.15	0.275
6	CBE <sub>2-9</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0.025	0	0	0	0.08	0.04	0.055
7	CBE <sub>7-8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0.025	0.025	0.025	0.025	0	0	0.1	0.025	0.025
8	CBE <sub>1-2</sub>	x	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	Mini	-	-
9	CBE <sub>9-10</sub>	0	0.025	0.025	0	0	0	0	0	0	0.025	0	0	X	Mini	-	-

Une fois de plus, nous procédons au calcul des nouveaux coefficients. Dans cette version, le coefficient le plus bas est attribué à celui de la note CBE5-7 (Tableau LV). Les anomalies de production concernant la dimension CBE2-3 ont déjà été établies dans les séries antérieures, donc elles sont fixes. Ainsi, nous gérons la référence CBE5-7.

*Tableau 55: Tableau de répartition et d'optimisation ( $\Delta I$  inconnues).*

N °	C.C.	$\Delta I_1^{(00)}$	$\Delta I_2^{(10)}$	$\Delta I_2^{(20)}$	$\Delta I_3^{(10)}$	$\Delta I_4^{(20)}$	$\Delta I_5^{(20)}$	$\Delta I_6^{(20)}$	$\Delta I_7^{(20)}$	$\Delta I_8^{(30)}$	$\Delta I_9^{(20)}$	$\Delta I_9^{(30)}$	$\Delta I_{10}^{(0)}$	$\Delta I_{10}^{(1)}$	T <sub>CBE</sub>	K'1	K'2	K'3
1	CBE <sub>2-3</sub>	0	0.025	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.2	-	-
2	CBE <sub>3-4</sub>	0	0.025	0.025	0.025	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.025	-	-
3	CBE <sub>5-7</sub>	0	0	0	0	0	0.075	0	0.025	0	0	0	0	0	0.1	0.05	0.075	0.075
4	CBE <sub>2-7</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0	0.025	0	0	0	0	0	0.1	0.05	0.075	-
5	CBE <sub>2-6</sub>	0	0	0.025	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0.3	0.15	0.275	0.275
6	CBE <sub>2-9</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0.025	0	0	0	0.08	0.04	0.055	-
7	CBE <sub>7-8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0.025	0.025	0.025	0.025	0	0	0.1	0.025	0.025	-
8	CBE <sub>1-2</sub>	x	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	Mini	-	-	-
9	CBE <sub>9-10</sub>	0	0.025	0.025	0	0	0	0	0	0	0.025	0	0	X	Mini	-	-	-

### Troisième itération

En fin de compte, la détermination du dernier coefficient nouvellement calculé est liée à celui de la cote CBE2-6. Ainsi, le tableau LVI présente toutes les dispersions optimisées qui ont été obtenues.

*Tableau 56: Tableau de répartition et d'optimisation ( $\Delta I$  inconnues).*

N °	C.C.	$\Delta I_1^{(00)}$	$\Delta I_2^{(10)}$	$\Delta I_2^{(20)}$	$\Delta I_3^{(10)}$	$\Delta I_4^{(20)}$	$\Delta I_5^{(20)}$	$\Delta I_6^{(20)}$	$\Delta I_7^{(20)}$	$\Delta I_8^{(30)}$	$\Delta I_9^{(20)}$	$\Delta I_9^{(30)}$	$\Delta I_{10}^{(0)}$	$\Delta I_{10}^{(1)}$	T <sub>CBE</sub>	K'1	K'2	K'3	K'4
1	CBE <sub>2-3</sub>	0	0.025	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.2	-	-	-
2	CBE <sub>3-4</sub>	0	0.025	0.025	0.025	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.025	-	-	-
3	CBE <sub>5-7</sub>	0	0	0	0	0	0.075	0	0.025	0	0	0	0	0	0.1	0.05	0.075	0.075	-
4	CBE <sub>2-7</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0	0.025	0	0	0	0	0	0.1	0.05	0.075	-	-
5	CBE <sub>2-6</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0.275	0	0	0	0	0	0	0.3	0.15	0.275	0.275	0.275
6	CBE <sub>2-9</sub>	0	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0.025	0	0	0	0.08	0.04	0.055	-	-
7	CBE <sub>7-8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0.025	0.025	0.025	0.025	0	0	0.1	0.025	0.025	-	-
8	CBE <sub>1-2</sub>	0.5	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	Mini	-	-	-	-
9	CBE <sub>9-10</sub>	0	0.025	0.025	0	0	0	0	0	0	0.025	0	0	0.5	Mini	-	-	-	-

L'ordre de traitement donc est le suivant : 2-7-3 puis 5.

On attribue fréquemment une valeur par défaut de 0,5 aux écarts qui n'ont pas une grande influence sur le processus.

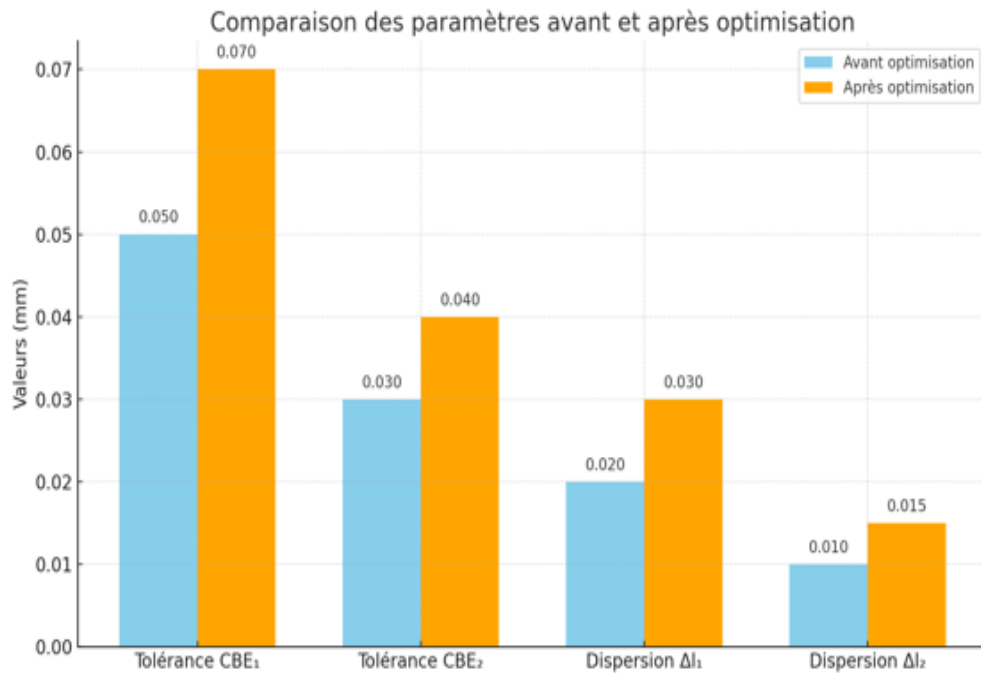
## II.5 Résultats et analyse

Cette partie offre une comparaison approfondie des tolérances avant et après l'optimisation, ainsi qu'une étude des bénéfices réalisés en matière de coût de production et de qualité des pièces.

### II.5.1 Comparaison des tolérances avant et après optimisation

Cette partie offre une comparaison approfondie des tolérances avant et après l'optimisation, ainsi qu'une étude des bénéfices réalisés en matière de coût de production et de qualité des pièces :

Paramètre		Avant optimisation	Après optimisation	Gain relatif
Tolérance (mm)	CBE <sub>1</sub>	±0.05	±0.07	+40%
Tolérance (mm)	CBE <sub>2</sub>	±0.03	±0.04	+33%
Dispersion (mm)	$\Delta I_1$	0.02	0.03	+50%
Dispersion (mm)	$\Delta I_2$	0.01	0.015	+50%



*Figure 7 diagramme de comparaison entre les paramètres avant et après l'optimisation*

### II.5.2 Interprétation des Résultats

Grâce à l'optimisation, nous avons pu étendre les tolérances dimensionnelles tout en respectant les restrictions fonctionnelles dictées par la conception.

En effet, comme le montre le tableau :

On observe que :

La tolérance CBE<sub>1</sub> est passée de  $\pm 0.05$  mm à  $\pm 0.07$  mm, soit un élargissement de 40%.

La tolérance  $CBE_2$  est passée de  $\pm 0.03$  mm à  $\pm 0.04$  mm, soit un élargissement de 33%.

Les dispersions  $\Delta I_1$  et  $\Delta I_2$  ont toutes deux augmenté de 50%, ce qui traduit une variabilité plus grande des dimensions fabriquées.

Cette extension des tolérances entraîne une hausse des dispersions, indiquant que les processus de fabrication peuvent être moins exacts tout en assurant la conformité fonctionnelle des pièces fabriquées.

### **II.5.3 Gains Économiques**

L'optimisation des tolérances se traduit directement par des gains économiques significatifs :

#### **II.5.3.1 *Diminution des rebuts :***

L'élargissement des tolérances diminue le danger de pièces qui ne respectent pas les normes. Par exemple, en acceptant une tolérance de  $\pm 0.07$  mm au lieu de  $\pm 0.05$  mm pour  $CBE_1$ , la production autorise des variations plus larges, ce qui réduit le taux de rejet.

Utilisation de machines moins précises (et donc moins coûteuses) :

L'emploi d'équipements standards, moins onéreux est possible grâce à des tolérances plus larges, évitant ainsi l'investissement dans des machines de précision élevée.

#### **II.5.3.2 *Optimisation des temps d'usinage :***

En ayant des tolérances moins rigoureuses (par exemple  $\pm 0,04$  mm pour  $CBE_2$  plutôt que  $\pm 0,03$  mm), les activités de finition (telles que le polissage

ou les modifications manuelles) sont minimisées, entraînant une réduction du temps de production et une augmentation de la productivité.

## **II.6 Impact sur la qualité et la fonctionnalité**

Bien que les marges de tolérance soient élargies, la méthode assure le respect des exigences fonctionnelles :

- Validation par simulation : Les montages examinés respectent intégralement les conditions de fonctionnement.
- Renforcement de la robustesse : La méthode du pire des cas garantit que même les variations extrêmes n'affectent pas la qualité.
- Diminution des retours de clients : Moins de non-conformités relevées lors du contrôle qualité.

### **II.6.1 Discussion et limites**

#### ***II.6.1.1 - Avantages***

- Diminution notable des dépenses sans compromettre la qualité.
- Amélioration de l'adaptabilité aux variations naturelles des processus.

#### ***II.6.1.2 Limites***

- Exige une modélisation exacte des chaînes de côtes.
  - Pourrait être moins performant pour des montages d'une précision extrême (par exemple : aéronautique).

## **II.7 Impact économique et industriel**

L'amélioration des tolérances de production a un impact considérable sur la compétitivité dans l'industrie. Cette partie mesure les bénéfices

économiques, l'augmentation de la qualité et juge la rentabilité de la technique.

### **II.7.1 Réduction des Coûts de Fabrication**

L'optimisation des tolérances participe directement à la diminution des coûts de fabrication par le biais de divers mécanismes d'économie :

#### ***II.7.1.1 Élargissement des tolérances***

Facilite l'emploi de méthodes de production moins exactes et donc plus économiques.

Par exemple : La substitution d'une machine CNC de haute précision ( $\pm 0.01$  mm) par une machine conventionnelle ( $\pm 0.05$  mm) peut aboutir à une diminution du coût par heure d'environ 30%.

## **II.8 Conclusion**

Ce chapitre démontre que l'optimisation des dispersions et des tolérances améliore la maîtrise des procédés de fabrication, réduit les coûts et augmente la flexibilité industrielle. Grâce à la méthode des dispersions inconnues et au transfert minimum, il est possible de respecter les exigences fonctionnelles tout en élargissant les tolérances. Malgré quelques limites en cas d'ultra-précision, cette approche renforce la qualité, la robustesse et la compétitivité sur le marché.

## ***chapitre III***

# *Calcul des cotes de fabrication*

### **III.1 Introduction**

Les cotes de fabrication désignent les dimensions et tolérances réellement obtenues sur un élément lors du processus d'usinage, sans nécessiter le démontage de la pièce. Ces surfaces établissent une connexion entre une surface de positionnement et une surface usinée, ou entre deux surfaces usinées dans la même phase d'usinage. [CHAP 3]

### **III.2 Rôle des cotes de fabrication**

-Assurer la conformité de la pièce produite aux spécifications du plan de définition, en transformant les dimensions fonctionnelles en mesures directement applicables sur l'équipement.

-Contribuer à l'ajustement des machines et outils en fournissant des données précises pour la disposition des outils par rapport aux surfaces de référence.

-Optimiser le processus d'usinage en permettant la surveillance et l'adaptation des opérations de production, surtout pour la fabrication à grande échelle.

-Garantir la rentabilité et l'interchangeabilité des pièces produites, en veillant à ce que les dimensions soient conformes aux tolérances économiques adéquates au processus de fabrication. [CHAP 3]

### III.3 Calcul des cotes de fabrication [HM 12]

Avant de procéder au calcul des cotes de fabrication impliquées dans les diverses conditions, il est impératif de les identifier et de les inventorier automatiquement en premier lieu. Dans le module de vérification, une fois que l'on est en transfert minimum, les cotes de fabrication qui contribuent à la mise en œuvre des conditions sont celles délimitées par les surfaces présentant deux dispersions. De ce fait, on parvient à obtenir toutes les estimations de fabrication requises dans le pré-projet d'étude de fabrication. Pour la confirmation de la valeur CBE3-4 ( $11 \pm 0,05$ ) présentée dans la figure 2. Par exemple, on se réfère à la matrice de l'APEF en transfert minimum présentée dans le Tableau LVII.

On remarque que pour la phase 10, il y a deux dispersions  $\Delta I_2^{(10)}$  et  $\Delta I_3^{(10)}$  positionnées sur les surfaces 2 et 3. Alors, la cote de fabrication (CF) qui participe à la réalisation de cette cote BE dans cette phase est  $CF_{2-3}$ . Pour la phase 20, la cote CF est  $CF_{2-4}$ .

#### III.3.1 Interprétation de la matrice APEF en transfert minimum

Tableau 57: Matrice de l'APEF en cas de transfert minimum

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PH.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PH.10	0	$\Delta I_2^{(10)}$	$\Delta I_3^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	0
PH.20	0	$\Delta I_2^{(20)}$	0	$\Delta I_4^{(20)}$	0	0	0	0	0	0
PH.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En d'autres termes, la relation suivante fournit l'écart de fabrication pour cette cote BE :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_2^{(10)} + \Delta l_3^{(10)}) + (\Delta l_2^{(20)} + \Delta l_4^{(20)}) \quad [R7]$$

### III.3.2 Établissement des chaînes de cotes de fabrication

L'équation d'assemblage de la chaîne de cotes suivante est dérivée en considérant que la tolérance de fabrication représente l'agrégation des dispersions qui lui sont attribuées, et en utilisant la relation  $T_{CF}$  :

$$T_{CBE_{3-4}} = T_{CF_{2-3}} + T_{CF_{2-4}} \quad [R8]$$

Ce processus de réflexion peut être dupliqué pour établir toutes les chaînes de cotes de fabrication :

$$T_{CBE_{2-3}} = T_{CF_{2-3}}$$

$$T_{CBE_{3-4}} = T_{CF_{2-3}} + T_{CF_{2-4}}$$

$$T_{CBE_{7-5}} = T_{CF_{7-5}}$$

$$T_{CBE_{2-7}} = T_{CF_{2-7}}$$

$$T_{CBE_{2-6}} = T_{CF_{2-6}}$$

$$T_{CBE_{2-9}} = T_{CF_{2-9}}$$

$$T_{CBE_{7-8}} = T_{CF_{7-9}} + T_{CF_{8-9}}$$

$$T_{CBE_{1-2}} = T_{CF_{1-10}} + T_{CF_{2-10}}$$

$$T_{CBE_{9-10}} = T_{CF_{2-9}} + T_{CF_{2-10}}$$

Il est à noter que l'identification de ces cotes CF se fait sans avoir à établir une séquence graphique de côtes.

### III.3.3 Principe des zones de dispersions

Dans ce modèle,  $\Delta l$  se réfère à la portée de la région où la surface 1 doit être positionnée. La position 1 indique l'emplacement du plan central de la zone. Il est également essentiel que les surfaces 2 et 3 se trouvent à l'intérieur des zones délimitées par les dispersions  $\Delta l_2$  et  $\Delta l_3$  respectivement.

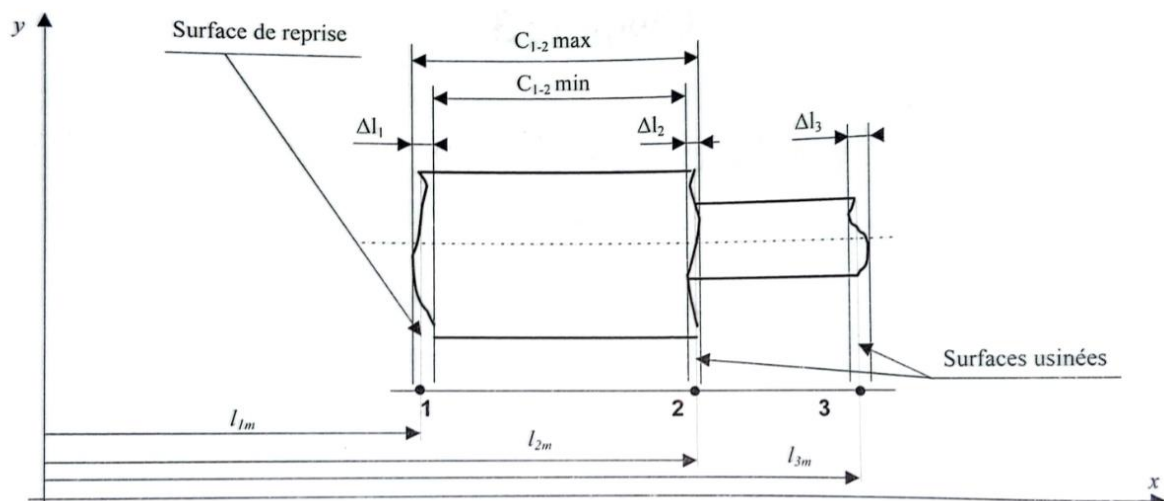


Figure 8 Modele des  $\Delta l$

### III.3.4 Calcul des longueurs moyennes de base

Dès que toutes les cotes de production de l'APEF sont établies, nous déterminons les longueurs de simulation  $l_i$  en nous basant sur les longueurs moyennes de bases du modèle de dispersion présentées dans la figure 14. Nous élaborons donc un système d'équations en se servant des cotes conditionnelles moyennes CBE et CBM à travers les relations ci-dessous :

$$CBE_{id-ia} \text{ moy.} = l_{ia} - l_{id} \quad [R9]$$

$$CBM_{id-ia} \text{ moy.} = l_{ia} - l_{id} \quad [R10]$$

Où  $l_d$  et  $l_a$  sont les surfaces qui délimitent la cote condition en question et avec  $l_d > l_a$  :

$$CBE_{id-ia} \text{ moy} = \frac{CBE_{id-ia} \text{ max} + CBE_{id-ia} \text{ min}}{2} \quad [R11]$$

et :

$$CBM_{id-ia} \text{ moy} = \frac{Cpm_{id-ia} + (Cpm_{id-ia} + \sum \Delta l_i)}{2} \quad [R12]$$

Où :

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

### III.3.5 Système d'équations pour la simulation des longueurs

De même, si la cote CBE est unlimite, sa cote moyenne se calcule de la façon suivante :

- Si la cote  $CBE_{\min}$  est donnée :

$$CBE_{id-ia} \text{ moy.} = \frac{CBE \min_{id-ia} + (CBE \min_{id-ia} + \sum \Delta l_i)}{2} \quad [R13]$$

- Si la cote  $CBE_{\max}$  est donnée :

$$CBE_{id-ia} \text{ moy.} = \frac{CBE \max_{id-ia} - \sum \Delta l_i + CBE \max_{id-ia}}{2} \quad [R14]$$

Pour calculer les longueurs moyennes de base, on forme le système d'équations suivant :

$$l_1 = 0$$

$$l_9 - l_2 = 53$$

$$l_7 - l_2 = 40$$

$$l_6 - l_2 = 27$$

$$l_3 - l_2 = 5$$

$$l_4 - l_3 = 11$$

$$l_7 - l_5 = 19$$

$$l_8 - l_7 = 0.05$$

$$l_2 - l_1 = 0.9625$$

$$l_{10} - l_9 = 0.4875$$

Pour pouvoir obtenir la première équation ( $l_1 = 0$ ), la surface 1 doit être positionnée sur l'axe Oy.

Après tout calcul fait, on obtient le résultat les longueurs moyennes de base (longueurs de simulation) en mm dans le Tableau II.

*Tableau 58 :Longueurs moyennes de base*

$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$	$l_7$	$l_8$	$l_9$	$l_{10}$
0	0.9625	5.9625	16.9625	21.9625	27.9625	40.9625	41.0125	53.9625	54.45

### **III.3.6 Calcul des cotes moyennes de fabrication**

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

$$CF_{id-ia} \text{ moy} = l_{ia} - l_{id} \quad [R15]$$

Avec  $l_d$  et  $l_a$  les surfaces qui délimitent la cote de fabrication.

Les cotes moyennes de fabrication sont illustrées donc par le Tableau III.

*Tableau 59 :Cotes moyennes de fabrication*

$CF_{1-10} \text{ moy}$	$CF_{2-3} \text{ moy}$	$CF_{2-10}$ moy	$CF_{2-4} \text{ moy}$	$CF_{5-7} \text{ moy}$
$l_{10} - l_1$	$l_3 - l_2$	$l_{10} - l_2$	$l_4 - l_2$	$l_7 - l_5$
54,450	5,000	53,487	16	19
$CF_{2-7} \text{ moy}$	$CF_{2-6} \text{ moy}$	$CF_{2-9} \text{ moy}$	$CF_{7-9} \text{ moy}$	$CF_{8-9} \text{ moy}$

$l_7 - l_2$	$l_6 - l_2$	$l_9 - l_2$	$l_9 - l_7$	$l_9 - l_8$
40	27	53	13	12,950

### III.3.7 — Résultats par phase (méthode $\Delta I$ )

Enfin, le résultat des cotes de fabrication ordonnées par phase est présenté dans le tableau Tableau IV.

*Tableau 60 : Résultat des cotes de fabrication (méthode  $\Delta I$ )*

<b>PH.00</b>	<b>PH.10</b>	<b>PH.20</b>	<b>PH.30</b>
CF <sub>1-10</sub> =54.450±0.50	CF <sub>2-3</sub> =5.000±0.025	CF <sub>5-7</sub> =19.000±0.050	CF <sub>8-9</sub> =12.950±0.025
	CF <sub>2-10</sub> =53.487±0.263	CF <sub>2-6</sub> =27.000±0.150	
		CF <sub>2-7</sub> =40.000±0.025	
		CF <sub>2-9</sub> =53.000±0.025	
		CF <sub>7-9</sub> =13.000±0.025	
		CF <sub>2-4</sub> =16.000±0.025	

## III.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de reconnaître les cotes de fabrication (CF) essentielles dans la réalisation des cotes conditions (CBE et CBM),

grâce à l'application de la méthode des  $\Delta I$  et du transfert minimum.  
Chaque cote CF identifiée montre son appartenance fonctionnelle à une chaîne de cotes bien définie. Ainsi, nous avons pu déterminer de façon structurée les cotes qui réalisent chaque cote condition, assurant la cohérence du processus de fabrication.

# *chapitre IV*

## *APPLICATION*

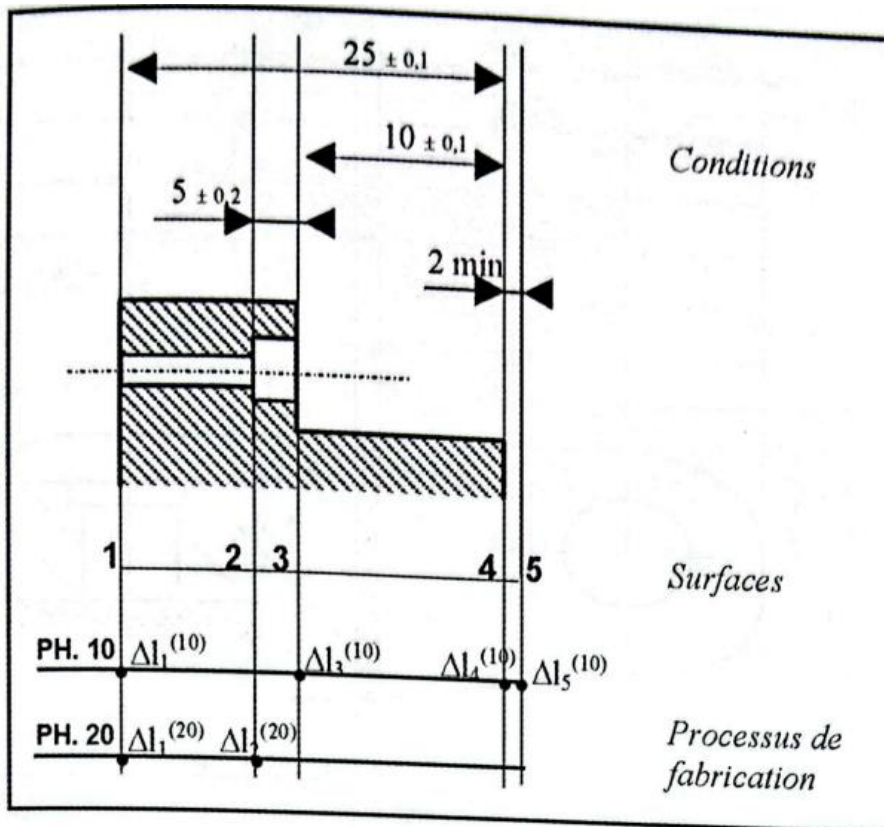


Figure 9 Exemple de la pièce[HM 12]

#### IV.1 Vérification des avant-projets de fabrication [HM 12]

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

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

On détermine les écarts de fabrication concernant les différentes cotes de condition CBE et CBM.

a) Cote CBE  $25 \pm 0.1$  ( $l=1$  et  $m=4$ )

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément  $\Delta l$  sauf  $l$  et  $m$

	1	2	3	4	5
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	<b>0</b>	$\Delta l_4^{(10)}$	<b>0</b>
PH.20	$\Delta l_1^{(20)}$	<b>0</b>	0	0	0

2. Annulation de toutes les lignes à un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	$\Delta l_4^{(10)}$	0
PH.20	<b>0</b>	0	0	0	0

On est en transfert minimum l'écart de fabrication concernant la cote CBE  $25 \pm 0.1$  est le suivant :

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

De même, la cote de fabrication qui réalise la cote  $CBE_{1-4}$  est  $CF_{1-4}$

b) Cote CBE  $10 \pm 0.1$  ( $l=3$  et  $m=4$ )

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément  $\Delta l$  sauf  $l$  et  $m$

	1	2	3	4	5
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	$\Delta l_3^{(10)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	<b>0</b>
PH.20	$\Delta l_1^{(20)}$	<b>0</b>	0	0	0

2. Annulation de toutes les lignes à un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	$\Delta l_3^{(10)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	0
PH.20	<b>0</b>	0	0	0	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément  $\Delta l$  sauf l et m

	1	2	3	4	5
PH.10	<b>0</b>	0	$\Delta l_3^{(10)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	0
PH.20	0	0	0	0	0

On est en transfert minimum l'écart de fabrication concernant la cote CBE  $10 \pm 0.1$  est le suivant :

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

De même, la cote de fabrication qui réalise la cote CBE<sub>3-4</sub> est CF<sub>3-4</sub>.

c) Cote CBE  $5 \pm 0.2$  (l=2 et m=3)

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément  $\Delta l$  sauf l et m

	1	2	3	4	5
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	$\Delta l_3^{(10)}$	<b>0</b>	<b>0</b>
PH.20	$\Delta l_1^{(20)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	0	0	0

2. Annulation de toutes les lignes à un seul élément  $\Delta l$  :

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

On est en transfert minimum l'écart de fabrication concernant la cote CBE  $5 \pm 0.2$  est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_1^{(10)} + \Delta l_3^{(10)}) + (\Delta l_1^{(20)} + \Delta l_2^{(20)})$$

De même, la cote de fabrication qui réalise la cote CBE<sub>2-3</sub> est CF<sub>1-3</sub> et CF<sub>1-2</sub>

d) Cote CBM 2 min (l=4 et m=5)

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément  $\Delta l$  sauf l et m

	1	2	3	4	5
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	<b>0</b>	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$
PH.20	$\Delta l_1^{(20)}$	<b>0</b>	0	0	0

2. Annulation de toutes les lignes à un seul élément  $\Delta l$  :

	1	2	3	4	5
PH.10	$\Delta l_1^{(10)}$	0	0	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$
PH.20	<b>0</b>	0	0	0	0

1. Annulation de toutes les colonnes à un seul élément  $\Delta l$  sauf l et m

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

On est en transfert minimum l'écart de fabrication concernant la cote  
CBM 2 min est le suivant :

$$\sum \Delta l_i = (\Delta l_4^{(10)} + \Delta l_5^{(10)})$$

De même, la cote de fabrication qui réalise la cote  $CBM_{4-5}$  est  $CF_{4-5}$

## IV.2 D'optimisation et de vérification[HM 12]

Tableau LII : Tableau d'optimisation et de vérification

	$\Delta l_1^{(10)}$	$\Delta l_1^{(20)}$	$\Delta l_2^{(20)}$	$\Delta l_3^{(10)}$	$\Delta l_4^{(10)}$	$\Delta l_5^{(10)}$	$T_{CBE}$
25±0.1	x	0	0	0	x	0	0.2
10±0.1	0	0	0	x	x	0	0.2
5±0.2	x	x	x	x	0	0	0.4
2 min	0	0	0	0	x	x	Mini

Premièrement en calcul le ligne le plus petit de  $T_{CBE}$  , on a le choix entre ligne 1 et 2 donc pour suivre l'ordre chronologie on choisissiez 1

	$\Delta I_1^{(10)}$	$\Delta I_1^{(20)}$	$\Delta I_2^{(20)}$	$\Delta I_3^{(10)}$	$\Delta I_4^{(10)}$	$\Delta I_5^{(10)}$	$T_{CBE}$
25±0.1	<b>0.1</b>	0	0	0	<b>0.1</b>	0	<b>0.2</b>
10±0.1	0	0	0	x	<b>0.1</b>	0	0.2
5±0.2	<b>0.1</b>	x	x	x	0	0	0.4
2 min	0	0	0	0	<b>0.1</b>	x	mini

Puis pour la deuxième itération on choisisse ligne 2

	$\Delta I_1^{(10)}$	$\Delta I_1^{(20)}$	$\Delta I_2^{(20)}$	$\Delta I_3^{(10)}$	$\Delta I_4^{(10)}$	$\Delta I_5^{(10)}$	$T_{CBE}$
25±0.1	<b>0.1</b>	0	0	0	<b>0.1</b>	0	0.2
10±0.1	0	0	0	<b>0.1</b>	0.1	0	<b>0.2</b>
5±0.2	0.1	x	x	<b>0.1</b>	0	0	0.4
2 min	0	0	0	0	0.1	x	mini

Puis ligne 3

	$\Delta I_1^{(10)}$	$\Delta I_1^{(20)}$	$\Delta I_2^{(20)}$	$\Delta I_3^{(10)}$	$\Delta I_4^{(10)}$	$\Delta I_5^{(10)}$	$T_{CBE}$
25±0.1	<b>0.1</b>	0	0	0	<b>0.1</b>	0	0.2
10±0.1	0	0	0	<b>0.1</b>	0.1	0	0.2
5±0.2	0.1	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	0.1	0	0	<b>0.4</b>
2 min	0	0	0	0	0.1	X	mini

Pour les cotes non critiques (celles qui n'affectent pas le montage/fonctionnement), on attribue une valeur standard 0,5 au lieu de calculer leur impact réel.

	$\Delta I_1^{(10)}$	$\Delta I_1^{(20)}$	$\Delta I_2^{(20)}$	$\Delta I_3^{(10)}$	$\Delta I_4^{(10)}$	$\Delta I_5^{(10)}$	IT
25±0.1	0.1	0	0	0	0.1	0	0.2
10±0.1	0	0	0	0.1	0.1	0	0.2
5±0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0.4
2 min	0	0	0	0	0.1	0.5	mini

L'ordre de traitement est : 1-2-3

Les valeurs optimisées sont :

$\Delta I_1^{(10)}$	$\Delta I_1^{(20)}$	$\Delta I_2^{(20)}$	$\Delta I_3^{(10)}$	$\Delta I_4^{(10)}$	$\Delta I_5^{(10)}$
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5

### IV.3 CALCUL DES COTES DE FABRICATION [HM 12]

$T_{CF_{1-4}}$	$T_{CF_{3-4}}$	$T_{CF_{1-3}}$	$T_{CF_{4-5}}$	$T_{CF_{1-2}}$
$\Delta I_1^{(10)} + \Delta I_4^{(10)}$	$\Delta I_3^{(10)} + \Delta I_4^{(10)}$	$\Delta I_1^{(10)} + \Delta I_3^{(10)}$	$\Delta I_4^{(10)} + \Delta I_5^{(10)}$	$\Delta I_1^{(20)} + \Delta I_2^{(20)}$
0.2	0.2	0.2	0.6	0.2

$$l_1 = 0$$

$$l_4 - l_1 = 25$$

$$l_4 - l_3 = 10$$

$$l_3 - l_2 = 5$$

$$l_5 - l_4 = 2$$

### IV.3.1 longueur moyennes de base en mm

$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$
0	10	15	25	27.8

### IV.3.2 Les cotes moyennes de fabrication

CF <sub>1-4</sub> moy	CF <sub>3-4</sub> moy	CF <sub>1-3</sub> moy	CF <sub>4-5</sub> moy	CF <sub>1-2</sub> moy
$l_4 - l_1$	$l_4 - l_3$	$l_3 - l_1$	$l_5 - l_4$	$l_2 - l_1$
25	10	15	2.2	10

Enfin, le résultat des cotes de fabrication ordonnées par phase est présenté dans le tableau

<b>PH.10</b>	<b>PH.20</b>
CF <sub>1-4</sub> = 25±1 CF <sub>3-4</sub> = 10±1 CF <sub>1-3</sub> = 15±1 CF <sub>4-5</sub> = 2±2	CF <sub>1-2</sub> = 10±1

## **Conclusion générale**

Ce travail nous permet de calculer des cotes de fabrication avec des tolérances optimisées .

Tout d'abord nous avons procédé à la vérification des APEF dans les transferts minimum , et cela nous permet la reconnaissance des cotes de fabrication (listening des cotes de fabrication présent) et l'appartenance des différentes phases .

Dans cette étude nous avons procédé avec les dispersions inconnues et en arrive à des cotes de fabrication optimisées.

## ***Références bibliographiques***

[MCH 11] N. Medjadi-Cheikh, S. Hamou, D. Moulai-Khatir, A. Cheikh et J.-M. Linares, « Tolérancement fonctionnel optimisé par la méthode des dispersions », *Mécanique & Industries*, vol. 12, no 2, pp. 139–146, 2011.

[En ligne]. Disponible sur : <https://www.mechanics-industry.org/articles/meca/pdf/2011/02/mi0116-2009.pdf>

[BEN 09] A. Benmoussat, *Simulation des avant-projets de fabrication par la modélisation statistique*, Mémoire de Master, Université Abou Bekr

Belkaïd – Tlemcen, 2009. [En ligne]. Disponible sur : [http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/814/1/Simulation-des-avant-projets-de-](http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/814/1/Simulation-des-avant-projets-de-fabrication-par-la-modelisation-statistique.pdf)

[fabrication-par-la-modelisation-statistique.pdf](http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/814/1/Simulation-des-avant-projets-de-fabrication-par-la-modelisation-statistique.pdf)

[HM 12] S. Hamou, *Simulation des avant-projets de fabrication*. Paris : Lavoisier, 2012.

[BEN 17] A. Benbrahim, *Étude et analyse des défauts d'usinage*, Mémoire de Master, Option Maintenance Industrielle, 2017.

[CHAP 3] Université Mohamed Boudiaf de M'sila, « Chapitre 03 – Cotation de fabrication », *Cours de Bureau des Méthodes (BDM)*, [en

ligne]. Disponible sur : [https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/246909/mod\\_resource/content/1/CHAPITRE%2003%20BDM.pdf](https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/246909/mod_resource/content/1/CHAPITRE%2003%20BDM.pdf)

[CHE 94] Chevalier A et J. Bohan ; guide de technicien en productique, Hachette technique, Paris 1994.

[GEL 95] Gelin D et Vincent M ; *Éléments de fabrication*, Ellipses, Paris, 1995.