

THESE

présentée pour l'obtention du
DIPLOME de DOCTEUR de 3ème CYCLE

à L'UNIVERSITE Pierre et Marie CURIE

. PARIS VI .

Spécialité : PHYSIQUE

Mention : MÉCANIQUE APPLIQUÉE A LA CONSTRUCTION

Par : Pierre BOURDET

Sujet : IDENTIFICATION GEOMETRIQUE DES
PIECES MECANQUES

soutenue le 26 OCTOBRE 1979 devant la Commission composée de

MM. R. SIESTRUNCK	Président
J. LEMAITRE	Examineur
A. MOISAN	Examineur
C. SAUVAIRE	Examineur

LABORATOIRE DE MECANIQUE ET TECHNOLOGIE
E.N.S.E.T 61 Avenue du Président Wilson

94230 CACHAN

Cette Thèse a été préparée au LABORATOIRE DE MECANIQUE ET TECHNOLOGIE de l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, en collaboration avec l'Agence Nationale pour le Développement de la Production Automatisée.

Que Monsieur Le Professeur R. SIESTRUNCK trouve ici l'expression de mes remerciements pour avoir accepté de présider ce travail.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur le Professeur J. LEMAITRE, qui a su me diriger avec beaucoup de bienveillance.

J'exprime également ma gratitude à mes Amis A. CLEMENT, C. PIERRON, et J.M. FOUET, pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée.

Je remercie particulièrement Monsieur SAUVATRE pour l'intérêt qu'il porte à notre travail.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I : INTRODUCTION

CHAPITRE II : METHODES ACTUELLES D'IDENTIFICATION D'UNE SURFACE
DESCRIPTION ET CRITIQUE DES METHODES DE CONTROLE.

- I. D'une surface fabriquée plane
- II. D'une surface fabriquée circulaire.
- III. D'une surface fabriquée cylindrique.
- IV. D'une surface de forme complexe.

CHAPITRE III : NOUVELLE METHODE D'IDENTIFICATION D'UNE SURFACE.

CHAPITRE IV : METROLOGIE CLASSIQUE TRIDIMENSIONNELLE D'UNE PIECE
MECANIQUE.

- I. Au marbre
- II. Sur machine à mesurer sans calculateur.
- III. Sur machine à mesurer avec calculateur.

CHAPITRE V : NOUVELLE METHODE D'IDENTIFICATION TRIDIMENSIONNELLE D'UNE
PIECE MECANIQUE.

CHAPITRE VI : ETUDE DETAILLEE DE L'ASSOCIATION D'UN ELEMENT GEOMETRIQUE
A UNE SURFACE PALPEE.

CHAPITRE VII : ETUDE SUR LA PRECISION DES ECARTS DE FORME OPTIMISES.

CHAPITRE VIII : NOUVELLE METHODE DE DEFINITION DES REPERES ET DES
PARAMETRES DE POSITION ENTRE SURFACES FABRIQUEES.

CHAPITRE IX : DESCRIPTION SUCCINCTE DU PROGRAMME DE CONTROLE
AUTOMATIQUE TRIDIMENSIONNEL DES PIECES MECA-
NIQUES.

INTRODUCTION

L'identification géométrique des pièces mécaniques est l'un des problèmes fondamentaux de l'industrie mécanique. La mise au point de tout procédé de réalisation d'une pièce mécanique, aussi bien par coupe des métaux sur machine outil que par déformation plastique en matriçage, forgeage, poinçonnage, moulage, etc... est obtenue par une succession de retouches et d'ajustements définis par comparaison du produit réalisé à un produit modèle connu par des spécifications géométriques.

Si les moyens d'élaboration d'une pièce mécanique sont de plus en plus performants par une automatisation plus poussée : commande numérique, programmation automatique d'usinages, emploi de robots industriels, par l'utilisation de vitesse de coupe et de vitesse de déplacement plus grandes, la mise au point de ces procédés reste tributaire de l'identification de la pièce fabriquée qui demande actuellement des délais disproportionnés (3). (18 heures dans le cas du carter de boîte de vitesse).

Des machines à commandes numériques peuvent reproduire une pièce ou un modèle fabriqué artisanalement (2) à la seule condition de l'identifier correctement, de telle sorte qu'en répétant plusieurs fois de suite le processus d'identification, la dispersion sur les résultats soit négligeable.

En métrologie et dans de nombreux cas d'usinages, on est amené à faire coïncider manuellement le repère lié à la pièce avec le repère de l'appareil de mesure ou de la machine outil. Cette opération appelée balançage est résolue par tâtonnements successifs.

Dans certains cas de pièces brutes, un traçage sur marbre assure avant usinage qu'il y aura toujours de la matière à enlever, c'est à dire que le repère lié aux surfaces usinées est bien balancé par rapport au repère lié aux surfaces brutes. Actuellement ces opérations de balançage sont longues et laborieuses faute de savoir identifier la pièce mécanique dans un repère (4) (8)

On cherche également au niveau d'un projet de gamme de fabrication à simuler à l'avance, en dehors des machines outils, la succession des balançages et des usinages, donc à identifier à l'avance la qualité géométrique de la pièce que l'on pourra obtenir. On diminue ainsi les risques de rebuts et les délais de mise au point de la fabrication.

- Si en métrologie on arrive à l'aide de montage de contrôles spécifiques (7) et par de nombreux tâtonnements, à connaître la qualité géométrique des pièces composées de formes élémentaires, il semble que dans le cas de formes complexes (ailettes, ferrures, engrenages) l'identification devienne impossible, on fait appel à des méthodes donnant des résultats aléatoires (1)(5)(6).

A première vue il paraît simple de définir une pièce comme un assemblage d'éléments géométriques simples et bien connus comme le point, la droite, le plan, le cercle, le cylindre, etc..., et de considérer la métrologie comme un simple problème de géométrie avec ses calculs d'angles et de distances. Mais une pièce fabriquée est composée de surfaces élémentaires qui ne sont jamais exactement des plans des cercles, etc...

Ainsi dans le cas par exemple d'une surface fabriquée cylindrique, celle-ci est composée d'une infinité de points. Pour un ensemble de cinq points appartenant à la surface, on peut définir un cylindre C passant par ces cinq points et identifier cette surface par ce cylindre C.

Le cylindre C ainsi défini ne passe pas par les autres points de la surface, et pour toute autre combinaison de cinq points appartenant à la surface, on obtient un cylindre différent. Le choix du cylindre représentatif de la surface devient délicat si l'on sait que celui-ci doit : (exemple du cylindre C1 C2 page 21)

- être d'un diamètre compris entre deux bornes
- avoir son axe perpendiculaire avec une tolérance à l'axe d'un autre cylindre (qui lui-même est à identifier) (C_3, C_4)
- avoir son axe parallèle, avec une tolérance, à un plan P_1 qui lui-même est à identifier).
- être à deux distances d_1 et d_2 de deux plans, (d_1 et d_2 étant données par deux intervalles), P_1 et P_2
- avoir un défaut de forme inférieur à une borne donnée.

L'identification revient à choisir un cylindre C représentatif de cette surface fabriquée cylindrique, satisfaisant de préférence les conditions imposées, et d'en donner les spécifications réelles :

- le diamètre - les défauts de parallélisme et de perpendicularité, les deux distances à deux plans, le défaut de forme.

La position relative de deux surfaces n'est pas non plus un problème purement géométrique, par exemple la détermination des distances de l'axe du cylindre C précédent serait simple à identifier si l'axe était parallèle aux deux plans, ce qui n'est jamais le cas...

Il apparaît que l'identification géométrique d'une pièce mécanique dépasse très largement le problème purement géométrique au sens strict du terme, et a des implications aussi bien en métrologie qu'en conception de pièces mécaniques qu'en élaboration de processus de fabrication. (16,17)

On se propose de résoudre d'une façon la plus générale possible ce problème d'identification géométrique des pièces mécaniques et d'établir un programme général capable de contrôler toute pièce mécanique en trois dimensions.

CHAPITRE II

=====

METHODES ACTUELLES D'IDENTIFICATION D'UNE SURFACE FABRIQUEE

Une pièce mécanique est un assemblage de surfaces élémentaires auxquelles on peut associer des éléments géométriques connus. La cinématique des machines-outils, ainsi que la cinématique des liaisons entre les pièces d'un mécanisme font que dans presque tous les cas, les éléments géométriques utilisés sont : le point, la droite, le plan, le cercle, la sphère, le cylindre et le cône. Dans les autres cas, les éléments géométriques utilisés peuvent toujours être définis par une succession de points et de normales en ces points.

Identifier une pièce mécanique revient à associer à chaque surface fabriquée un élément géométrique connu, à définir les écarts de forme entre surface fabriquée et élément géométrique associé, à caractériser les paramètres de position des éléments géométriques entre eux.

IDENTIFICATION D'UNE SURFACE FABRIQUEE

Quelleque soit la surface, on suit la méthodologie suivante :

La surface fabriquée connue par son ensemble de points palpés

- a) On lie d'une manière arbitraire, mais qu'on espère objective, un élément géométrique à la surface fabriquée.
- b) On définit les écarts de forme par l'ensemble des distances entre l'élément géométrique associé et les points palpés caractérisant la surface fabriquée. Ces distances sont mesurées sur les normales à l'élément géométrique. Le défaut de forme est défini par le supérieur moins l'inférieur de l'ensemble des distances.
- c) La surface fabriquée est alors connue par l'élément géométrique associé dont on connaît tous les paramètres dans un repère orthonormé.

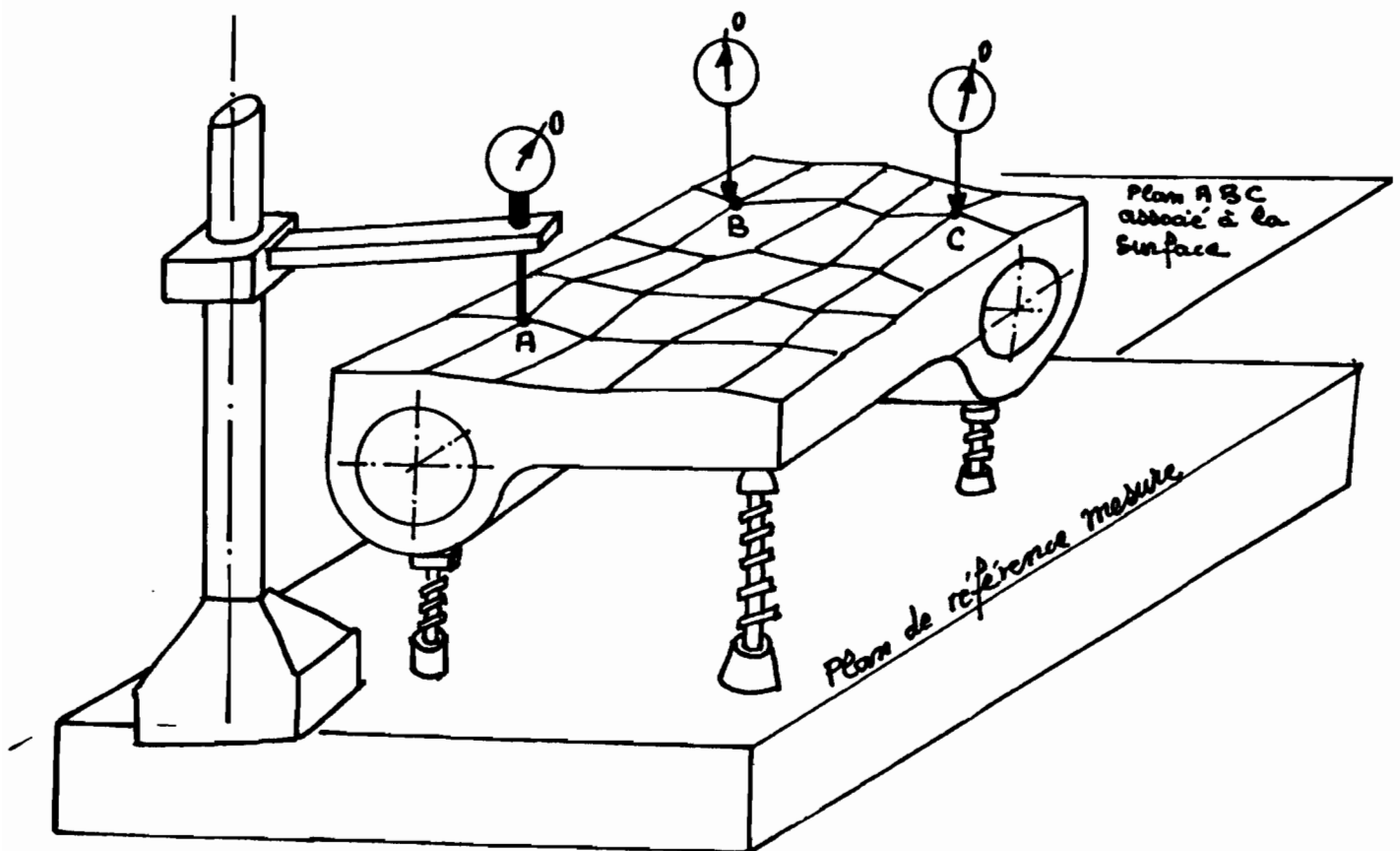
..../....

1. DESCRIPTION ET CRITIQUE DES METHODES DE CONTROLE ET D'IDENTIFICATION D'UNE SURFACE PLANE.

Quatre types de méthodes sont habituellement utilisées suivant que l'opérateur dispose d'un plan de référence (marbre) d'une référence rectiligne, (règle en marbre, règle optique), d'une référence plane théorique (plan horizontal défini par un niveau d'une référence trirectangle (machine à mesurer trois axes).

1°) L'opérateur dispose d'une référence plane matérialisée par un marbre et d'un appareil à une direction de mesure perpendiculaire au plan (comparateur avec cales étalons).

La pièce à contrôler est posée sur trois vérins. La surface fabriquée est ensuite quadrillée, puis par réglages successifs des trois vérins, l'opérateur amène trois points ABC de la surface dans un plan parallèle au plan de mesure (comparateur au zéro).



Les trois points A B C choisis arbitrairement, mais éloignés les uns des autres caractérisent la direction générale de la surface palpée. Après balancement, le plan ABC est parallèle au plan de référence de mesure, il ne reste plus qu'à relever les écarts de forme entre le plan ABC et la surface fabriquée en chaque point du quadrillage.

2°) L'opérateur dispose d'une référence rectiligne (règle en marbre, règle optique) ou d'une référence plane théorique (niveau à bulle ou électronique).

La surface fabriquée étant quadrillée avec ses deux diagonales, la méthode consiste à choisir un plan passant par trois points A,B,C, de la surface, puis par calages successifs de la référence rectiligne et par somme des différences d'altitudes entre les points de mesure, d'exprimer les écarts de formes des points mesurés par rapport au plan de référence ABC.

3°) L'opérateur dispose d'une machine à mesurer trois axes :

a) sans calculateur

L'opérateur procède comme dans le cas 1. La pièce est d'abord balancée pour amener le plan P (défini par trois points ABC de la surface palpée S), parallèle à l'un des trois plans de mesure.

Ce plan P définit la direction générale de la surface, les écarts de forme sont mesurés directement entre P et S, suivant l'axe de mesure perpendiculaire à P.

b) avec calculateur couplé ou non à la machine.

L'opérateur place la pièce sur le marbre de la machine sans précautions particulières. La surface S est ensuite palpée suivant N points.

L'opérateur choisit trois points ABC de la surface, un programme calcule alors le plan P passant par ces trois points ainsi que les écarts de forme entre les points palpés et le plan P associé.

Par programme, on améliore le résultat en cherchant parmi tous les plans P possibles celui qui donne le défaut de forme minimal. Cette méthode de calcul est très longue. Par exemple, une surface palpée en 9 points seulement demande 84 passages du programme et une surface palpée

.../...

en 24 points, 2024 passages soit une durée de calcul sur petit calculateur (HP 98030) de plusieurs minutes voir plusieurs heures. (19600 passages pour 50 points de mesure).

CONCLUSION

Quelle que soit la méthode utilisée, nous pouvons affirmer que la direction générale de la surface, définie par trois points ABC, dépend de l'opérateur, et par suite les écarts de forme, le défaut de forme et la position du plan associé varieront d'un opérateur à un autre.

Dans la plupart des cas le défaut de forme maxi de la surface étant imposé (consigne) l'opérateur cherche par balançages successifs le premier plan P qui donne un défaut de forme inférieur à la consigne.

La surface est alors identifiée le plus souvent par le plan enveloppe, c'est-à-dire le plan parallèle à la direction générale de la surface (Plan P) et touchant celle-ci sans la couper du côté libre de la matière (10).

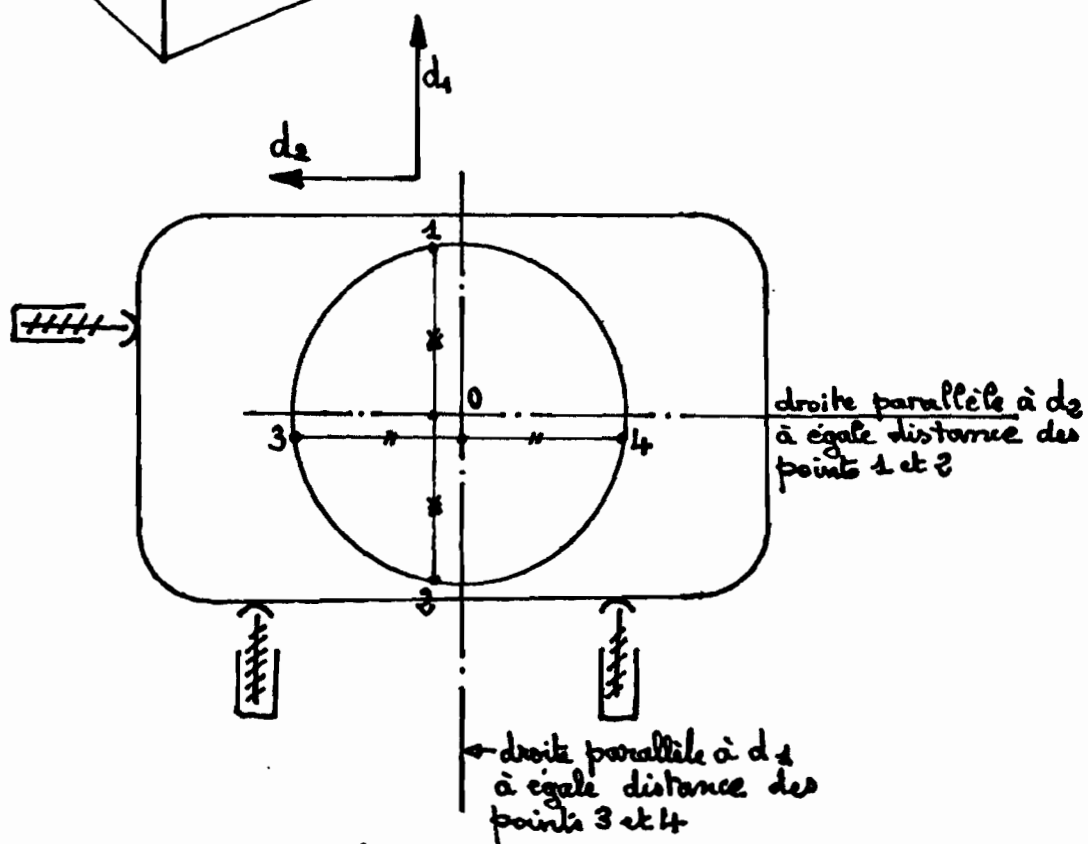
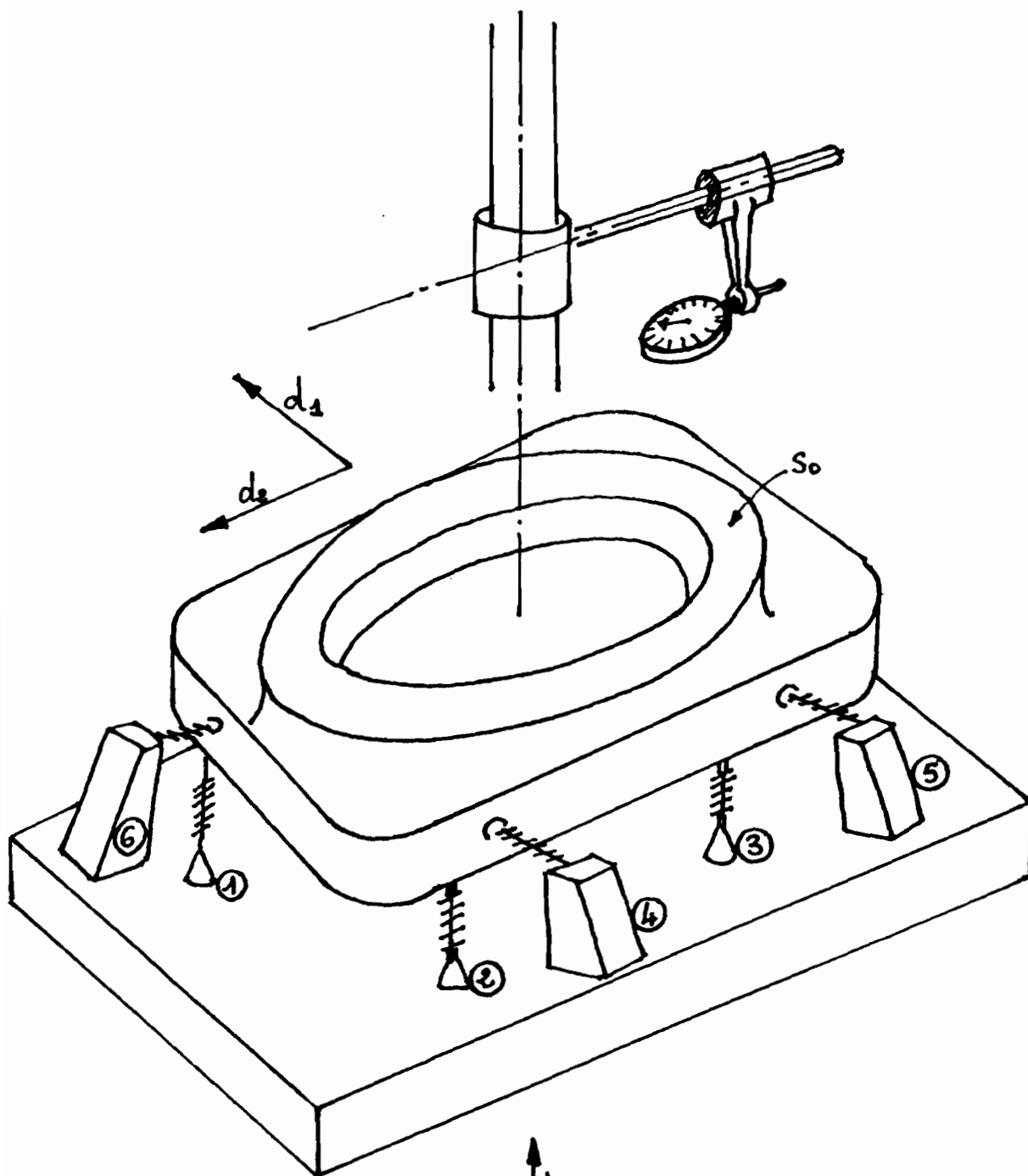
II. DESCRIPTION ET CRITIQUE DES METHODES DE CONTROLE D'UNE SURFACE FABRIQUEE IDENTIFIEE PAR UN CERCLE

1°) L'opérateur dispose d'une broche où d'un plateau tournant définissant un axe de rotation stable, et d'une direction de mesure perpendiculaire à l'axe de rotation. (11)

L'opérateur balance la pièce, afin que le plan P contenant la ligne à palper, soit perpendiculaire à l'axe de mesure. Pour cela on fait l'hypothèse que la surface S_0 est parallèle à P, on rend donc le plan défini par trois points ABC de la surface S, perpendiculaire à l'axe de mesure par action sur les vérins V1, V2 et V3.

Un cercle associé à la ligne est alors défini par son centre O obtenu par balançages successifs de la ligne fabriquée suivant les deux directions arbitraires d1, et d2, tels que l'on ait $O1 = O2$ et $O3 = O4$;

.../....

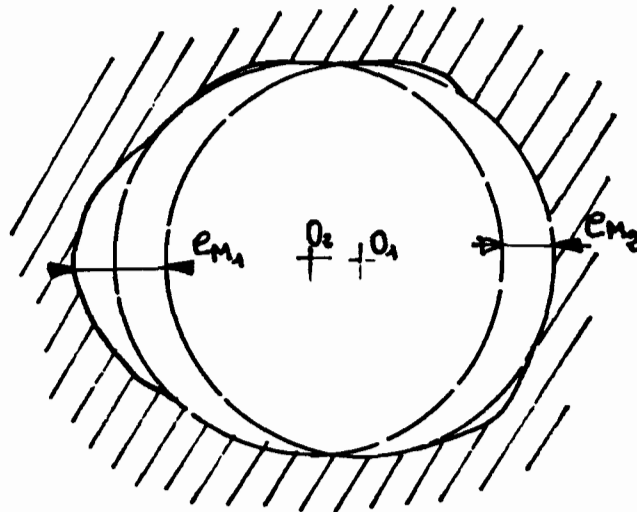


L'opérateur relève alors directement sur le comparateur les écarts entre la surface fabriquée et le cercle associé, et définit ainsi le défaut de circularité.

On peut améliorer le résultat en reportant sur un graphique en coordonnées polaires les écarts relevés et obtenir une image de la forme fabriquée. L'opérateur définit un cercle enveloppe, comme étant celui des cercles touchant la pièce sans la couper du côté libre de la matière et dont le diamètre est le plus petit ou le plus grand possible, (suivant que la ligne appartient à une surface intérieure ou extérieure [10]).

Le défaut de circularité est défini par la plus grande distance radiale admissible entre tout point de la ligne considérée et son cercle enveloppe.

En pratique, on rencontre des difficultés pour déterminer le cercle enveloppe, et l'on remarque qu'il n'y a pas unicité dans la solution, plusieurs cercles de même diamètre peuvent répondre à la définition du cercle enveloppe.



2°) L'opérateur dispose d'une machine à mesurer trois axes :

a) sans calculateur

L'opérateur procède comme dans le cas précédent. Le plan ABC est balancé parallèle à un des plans de mesure (x, y par exemple), les directions d_1 et d_2 sont les deux directions de mesure (x, y) de la machine, les points 1, 2, 3, 4 sont alors quatre points de rebroussements. Comme précédemment, l'origine o du cercle de mesure ainsi défini permet de calculer les écarts de forme :

.../...

b) avec calculateur :

Le calculateur apporte une aide à deux niveaux :

1° - suppression de balancement : la direction du plan P de mesure est calculée après palpée des trois points ABC.

Les points de mesure du cercle sont alors projetés sur le plan P

2° - Calcul du cercle enveloppe.

A toute combinaison de trois points mesurés, on fait passer un cercle, et l'on définit les écarts de forme. Parmi tous les cercles trouvés, on détermine la ligne fabriquée intérieure (ou extérieure) par le plus grand (ou le plus petit) cercle touchant la pièce sans la couper du côté libre de la matière (10). Cette méthode de calcul est très longue, une ligne définie par huit points, demande 56 passages du programme. Dans le cas du Talyrond où la ligne fabriquée peut être définie par plusieurs milliers de points, la résolution deviendrait impossible sans la réalisation d'un calculateur conçu spécialement pour traiter le problème (9).

CONCLUSION

Le cercle associé à la ligne fabriquée est presque dans tous les cas choisi arbitrairement, le défaut de circularité, la position du centre O et le rayon R sont alors fonction de l'opérateur. Dans le cas où l'on dispose d'un calculateur, la méthode de calcul est longue et le plus souvent on se satisfait d'une méthode graphique qui de nouveau, laisse une part d'aléas due à la méthode visuelle de détermination du cercle enveloppe.

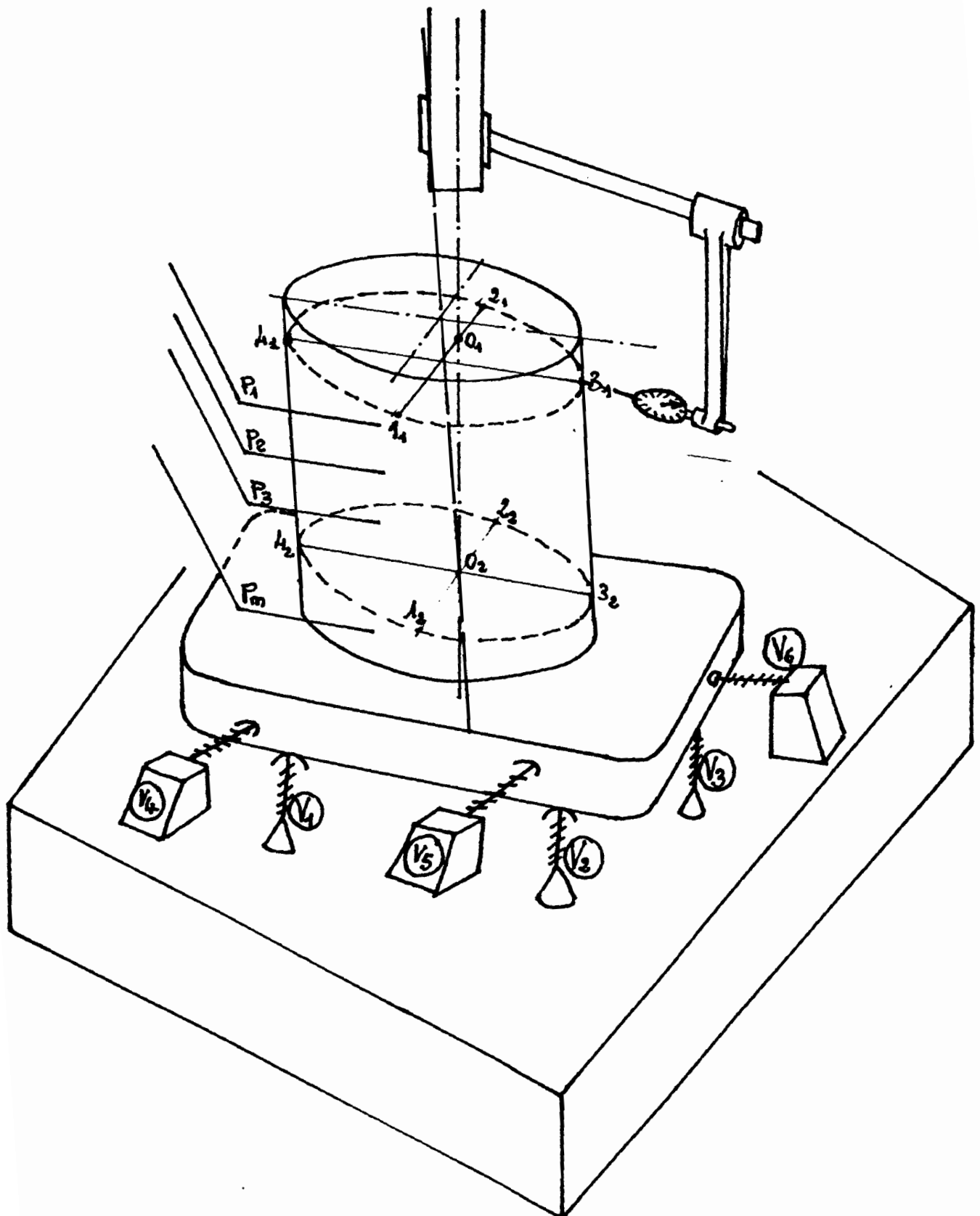
III. DESCRIPTION ET CRITIQUE DES METHODES DE CONTROLE D'UNE SURFACE FABRIQUEE CYLINDRIQUE.

1°) L'opérateur dispose d'une broche ou d'un plateau tournant définissant un axe de rotation stable, et d'une direction de mesure perpendiculaire à l'axe mesuré

La surface fabriquée cylindrique est "balancée" afin que son axe soit confondu avec l'axe de mesure. Les trois vérins 1, 2, 3 définissent l'orientation de l'axe, les trois vérins 4, 5, 6 font coïncider par translation les deux axes si le plan d'appui A1 est perpendiculaire à l'axe.

.../...

Cette opération de balancement très longue à mettre en oeuvre est menée le plus souvent, de la manière décrite ci-dessous :



Dans deux plans P_1 et P_n choisis, les plus éloignés possibles et perpendiculaires à l'axe de mesure, on définit par balancement deux cercles de centre O_1 et O_2 . Pour cela, on se sert de la méthode utilisée dans le cas du cercle.

Les écarts de forme sont alors mesurés directement entre la surface fabriquée et le cylindre de mesure défini par l'axe $O_1 O_2$, et par un zéro mesure au point I_1 par exemple.

Si l'opérateur en reste là, il identifie la surface fabriquée par le cylindre d'axe $O_1 O_2$. Le défaut de forme, le rayon et la position de l'axe du cylindre dépendent uniquement du choix arbitraire des huit points définissant les centres O_1 et O_2 .

Pour améliorer le résultat, l'opérateur devrait identifier la surface fabriquée par le cylindre enveloppe, ce dernier étant celui des cylindres touchant la surface fabriquée sans la couper du côté libre de la matière et dont le diamètre est le plus petit possible ou le plus grand possible (suivant qu'il s'agit d'une surface extérieure ou intérieure (10)).

On remarque, que pour une même surface, plusieurs cylindres enveloppes de même diamètre, peuvent répondre à la définition, et que la recherche d'un cylindre enveloppe est très difficile (voire impossible) dans l'espace.

En conclusion, le "balancement" de la pièce à contrôler, est imprécis, le cylindre enveloppe est pratiquement impossible à définir, le défaut de cylindricité dépend de l'habileté de l'opérateur.

On peut améliorer la méthode en utilisant un calculateur spécialisé dans le contrôle des cercles (9).

Le cylindre fabriqué est "balancé" afin que son axe soit approximativement confondu avec l'axe de mesure. Cette opération de balancement ne peut être qu'arbitraire car l'axe du cylindre fabriqué ne sera connu que la métrologie terminée.

L'opérateur effectue alors des relevés de circularité dans les plans $P_1 P_2 \dots P_n$ perpendiculaires à l'axe de mesure. Par calcul, on cherche les centres $O_1 O_2 \dots O_n$ des cercles associés aux différentes lignes relevées dans les plans. L'axe du cylindre associé à la surface est alors défini comme étant la droite passant au mieux des n centres $O_1 O_2 \dots O_n$, on calcule ensuite les écarts ϵ_i de forme en cherchant les nouvelles distances des

.../...

points mesurés à l'axe. Le rayon du cylindre est alors défini par le supérieur ou l'inférieur ou la moyenne des distances ainsi trouvées.

2°) L'opérateur dispose d'une machine à mesurer trois axes.

Dans le cas où la machine à mesurer n'est pas couplée à un calculateur, l'opérateur suit un mode opératoire identique à celui défini précédemment. Si la machine à mesurer est couplée à un calculateur, le cylindre fabriqué peut être balancé par le calcul (matrice de rotation sur les points palpés) la direction de l'axe de celui-ci est définie par un plan de la pièce palpé en trois points.

Dans les deux cas, les résultats dépendent donc de la direction donnée à l'axe du cylindre, celle-ci est arbitraire car elle dépend soit du balancement soit des trois points palpés sur le plan supposé perpendiculaire à l'axe du cylindre.

IV. CONTROLE D'UNE SURFACE COMPLEXE, (AILETTE DE TURBINE , DE FILTAGE DE DENTS D'ENGRENAGE (5), FUSELAGE, FERRURE DE REACTEUR (1) etc...)

Il n'existe aucune méthode générale capable à coup sûr de donner le résultat optimal. Chaque praticien utilise "sa" méthode plus ou moins empirique. Les différentes méthodes sont en général basées sur l'emploi d'un gabarit ou d'un projecteur de profil, ou d'une batterie de comparateurs ou d'une machine à mesurer.

Dans tous les cas, on trouve le mode opératoire suivant : la surface théorique est connue par un ensemble de points et de normales définis dans un repère orthonormé. On admet un écart maxi entre les points de la surface fabriquée et de la surface théorique.

L'opérateur place la surface fabriquée dans le repère de mesure et par balancements successifs essaie de trouver une position telle que tous les écarts mesurés soient inférieurs à l'écart maxi. Malgré l'habileté de l'opérateur, cette opération peut être très longue et dans certains cas (1) ne jamais aboutir.

CHAPITRE III

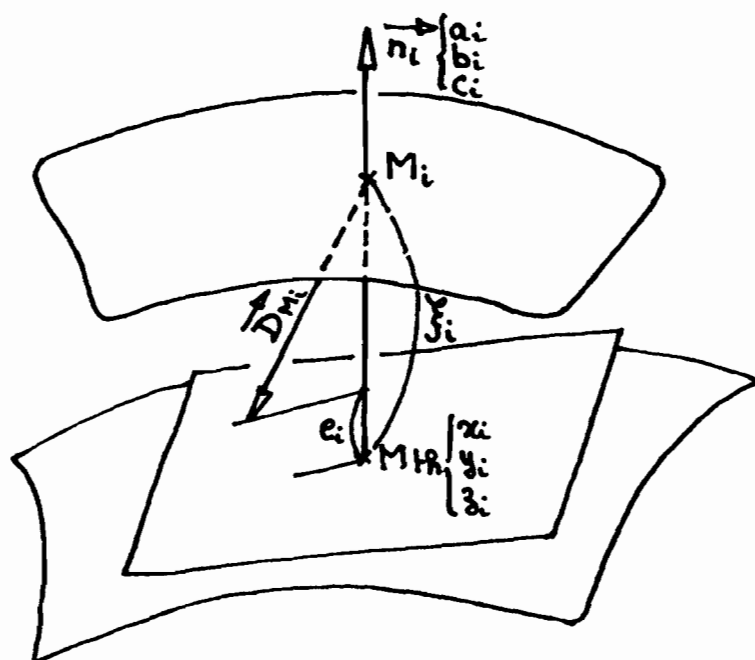
NOUVELLE METHODE D'IDENTIFICATION D'UNE SURFACE (20)

Dans les exemples de métrologie analysés précédemment, nous avons vu que l'imprécision et la non répétitivité du résultat venait du choix arbitraire de la direction générale de la surface. Il en est de même dans le contrôle de surfaces quelconques où ce problème général se trouve posé avec plus d'acuité encore.

C'est pourquoi, nous nous proposons de déterminer, sans balançage manuel précis (rapidité) la coïncidence optimale (objectivité et précision) entre la surface fabriquée et la surface de définition.

La définition théorique d'une surface fabriquée n'est pas donnée nécessairement par son équation, mais dans tous les cas elle peut être ramenée à un tableau $(x_i, y_i, z_i, a_i, b_i, c_i)$ des coordonnées x_i, y_i, z_i de n points théoriques et des cosinus directeurs a_i, b_i, c_i , des normales à la surface, correspondantes.

En un point de définition M_{th} de coordonnées x_i, y_i, z_i la normale n_i à la surface théorique coupe la surface fabriquée en M_i .



Désignons par $[\tau_A] \left\{ \frac{\vec{\Omega}}{\vec{D}_A} \right\}$ le torseur des déplacements très petits, qui doit permettre de faire passer la surface fabriquée de la position actuelle à une position telle, qu'elle coïncide d'une manière significative avec la surface de définition.

La surface fabriquée n'est jamais superposable à la surface théorique, c'est-à-dire que le point M_i ne vient pas nécessairement en M_{th} (ceci n'est possible que pour un nombre de points $P_i \leq 6$ comme nous l'avons vu dans les méthodes classiques). On minimise les écarts de superposition en donnant un déplacement $\vec{D}$ tel que la position finale de M_i soit globalement le plus près possible du plan tangent en M_{th} .

Ce qu'on peut écrire algébriquement :

$$(1) \quad \vec{f}_i - \vec{D}_{M_i} \cdot \vec{n}_i = e_i$$

Le champ de déplacements infiniment petits, étant un champ de moment on a à partir d'un point de référence A :

$$\vec{D}_{M_i} = \vec{D}_A + \vec{M_i A} \wedge \vec{\Omega}$$

L'équation (1) devient :

$$\vec{f}_i - (\vec{D}_A \cdot \vec{n}_i + (\vec{M_i A} \wedge \vec{\Omega}) \cdot \vec{n}_i) = e_i$$

$$\vec{f}_i - (\vec{D}_A \cdot \vec{n}_i + (\vec{A_i M_i} \wedge \vec{n}_i) \cdot \vec{\Omega}) = e_i$$

Sous cette forme, la parenthèse de l'équation représente le comoment du torseur déplacement $[\tau_A] \left\{ \frac{\vec{\Omega}}{\vec{D}_A} \right\}$ et du torseur des coordonnées plückériennes du vecteur $\vec{n}_i$ $[\mathcal{P}_i] \left\{ \frac{\vec{n}_i}{\vec{A M_i} \wedge \vec{n}_i} \right\}$

soit sous forme condensée $\vec{f}_i - [\mathcal{P}_i] \cdot [\tau_A] = e_i$

On écrit une relation analogue pour chaque point de mesure. On obtient un système de n équations linéaires pour 6 inconnues ($\alpha, \beta, \gamma, u, v, w$) les 6 composantes du torseur déplacement.

Si le nombre de points définissant la surface était uniquement de 6 (cas général) et judicieusement choisi, on obtiendrait un système de 6 équations linéaires indépendantes et on aurait une solution avec : $e_1 = e_2 = e_3 = e_4 = e_5 = e_6 = 0$, c'est-à-dire une superposition des

6 points fabriqués aux 6 points de définition. Mais 6 points de mesure sont insuffisants pour donner l'image de la forme de la pièce, et dans tous les cas, nous aurons un nombre de points très supérieur à 6.

On emploie alors la méthode de résolution de GAUSS en formant la fonction

W constituée par la somme des e_i^2

soit

$$W = \sum_{i=1}^n (Y_i - [F_i] \cdot [Z_i])^2$$

Cette fonction W doit être minimum pour que la solution vérifie au mieux le système de n équations. On obtient dans le cas général, un système de 6 équations en écrivant que :

$$\begin{array}{ccc} \frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0 & \frac{\partial W}{\partial \beta} = 0 & \frac{\partial W}{\partial \gamma} = 0 \\ \frac{\partial W}{\partial u} = 0 & \frac{\partial W}{\partial v} = 0 & \frac{\partial W}{\partial w} = 0 \end{array}$$

Ce système est évidemment linéaire et la résolution donne un torseur déplacement $(\alpha, \beta, \gamma, u, v, w)$ que nous appellerons le déplacement significatif et qui correspond au balancement optimal de la pièce.

L'exploitation des résultats est immédiate :

- par le calcul on fait subir aux points mesurés le déplacement significatif et l'on détermine la nouvelle distance e_i au plan tangent, c'est-à-dire des écarts entre la surface de définition et la surface fabriquée.

Il est clair que cette méthode s'applique quelle que soit la forme de la surface à contrôler. En effet, la surface étant définie uniquement par des points et des normales, on est toujours ramené aux mêmes équations linéaires.

MISE EN EQUATION DETAILLEE DANS LE CAS D'UNE SURFACE DE RANG 6

En tout point I de la surface correspond un point théorique de coordonnée x_i, y_i, z_i , une normale théorique n_i définie par ses cosinus directeurs a_i, b_i et c_i ; un écart $\sum_i$ mesuré suivant la normale.

Appelons $[\mathcal{T}_A] \begin{Bmatrix} \alpha \vec{x} \\ \beta \vec{y} \\ \gamma \vec{z} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u \vec{x} \\ v \vec{y} \\ w \vec{z} \end{Bmatrix}$ le torseur des petits déplacements, ou encore le torseur caractérisant les écarts entre la surface théorique et la surface fabriquée.

Le torseur des coordonnées Plückériennes du vecteur $\vec{n}_i$ a pour expression

$$[\mathcal{P}_i] \begin{Bmatrix} a_i \vec{x} \\ b_i \vec{y} \\ c_i \vec{z} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} (y_i a_i - z_i b_i) \vec{x} \\ (z_i a_i - x_i c_i) \vec{y} \\ (x_i b_i - y_i c_i) \vec{z} \end{Bmatrix}$$

Exprimons que

$$\vec{e}_i - [\mathcal{P}_i][\mathcal{T}_A] = e_i$$

soit en posant

$$L_i = y_i a_i - z_i b_i$$

$$M_i = z_i a_i - x_i c_i$$

$$N_i = x_i b_i - y_i c_i$$

Formons la fonction $W = \sum e_i^2$

$$W = \sum_{i=1}^n \left[\vec{e}_i - (u a_i + v b_i + w c_i + \alpha L_i + \beta M_i + \gamma N_i) \right]^2$$

et écrivons sous forme matricielle le système de 6 équations linéaires obtenues en écrivant que :

$$\frac{\partial W}{\partial u} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial v} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial w} = 0$$

$$\frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial \beta} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial \gamma} = 0$$

$$\begin{vmatrix} \sum a_i^2 & \sum b_i a_i & \sum c_i a_i & \sum L_i a_i & \sum M_i a_i & \sum N_i a_i \\ \sum a_i b_i & \sum b_i^2 & \sum c_i b_i & \sum L_i b_i & \sum M_i b_i & \sum N_i b_i \\ \sum a_i c_i & \sum b_i c_i & \sum c_i^2 & \sum L_i c_i & \sum M_i c_i & \sum N_i c_i \\ \sum a_i L_i & \sum b_i L_i & \sum c_i L_i & \sum L_i^2 & \sum M_i L_i & \sum N_i L_i \\ \sum a_i M_i & \sum b_i M_i & \sum c_i M_i & \sum L_i M_i & \sum M_i^2 & \sum N_i M_i \\ \sum a_i N_i & \sum b_i N_i & \sum c_i N_i & \sum L_i N_i & \sum M_i N_i & \sum N_i^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u \\ v \\ w \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum a_i \vec{e}_i \\ \sum b_i \vec{e}_i \\ \sum c_i \vec{e}_i \\ \sum L_i \vec{e}_i \\ \sum M_i \vec{e}_i \\ \sum N_i \vec{e}_i \end{vmatrix}$$

Si la surface est de rang 6, la résolution du système d'équations donne les valeurs de $\alpha, \beta, \gamma, u, v, w$. Elles caractérisent la position de la surface réelle par rapport à la surface théorique et permettent de calculer les écarts optimisés par la formule :

$$e_i = \xi_i - (u a_i + v b_i + w c_i + \alpha L_i + \beta M_i + \gamma N_i)$$

APPLICATION : CONTROLE D'UNE FERRURE DE REACTEUR A L'AIDE
DU PROGRAMME C.U.R.F.

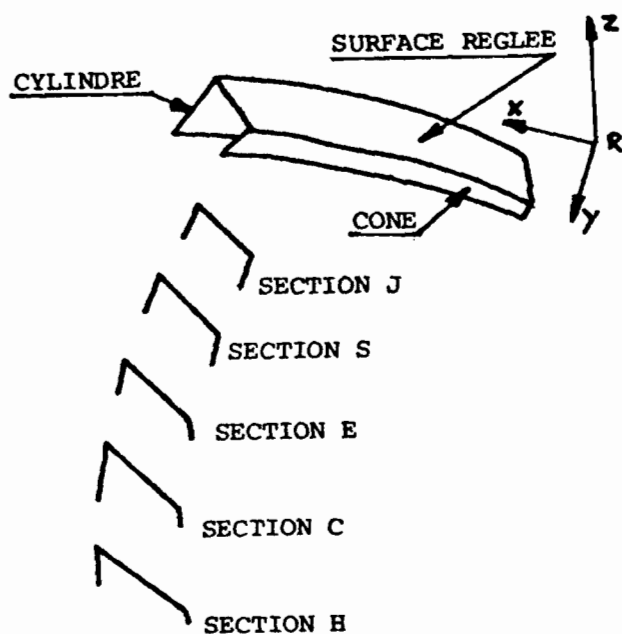
La surface est définie dans le repère xyz, par un ensemble de points et de normales en ces points. Usinée sur une fraiseuse par copiage d'un modèle, la pièce est bridée sur la machine-outil par deux pattes à ses extrémités. Après usinage, celles-ci sont sciées. La matière étant difficilement usinable et très déformable, on est obligé de vérifier si la pièce terminée répond toujours aux spécifications du dessin.

La pièce est placée sur des appuis réglables. L'opérateur a essayé pendant 8 heures de faire coïncider les points mesurés aux points théoriques avec un écart maxi de $\pm 0,3$. Malgré son expérience et son habilité, certains écarts sont restés de l'ordre de 2,3mm. En conclusion de métrologie, la pièce est hors-tolérance et non conforme aux spécifications du dessin.

En appliquant la méthode proposée, on trouve une position optimale définie par les 6 petits déplacements $u, v, w, \alpha, \beta, \gamma$ et l'on trouve tous les écarts inférieurs à la tolérance imposée. La pièce est déclarée bonne.

Cet exemple illustre bien tout le problème du contrôle ; existe-t-il une position de la surface réelle par rapport à la surface de définition telle que tous les écarts entre les deux surfaces soient inférieurs à une borne donnée ? Si la réponse est affirmative, la pièce est déclarée bonne, dans le cas contraire, elle est déclarée hors-tolérance.

CONTROLE D'UNE FERRURE DE REACTEUR :(1)



N°	Définition théorique de la pièce			Ecart mesuré après balancement manuel de la pièce $\bar{f}_i$	Ecart optimisé par le calcul $\bar{e}_i$
	$\vec{x}$	$\vec{y}$	$\vec{z}$		
4	-77.389	76.189	0.	2.200	0.000
5	-32.129	0.0	-38.099	1.400	-0.202
6	-73.709	0.0	0.	2.290	0.150
7	-32.250	12.699	-38.099	1.490	-0.256
8	-73.809	12.699	0.0	2.360	0.054
9	32.639	25.399	-38.099	1.490	-0.332
10	-74.129	25.399	0.0	2.290	0.048
11	-34.159	50.799	-38.089	1.520	-0.268
12	-75.369	50.799	0.0	2.220	0.006
13	-36.659	76.199	-38.099	1.500	-0.210
24	-66.399	228.599	-38.109	1.170	0.277
25	-29.219	254.000	-38.899	0.580	0.271
26	-61.459	254.000	-50.799	1.020	0.204
27	-27.189	279.399	-101.599	0.400	0.247
28	57.459	279.399	-63.500	0.760	0.211
30	-54.259	304.799	76.199	0.610	0.028
31	-25.619	330.199	-127.000	0.310	0.311
32	-51.699	330.199	-88.899	0.650	0.045
33	-18.309	355.599	-152.399	0.230	0.098
40	-28.469	419.099	-165.099	-0.019	0.008
41	-48.239	419.099	-127.000	0.130	0.241
42	-43.549	431.799	-139.699	-0.009	0.092
43	-14.379	406.409	-190.500	-0.039	0.065
62	-91.989	-177.809	0.000	2.440	-0.321
63	-60.319	-203.199	-38.099	1.820	-0.172
71	-54.259	-304.799	-76.199	1.250	-0.037
73	-51.699	330.199	-127.000	0.080	-0.219
74	-18.309	-355.599	-152.399	0.42	-0.149

CHAPITRE IV

IDENTIFICATION TRIDIMENSIONNELLE CLASSIQUE D'UNE PIÈCE MECANIQUE

4.1. METROLOGIE CLASSIQUE AU MARBRE

Prenons l'exemple du carter défini par le plan Ann.III et la vue en perspective Page 21. Cette pièce est de forme simple, car à l'exception des surfaces P_5 , C_6 elle est formée de surfaces planes ou cylindriques de directions perpendiculaires ou parallèles entre elles.

Les instruments de mesure (essentiellement : cales étalons, comparateur avec support, cylindre étalon à génératrices perpendiculaires au marbre) ont une seule direction de mesure perpendiculaire au marbre.

La pièce possède 3 directions de mesures (I, II, III).

Par balancages de la pièce, l'opérateur fera coïncider successivement, les trois axes du repère lié à la pièce avec l'axe de mesure. Suivant chaque direction, on définit les altitudes de points particuliers comme les points de rebroussement des cylindres cercles ou sphères, les points extrêmes des surfaces planes.

Tous les calculs se font dans le repère pièce obtenu par des balancages successifs.

On remarque deux sources d'imprécisions dans les résultats :

1°) Le référentiel lié à la pièce est défini par des points particuliers appartenant à des surfaces choisies arbitrairement.

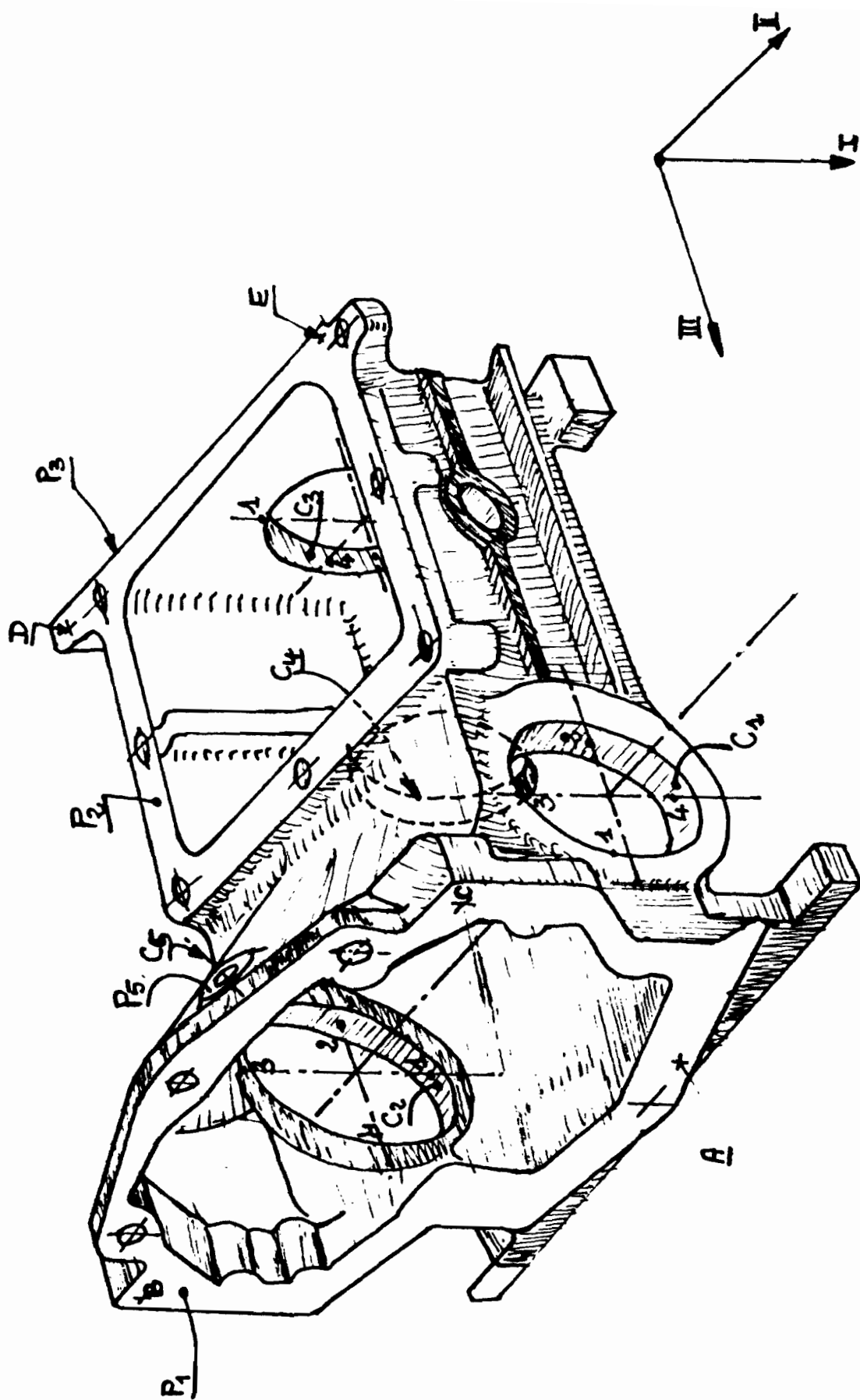
Par exemple :

les trois points A B C appartenant au plan P_2 définissent la direction III

Deux points (D,E) appartenant à P_3 définissent la direction $\vec{T}$ dans un plan parallèle à P_1 , origine des mesures le point E.

Le troisième axe a pour direction $\vec{II} = \vec{T} \wedge \vec{III}$ origine des mesures le point 3 du cercle C_3 .

Le choix et la matérialisation du référentiel de mesure est laissé à l'initiative de l'opérateur. Il existe donc un grand nombre de systèmes d'axes possibles. La qualité d'un système d'axes et par suite des mesures et des calculs est fonction de la qualité des différents balancages de la pièce. (habileté de l'opérateur).



2°) Les surfaces sont identifiées par des points particuliers définis par le système d'axes associés, donc variables d'un opérateur à un autre. D'autre part, ces points peuvent être des points aberrants de la surface.

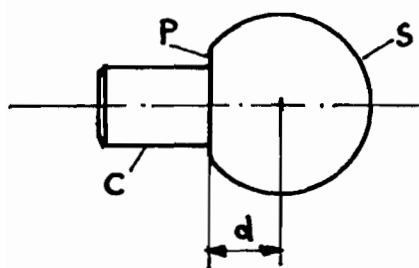
L'opérateur, pour chaque direction, note les différentes mesures appartenant à chaque surface.

		$\vec{I}$	$\vec{II}$	$\vec{III}$
<u>PLAN 1</u>		_____	_____	_____
<u>PLAN 2</u>	points D	0	_____	_____
	points E	0	_____	_____
	points 3	0,15	_____	_____
<u>PLAN 3</u>	points 1	_____	_____	332,789
	points 2	_____	_____	332,789
	points 3	_____	_____	337,789
<u>CERCLE I</u>	point 1	_____	_____	16,209
	point 2	_____	_____	119,529
	point 3	43,206	_____	_____
	point 4	146,546	_____	_____
	<u>centre</u>	suivant $\vec{I}$: 94,876	suivant $\vec{III}$: 67,869	
	<u>rayon</u> 51,660			
<u>CERCLE 2</u>	point 1	_____	_____	16,242
	point 2	_____	_____	119,412
	point 3	43,49	_____	_____
	point 4	146,657	_____	_____
	<u>centre</u>	suivant $\vec{I}$: 95,074	suivant $\vec{III}$: 59,706	
	<u>rayon</u> 51,584			
<u>CERCLE 3</u>	point 1	62,007	_____	_____
	point 2	140,006	_____	_____
	point 3	_____	0	_____
	point 4	_____	78	_____
	<u>cercle</u>	suivant $\vec{I}$: 101,007	0	suivant $\vec{II}$: 39
	<u>rayon</u> 39,000			

CERCLE 4 point 1
 point 2
 point 3
 point 4
origine
rayon

On remarque que les cercles ou les cylindres sont palpés par 4 ou 8 points dans des plans perpendiculaires aux axes du référentiel I II III lié à la pièce, et non suivant la direction réelle de la surface. Par exemple, les cercles C_3 et C_4 sont dans des plans théoriques parallèles au plan P_3 et sont palpés suivant des plans parallèles à P_1 .

Dans le cas du plan P_5 et du cylindre C_5 on associe à cet ensemble un montage constitué d'une sphère S d'un plan P et d'un cylindre C . La distance d étant connue.



Lorsque cet accessoire est monté sur la pièce, la position du centre de la sphère S permet de vérifier si les dimensions non accessibles à la mesure sont dans certaines tolérances.

SPHERE point 1
 point 2
 point 3
 point 4
 point 5
centre
rayon

$\vec{I}$

$\vec{II}$

$\vec{III}$

A partir de toutes ces valeurs l'opérateur calcule alors les distances, les angles, les intersections etc ... et vérifie s'ils sont dans les tolérances imposées par un dessin de définition. Cette métrologie nécessite 18 Heures de travail, beaucoup d'ingéniosité pour un résultat qui est souvent remis en cause du fait des sources d'imprécisions.

4.2 METROLOGIE SUR MACHINE A MESURER TROIS AXES

La machine à mesurer remplace les nombreux instruments de mesure. La pièce est balancée pour faire coïncider le repère-pièce au repère-machine. Suivant les accessibilités du palpeur sur la pièce, le nombre de balances se trouve réduit. Si dans un repère-pièce mieux défini la précision des mesures est améliorée, on conserve les mêmes méthodes de détermination des paramètres des surfaces et par suite on favorise arbitrairement certains points de la pièce.

4.3. METROLOGIE SUR MACHINE A MESURER ASSOCIEE A UN CALCULATEUR

L'utilisation du calculateur permet de supprimer les balançages physiques de la pièce. Par palpage de quelques points privilégiés (et toujours les mêmes), on définit un repère pièce dans le repère de la machine à mesurer. On détermine ainsi les trois translations et la matrice de rotation qui permettent d'exprimer tout point palpé dans le repère-pièce.

La plupart des machines actuelles possède un programme de balancement plan, c'est-à-dire dans des plans parallèles aux plans de définition de la machine. Une assistance est également apportée dans les calculs de distances, angles, milieu de deux éléments etc.....

REMARQUES

Les balançages mathématiques de la pièce sont basés sur les mêmes méthodes que les balançages physiques précédents, c'est-à-dire qu'ils favorisent certains points arbitrairement choisis sur les surfaces.

Les méthodes de détermination des paramètres des surfaces restent les mêmes et sont toujours l'occasion de source d'erreurs et d'imprécisions.

4.4 CONCLUSION SUR LES METHODES ACTUELLES

Quelle que soit la méthode utilisée, chaque surface est modélisée par un élément géométrique passant par des points privilégiés des surfaces palpées. D'autre part, le référentiel de mesure lié à la pièce est fonction de points particuliers choisis arbitrairement sur les surfaces. A tout balancement correspond des résultats différents, voire aberrants dans le cas où les points palpés sont eux mêmes des points aberrants des surfaces fabriquées.

CHAPITRE V

=====

NOUVELLE METHODE D'IDENTIFICATION TRIDIMENSIONNELLE D'UNE PIECE MECANIQUE

A - CETTE NOUVELLE METHODE REpond AUX IMPERATIFS SUIVANTS :

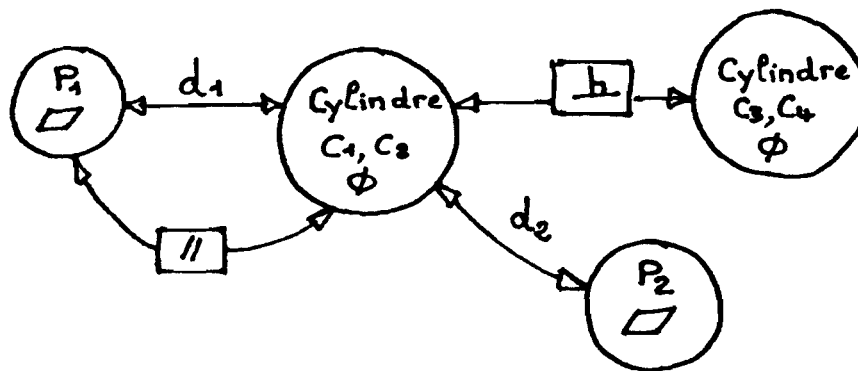
- 1°) être indépendante de tout balancement de la pièce aussi bien physique que par le calcul. Toutes les surfaces seront définies dans le repère machine à mesurer.
- 2°) palper chaque surface en un nombre quelconque de points ; le calcul ne devant pas imposer aux points des positions particulières sur les surfaces.
- 3°) les surfaces peuvent être disposées d'une manière quelconque dans l'espace.
- 4°) contrôler dans l'espace toute spécification géométrique portée sur un dessin.
- 5°) l'écriture de la gamme de métrologie doit être une transcription simple du dessin de définition. L'agencement des programmes et des ordres de mesures doivent être automatiques.
- 6°) Toutes les possibilités propres à l'informatique et à la technologie des MMT (enregistrement de gammes, écriture des résultats, apprentissage et exécution automatique de la mesure dans le cas d'une CNC etc..) doivent être utilisées.
- 7°) obtenir une fidélité des résultats indépendante de l'opérateur.
- 8°) Réduire les temps de calcul à moins de 30 secondes par opération de métrologie.

.../...

B - PREMIERE SOLUTION :

Si on désire contrôler les spécifications relatives au cylindre formé par les deux surfaces C_1 et C_2 - Fig. page 21.

On a le graphe des spécifications suivant :



Une première méthode consiste à définir un modèle caractérisé par les positions nominales des surfaces $P_1, (C_1, C_2), P_2, (C_3, C_4)$ et à chercher par la méthode générale décrite page 14, la position optimale du modèle par rapport à l'ensemble des 4 surfaces fabriquées connues par les points palpés.

On calcule ensuite les écarts entre les points palpés et le modèle.

On remarque immédiatement :

a) que les défauts intrinsèques à chaque surface (défaut de forme et diamètre) sont influencés, donc augmentés par les écarts des autres surfaces. Le risque de rebut est plus important.

b) que le calcul, à partir des spécifications liant les surfaces deux à deux ($d_1, d_2, \parallel, \perp$), des écarts maxi à ne pas dépasser sur chaque couple de surfaces, est difficile à maîtriser et diminue les tolérances admissibles.

C. SOLUTION RETENUE :

La pièce étant placée d'une manière quelconque dans le repère de la machine à mesurer, chaque surface est palpée en N points par un palpeur de forme sphérique.

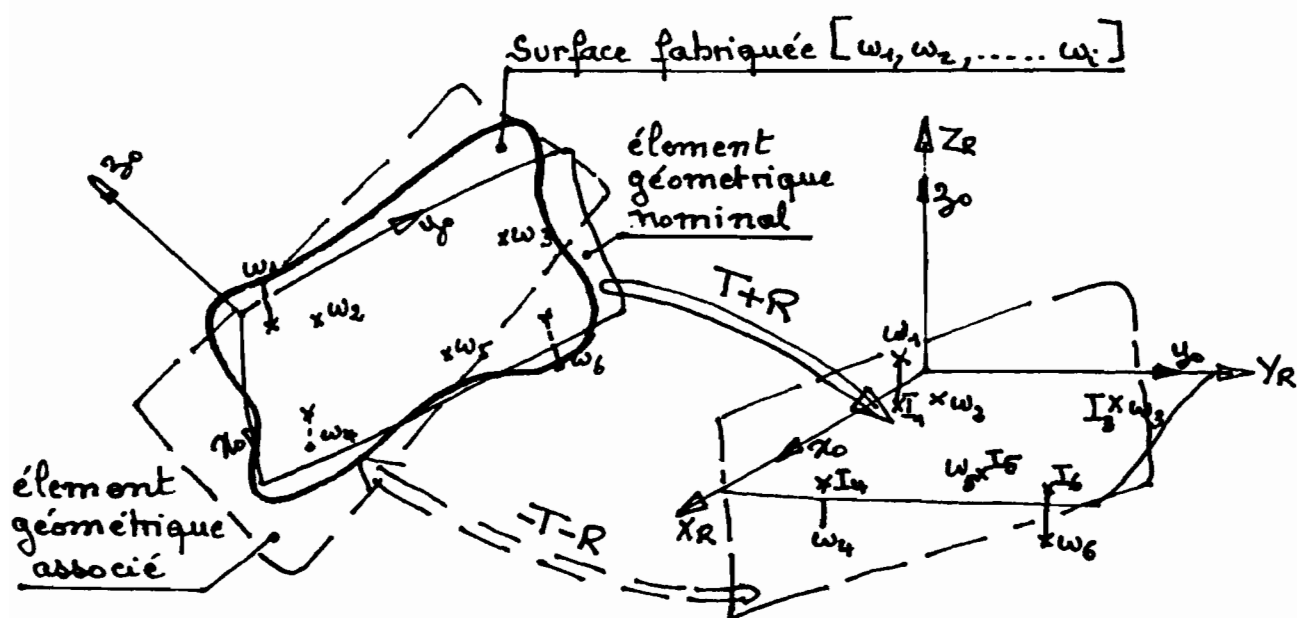
.../...

Chaque surface est connue par les sens d'accostages du palpeur sur la surface et par les N coordonnées w_i du centre de la sphère de palpation correspondant aux N palpations.

Tous les calculs se font directement dans le repère de mesure de la machine à mesurer.

La nature des éléments géométriques à associer à chaque surface étant connue, on procède de la façon suivante :

a) par un nombre minimum de points de mesure w_i correspondant à la surface fabriquée, on fait passer un élément géométrique nominal.



b) De cet élément géométrique nominal, on définit une translation et une matrice de rotation pour amener les axes d'un repère lié à l'élément géométrique nominal confondu avec les axes de mesure de la machine à mesurer.

c) On fait subir à tous les points palpés w_i correspondant à la surface, la translation et la matrice de rotation.

d) On définit pour chaque point palpé w_i , la normale $\vec{n}_i$ et le point I correspondant à l'élément géométrique nominal, et l'écart f_i entre le point mesuré w_i et le point I

.../...

- e) Par la méthode générale décrite page 14, on optimise le petit déplacement nécessaire pour faire coïncider aux mieux les points appartenant à l'élément géométrique nominal I aux points mesurés w_i .
- f) On fait subir à quelques points de l'élément géométrique nominal le petit déplacement. Les nouveaux points ainsi trouvés définissent l'élément géométrique associé à la surface fabriquée.
- g) On fait subir aux points de l'élément géométrique associé la matrice de rotation inverse et la translation inverse.
- i) Compte-tenu des caractéristiques géométriques du palpeur, on connaît alors dans le repère de la machine à mesurer, la position et les caractéristiques de l'élément géométrique associé à la surface fabriquée.
- h) On peut alors calculer les écarts de forme, c'est-à-dire les distances entre les points palpés w_i et l'élément géométrique associé.
- j) L'identification de chaque surface étant faite, il est alors possible de calculer les relations entre les éléments géométriques associés. (Chap.VIII).

CHAPITRE VI

ETUDE DETAILLEE DE L'ASSOCIATION D'UN ELEMENT GEOMETRIQUE A UNE SURFACE PALPEE.

1) DEFINITION DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL EST DEFINI PAR :	ORIGINE DEFINISSANT LA TRANSLATION	VECTEUR $\vec{n}$ DEVANT ETRE ENSUITE AMENE PARALLELE A L'AXE $\vec{OZ}$
Droite	Les 2 points ω_1, ω_2 les plus éloignés	ω_1	$\vec{\omega_1 \omega_2}$ normés
Plan	2 points ω_1, ω_3 les plus éloignés suivant les 3 axes ox, oy, oz. Le point ω_3 est le plus éloigné de la droite $\omega_1 \omega_2$. 2 points ω_1, ω_2 les plus éloignés suivant les 3 axes ox, oy, oz 3ème point ω_3 le plus éloigné de la droite $\omega_1 \omega_2$	ω_1 Centre du cercle O Intersection des 2 médiatrices de $\omega_1 \omega_2$ et $\omega_2 \omega_3$ appartenant au plan $\omega_1 \omega_2 \omega_3$ Rayon $R = O\omega_1$	$\vec{n} = \vec{\omega_1 \omega_2} \wedge \vec{\omega_2 \omega_3}$ $\vec{n} = \vec{\omega_1 \omega_2} \wedge \vec{\omega_2 \omega_3}$
Sphère	Le centre de la sphère O (x_0, y_0, z_0) Le premier point ayant l'indice 1 (N-1) autres points l'indice i on a par la méthode de GAUSS	Centre de la sphère O (x_0, y_0, z_0)	$\vec{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

$$\begin{vmatrix} 2\sum(x_1-x_i)^2 & 2\sum(y_1-y_i)(x_1-x_i) & 2\sum(z_1-z_i)(x_1-x_i) & x_0 & k_1 \\ 2\sum(x_1-x_i)(y_1-y_i) & 2\sum(y_1-y_i)^2 & 2\sum(z_1-z_i)(y_1-y_i) & y_0 & k_2 \\ 2\sum(x_1-x_i)(z_1-z_i) & 2\sum(y_1-y_i)(z_1-z_i) & 2\sum(z_1-z_i)^2 & z_0 & k_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{vmatrix}$$

avec

$$k_1 = \sum(x_1-x_i)(x_1^2+y_1^2+z_1^2) - \sum x_i^2(x_1-x_i) - \sum y_i^2(x_1-x_i) - \sum z_i^2(x_1-x_i)$$

$$k_2 = \sum(y_1-y_i)(x_1^2+y_1^2+z_1^2) - \sum x_i^2(y_1-y_i) - \sum y_i^2(y_1-y_i) - \sum z_i^2(y_1-y_i)$$

$$k_3 = \sum(z_1-z_i)(x_1^2+y_1^2+z_1^2) - \sum x_i^2(z_1-z_i) - \sum y_i^2(z_1-z_i) - \sum z_i^2(z_1-z_i)$$

Rayon de la sphère nominale $R=O\omega_1$

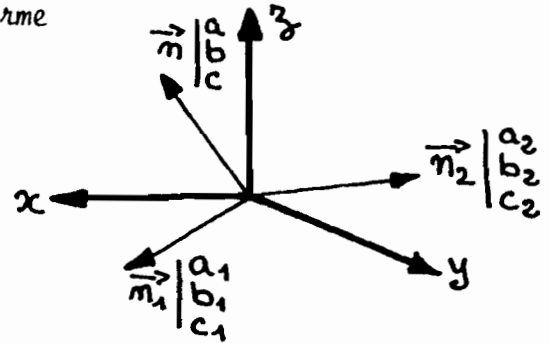
NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL EST DEFINI PAR :	ORIGINE DEFINISSANT LA TRANSLATION	VECTEUR n DEVANT ETRE ENSUITE AMENE PARALLELE A L'AXE O Z
cylindre	Une direction approximative de l'axe $\vec{n}$ connue. Le cercle passant par 3 des points projetés dans un plan perpendiculaire à $\vec{n}$. (On utilise la matrice de rotation définie par $\vec{n}$). On choisit les deux points ω_1 et ω_2 les plus éloignés suivant les axes $\vec{ox}$ et $\vec{oy}$, le troisième point ω_3 est le plus éloigné de la droite $\omega_1\omega_2$.	Un point O de l'axe est défini par l'intersection des 2 médiatrices de $\omega_1\omega_2$ et de $\omega_2\omega_3$ dans le plan parallèle à $\vec{xy}$. La coordonnée z_0 est l'inf des z_i .	$\vec{n}$
cône	Une direction approximative de l'axe $\vec{n}$ connue. Le cercle passant par trois des points projetés dans un plan perpendiculaire à $\vec{n}$. (On utilise la matrice de rotation définie par $\vec{n}$). On choisit les deux points ω_1 et ω_2 les plus éloignés suivant les axes $\vec{ox}$ et $\vec{oy}$, le troisième point ω_3 est le plus éloigné de la droite $\omega_1\omega_2$. <u>VERSION A</u> On calcule les distances des points mesurés à l'axe du cylindre. pour tout couple de points, on calcule l'angle Δ du cône $\Delta_i = \arctg \frac{ d_i - d_j }{ z_i - z_j }$ On prend la moyenne des Δ_i comme demi-angle au sommet du cône. <u>VERSION B</u> Le demi-angle au sommet Δ est imposé. Dans les 2 cas, on définit alors 2 points de l'axe, le sommet s' et le point ω tels que $(s'_z - \omega_z)$ soit maxi	Sommet S du cône	$\vec{n} \rightarrow \begin{cases} S_x - \omega_x \\ S_y - \omega_y \\ S_z - \omega_z \end{cases}$

11. DEFINITION DE LA MATRICE DE ROTATION

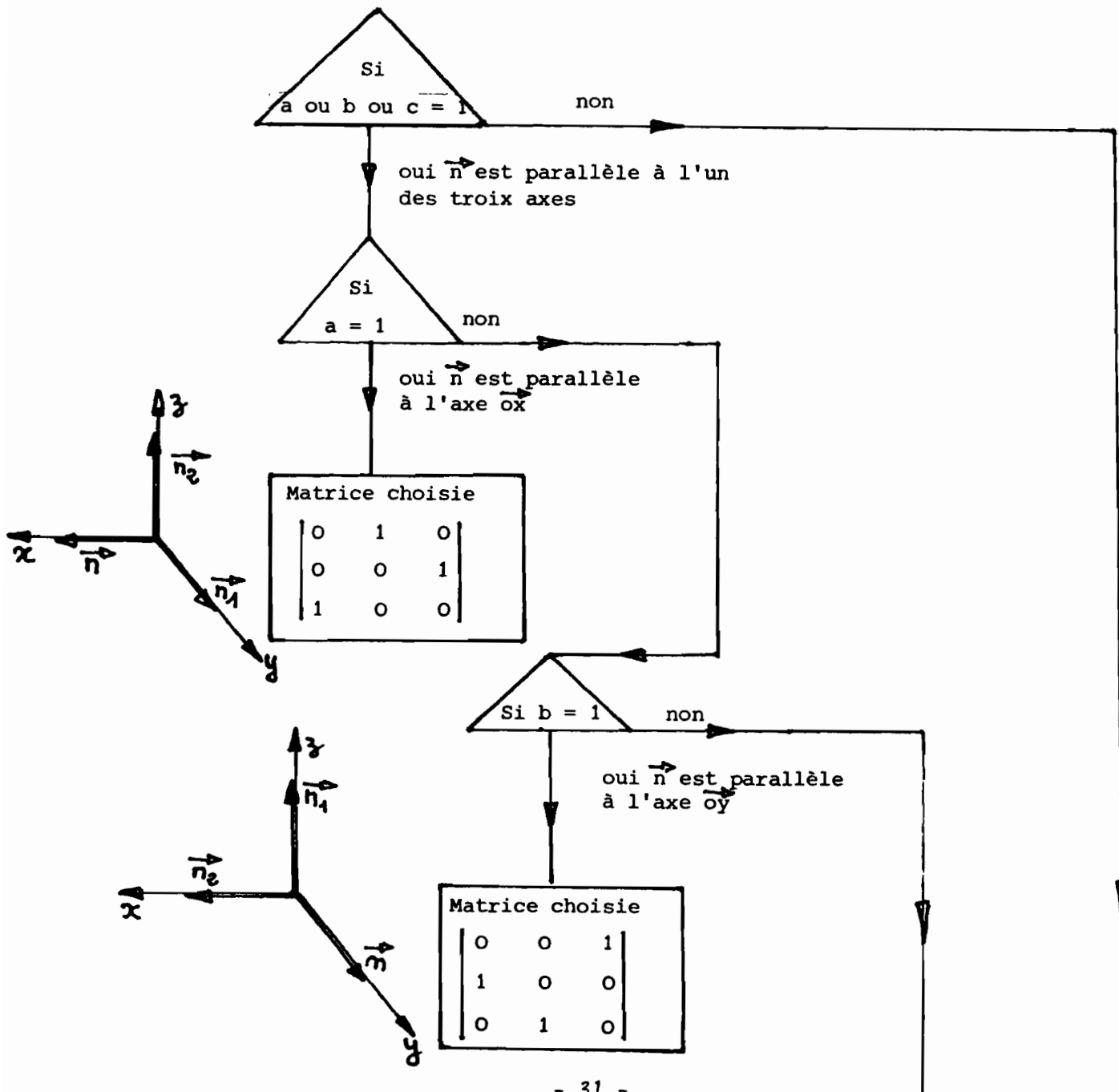
La seule condition est que la normale $\vec{n}$ de cosinus directeurs a b c connus soit amenée parallèle à l'axe $\vec{OZ}$.

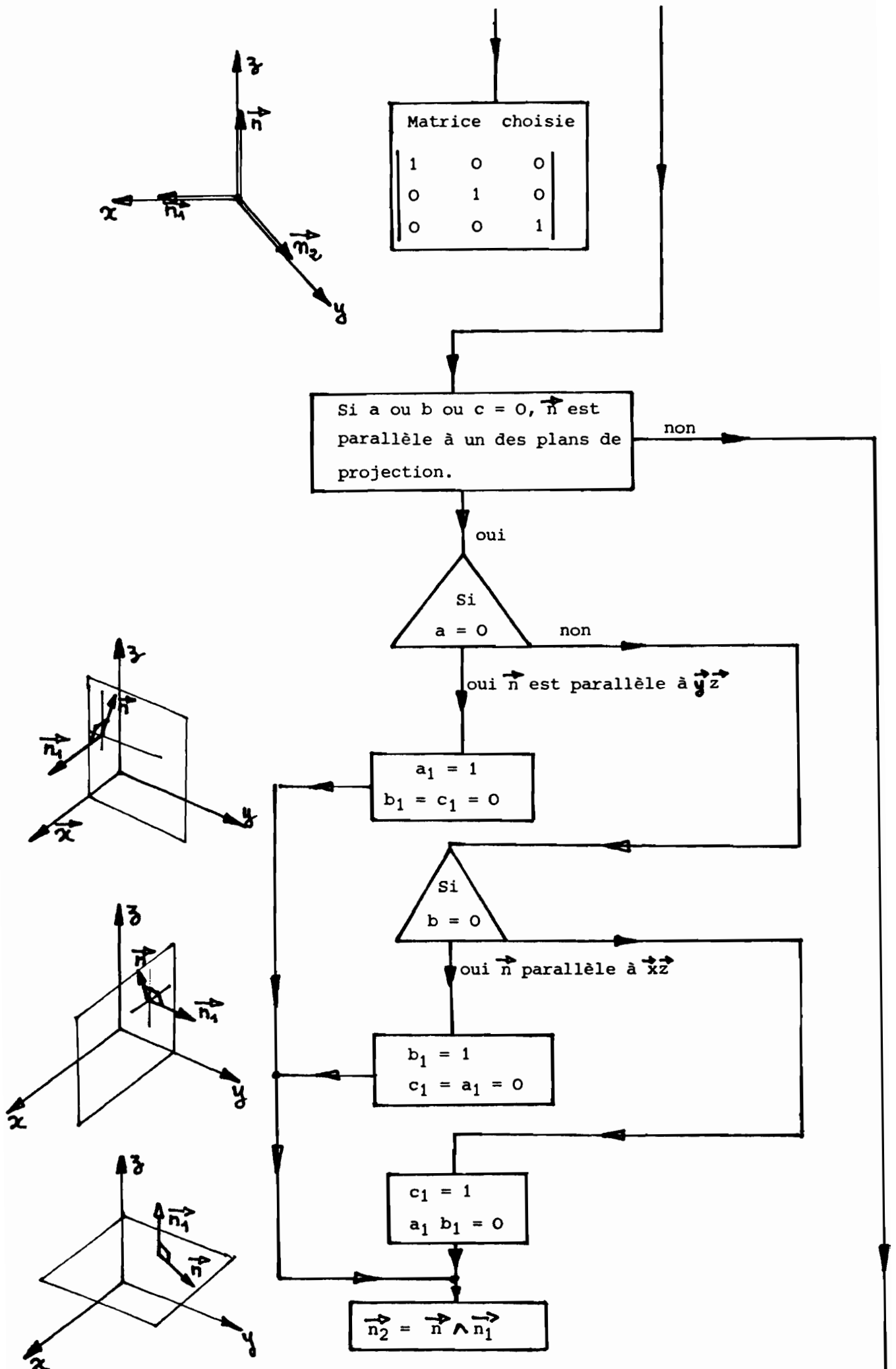
La matrice de rotation sera de la forme

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a & b & c \end{vmatrix}$$



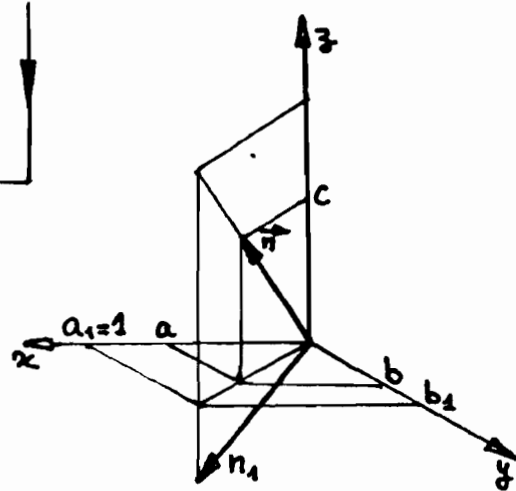
On suit alors la logique suivante :





cas où $\vec{n}$ a une direction quelconque

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 \\ b_1 &= b/a \\ c_1 &= (-a - \frac{b^2}{a})/c \\ R &= \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \\ a_1 &= \frac{a_1}{R} \quad b_1 = \frac{b_1}{R} \quad c_1 = \frac{c_1}{R} \end{aligned}$$



On choisit $\vec{n}_1$ dans le plan $\vec{z} \vec{n}$

$$\text{soit } \frac{b_1}{a_1} = \frac{b}{a}$$

$$\text{avec } a_1 = 1 \quad b_1 = \frac{b}{a}$$

$$\text{D'autre part, } \vec{n} \cdot \vec{n}_1 = 0$$

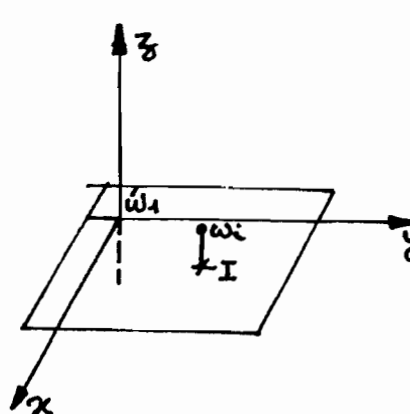
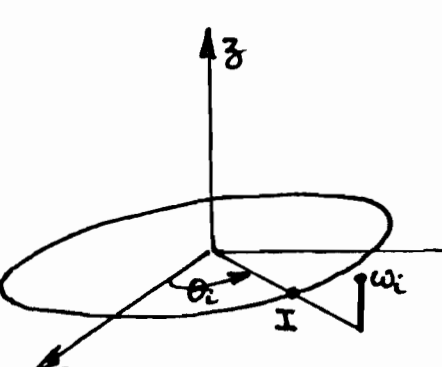
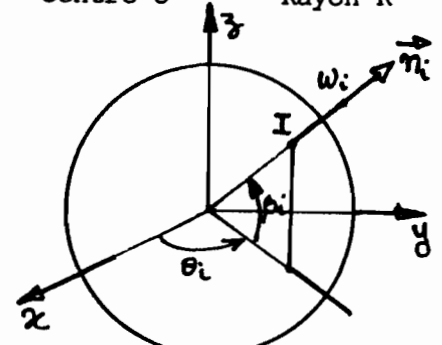
$$aa_1 + bb_1 + cc_1 = 0$$

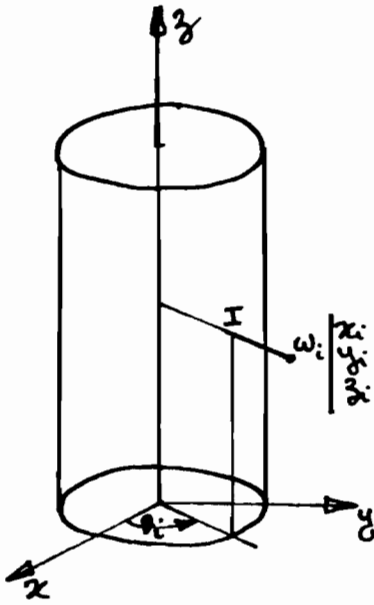
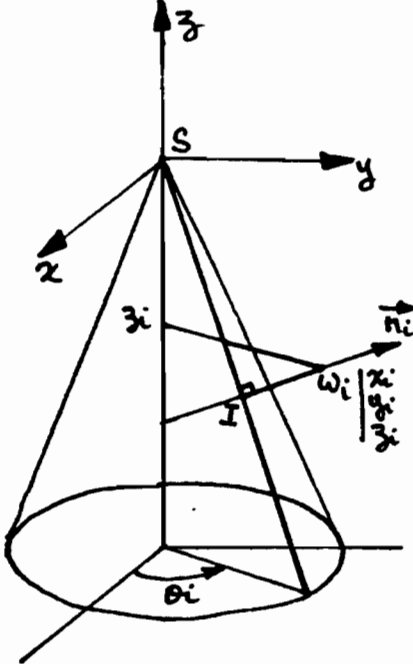
$$\text{et } c_1 = \frac{-a - \frac{b^2}{a}}{c}$$

III. DETERMINATION A PARTIR DES POINTS ω_i : DES POINTS I , DES NORMALES $\vec{n}_i$, ET DES ECARTS f_i CORRESPONDANTS.

Les points ω_i sont obtenus après translation et rotation des points de mesures (rotation puis translation dans les cas du cylindre) pour amener l'élément géométrique nominal centré sur le système d'axes $ox oy oz$ de la machine à mesurer.

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	UN POINT DE MESURE ω_i ETANT DEFINI PAR $x_i y_i z_i$ L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL EST DEFINI PAR :
Droite	2 points : origine et ω_2 $f_{i1} = x_i \quad f_{i2} = y_i$ $\vec{n}_{i1} \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad \vec{n}_{i2} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}$ $I_1 \begin{vmatrix} 0 \\ y_i \\ z_i \end{vmatrix} \quad I_2 \begin{vmatrix} x_i \\ 0 \\ z_i \end{vmatrix}$

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	UN POINT DE MESURE ω_i ETANT DEFINI PAR x_i, y_i, z_i : L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL EST DEFINI PAR :
Plan	 $f_i = z_i$ $\vec{n}_i \left \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 1 \end{array} \right.$ $I \left \begin{array}{c} x_i \\ y_i \\ 0 \end{array} \right.$
Cercle	Centre O Rayon R  $f_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - R$ $\vec{n}_i \left \begin{array}{l} \cos \theta_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \\ \sin \theta_i = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \end{array} \right.$ $I \left \begin{array}{c} R \cos \theta_i \\ R \sin \theta_i \end{array} \right.$
Sphère	Centre O Rayon R  $f_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} - R$ $\vec{n}_i \left \begin{array}{cc} \cos \beta_i & \cos \theta_i \\ \cos \beta_i & \sin \theta_i \\ \sin \beta_i & \end{array} \right.$ $I \left \begin{array}{cc} R \cos \beta_i & \cos \theta_i \\ R \cos \beta_i & \sin \theta_i \\ R \sin \beta_i & \end{array} \right.$ avec $\sin \theta_i = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}$ $\sin \beta_i = \frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}$ $\cos \theta_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}$ $\cos \beta_i = \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}$

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	UN POINT DE MESURE ω_i ETANT DEFINI PAR x_i, y_i, z_i L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL EST DEFINI PAR
Cylindre	 $\rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - R$ $\vec{n}_i \begin{cases} \cos \theta_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \\ \sin \theta_i = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \\ 0 \end{cases}$ $I \begin{cases} R \cos \theta_i \\ R \sin \theta_i \\ z_i \end{cases}$
Cone	 $\rho_i = [\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - z_i \tan \Delta] \cos \Delta$ $\vec{n}_i \begin{cases} a_i = \cos \Delta \cos \theta_i \\ b_i = \cos \Delta \sin \theta_i \\ c_i = \sin \Delta \end{cases}$ avec $\cos \theta_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}$ $\sin \theta_i = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}$ $I \begin{cases} x_i - \rho_i \cos \Delta \cos \theta_i = X_i \\ y_i - \rho_i \cos \Delta \sin \theta_i = Y_i \\ z_i - \rho_i \sin \Delta = Z_i \end{cases}$

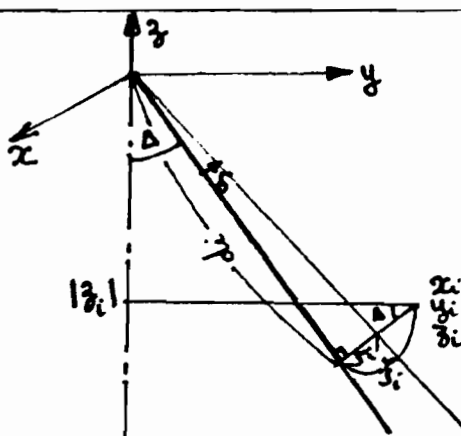
IV. CALCULS DETAILLES DES TORSEURS DES PETITS DEPLACEMENTS

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	COORDONNEES PLUCKERIENNE DE $\vec{n}_i$	TORSEUR D'ECART	MISE EN EQUATIONS
Droite	PLAN 1/0 $\mathcal{P} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ z_i \\ -y_i \end{Bmatrix}$ PLAN 2/0 $\mathcal{P} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ -z_i \\ 0 \\ x_i \end{Bmatrix}$	$\mathcal{T} \begin{Bmatrix} 0 \\ \beta \\ 0 \\ u \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$ $\mathcal{T} \begin{Bmatrix} \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ v \\ 0 \end{Bmatrix}$	$e_{i1} = \xi_{i1} - (z_i \beta + u) = x_i - (z_i \beta + u)$ $W_1 = \sum e_{i1}^2$ $e_{i2} = \xi_{i2} - (-z_i \alpha + v) = y_i - (-z_i \alpha + v)$ $W_2 = \sum e_{i2}^2$ $\frac{\partial W_1}{\partial \beta} = 0 \quad \frac{\partial W_1}{\partial u} = 0 \quad \frac{\partial W_2}{\partial \alpha} = 0 \quad \frac{\partial W_2}{\partial v} = 0$ $\begin{vmatrix} \sum z_i^2 & \sum z_i & 0 & 0 \\ \sum z_i & n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sum z_i^2 & -\sum z_i \\ 0 & 0 & -\sum z_i & n \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \beta \\ u \\ \alpha \\ v \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum z_i x_i \\ \sum x_i \\ -\sum z_i y_i \\ \sum y_i \end{vmatrix}$
Plan	$\mathcal{P} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ y_i \\ -x_i \\ 0 \end{Bmatrix}$	$\mathcal{T} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w \end{Bmatrix}$	$e_i = \xi_i - (y_i \alpha - x_i \beta + w)$ $W = \sum e_i^2$ $\frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial \beta} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial w} = 0$ $\begin{vmatrix} \sum y_i^2 & -\sum x_i y_i & \sum y_i \\ -\sum x_i y_i & \sum x_i^2 & -\sum x_i \\ \sum y_i & -\sum x_i & n \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \alpha \\ \beta \\ w \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum \xi_i y_i \\ -\sum \xi_i x_i \\ \sum \xi_i \end{vmatrix}$

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	COORDONNEES PLUCKERIENNE DE $\vec{h}$	TORSEUR D'ECART	MISE EN EQUATIONS
Cercle	On cherche à la fois: le cercle qui passe au mieux des points en projection dans le plan xy, et le plan qui passe au mieux des points de mesure. A) Cercle qui passe au mieux des points Si r est l'accroissement du rayon porté par $\vec{n}_i$ qui minimise les e_i; on a : $\mathcal{P} \begin{cases} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \quad \vec{\lambda} \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u \\ v \\ 0 \end{cases} \quad \begin{aligned} e_{i1} &= (\xi_i - r) - (u \cos \theta_i + v \sin \theta_i) \\ e_{i1} &= \xi_i - (u \cos \theta_i + v \sin \theta_i + r) \\ W_1 &= \sum e_i^2 \\ \frac{\partial W_1}{\partial u} &= 0 \quad \frac{\partial W_1}{\partial v} = 0 \quad \frac{\partial W_1}{\partial r} = 0 \end{aligned}$ B) Plan passant au mieux des points: $\mathcal{P} \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 1 \\ y_i \\ -x_i \\ 0 \end{cases} \quad \vec{\lambda} \begin{cases} \alpha \\ \beta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w \end{cases} \quad \begin{aligned} e_{i2} &= z_i - (y_i \alpha - x_i \beta + w) \\ W_2 &= \sum e_i^2 \\ \frac{\partial W_2}{\partial \alpha} &= 0 \quad \frac{\partial W_2}{\partial \beta} = 0 \quad \frac{\partial W_2}{\partial w} = 0 \end{aligned}$		
	$\begin{array}{ cccccc } \hline \sum \cos^2 \theta_i & \sum \cos \theta_i \sin \theta_i & \sum \cos \theta_i & 0 & 0 & 0 \\ \hline \sum \cos \theta_i \sin \theta_i & \sum \sin^2 \theta_i & \sum \sin \theta_i & 0 & 0 & 0 \\ \hline \sum \cos \theta_i & \sum \sin \theta_i & n & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \sum y_i^2 & -\sum x_i y_i & \sum y_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & -\sum x_i y_i & \sum x_i^2 & -\sum x_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & \sum y_i & -\sum x_i & n \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{ c } \hline u \\ \hline v \\ \hline r \\ \hline \alpha \\ \hline \beta \\ \hline w \\ \hline \end{array} = \begin{array}{ c } \hline \sum \xi_i \cos \theta_i \\ \hline \sum \xi_i \sin \theta_i \\ \hline \sum \xi_i \\ \hline \sum z_i y_i \\ \hline -\sum z_i x_i \\ \hline \sum z_i \\ \hline \end{array}$		

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	COORDONNEES PLUCKERIENNE DE n	TORSEUR D'ECART	MISE EN EQUATIONS
Sphère	$\rho \begin{cases} \cos \beta_i \cos \theta_i \\ \cos \beta_i \sin \theta_i \\ \sin \beta_i \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{cases}$	$\tau \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u \\ v \\ w \end{cases}$	Si r est l'accroissement du rayon portée par $\vec{n}_i$ qui minimise les écarts e_i on a : $e_i = (\xi_i - r) - [u \cos \beta_i \cos \theta_i + v \cos \beta_i \sin \theta_i + w \sin \beta_i]$ d'où $e_i = \xi_i - [u \cos \beta_i \cos \theta_i + v \cos \beta_i \sin \theta_i + w \sin \beta_i + r]$ $W = \sum e_i^2$ $\frac{\partial W}{\partial u} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial v} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial w} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial r} = 0 \quad \text{donne}$ $A = \begin{vmatrix} \sum \cos^3 \beta_i \cos^2 \theta_i & \sum \cos \beta_i^2 \sin \theta_i & \sum \cos \beta_i \sin \beta_i \cos \theta_i & \sum \cos \beta_i \cos \theta_i \\ \sum \cos^2 \beta_i \sin \theta_i \cos \theta_i & \sum \cos \beta_i^2 \sin^2 \theta_i & \sum \cos \beta_i \sin \beta_i \sin \theta_i & \sum \cos \beta_i \sin \theta_i \\ \sum \cos \beta_i \sin \beta_i \cos \theta_i & \sum \cos \beta_i \sin \beta_i \sin \theta_i & \sum \sin^2 \beta_i & \sum \sin \beta_i \\ \sum \cos \beta_i \cos \theta_i & \sum \cos \beta_i \sin \theta_i & \sum \sin \beta_i & n \end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix} A \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} u \\ v \\ w \\ r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum \xi_i \cos \beta_i \cos \theta_i \\ \sum \xi_i \cos \beta_i \sin \theta_i \\ \sum \xi_i \sin \beta_i \\ \sum \xi_i \end{vmatrix}$

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	COORDONNEES PLUCKERIENNE DE $\vec{n}$	TORSEUR D'ECART	MISE EN EQUATIONS
Cylindre	$\mathcal{P} \begin{cases} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \\ -z_i \sin \theta_i \\ z_i \cos \theta_i \\ 0 \end{cases}$	$\mathcal{T} \begin{cases} \alpha \\ \beta \\ 0 \\ u \\ v \\ 0 \end{cases}$	Si r est l'accroissement du rayon portée par $\vec{n}_i$ qui minimise les écarts e_i on a : $e_i = (\xi_i - r) - [-z_i \sin \theta_i \alpha + z_i \cos \theta_i \beta + u \cos \theta_i + v \sin \theta_i]$ soit $e_i = \xi_i - [-z_i \sin \theta_i \alpha + z_i \cos \theta_i \beta + \cos \theta_i u + \sin \theta_i v + r]$ $W = \sum e_i^2$ $\frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial \beta} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial u} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial v} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial r} = 0$ $A = \begin{vmatrix} \sum z_i^2 \sin^2 \theta_i & -\sum z_i^2 \sin \theta_i \cos \theta_i & -\sum \sin \theta_i \cos \theta_i z_i & -\sum z_i \sin^2 \theta_i & -\sum z_i \sin \theta_i \\ -\sum z_i^2 \sin \theta_i \cos \theta_i & \sum z_i^2 \cos^2 \theta_i & \sum z_i \cos^2 \theta_i & \sum z_i \cos \theta_i \sin \theta_i & \sum z_i \cos \theta_i \\ -\sum z_i \sin \theta_i \cos \theta_i & \sum z_i \cos^2 \theta_i & \sum \cos^2 \theta_i & \sum \sin \theta_i \cos \theta_i & \sum \cos \theta_i \\ -\sum z_i \sin^2 \theta_i & \sum z_i \sin \theta_i \cos \theta_i & \sum \sin \theta_i \cos \theta_i & \sum \sin^2 \theta_i & \sum \sin \theta_i \\ -\sum z_i \sin \theta_i & \sum z_i \cos \theta_i & \sum \cos \theta_i & \sum \sin \theta_i & n \end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix} A & x & u & v & r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\sum \xi_i z_i \sin \theta_i \\ \sum \xi_i \cos \theta_i z_i \\ \sum \xi_i \cos \theta_i \\ \sum \xi_i \sin \theta_i \\ \sum \xi_i \end{vmatrix}$

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	COORDONNEES PLUCKERIENNE DE $\vec{n}$	TORSEUR D'ECART	MISE EN EQUATIONS
Cône	$\mathcal{P} \begin{cases} a_i \\ b_i \\ c_i \\ l_i = y_i c_i - z_i b_i \\ m_i = z_i a_i - x_i c_i \\ n_i = x_i b_i - y_i a_i \end{cases}$	$\mathcal{T} \begin{cases} \alpha \\ \beta \\ 0 \\ u \\ v \\ w \end{cases}$	 Si r_i est l'accroissement de la position de la surface réelle portée par $\vec{n}_i$, due à un accroissement δ de l'angle Δ du cône on a : $e_i = (r_i - r_i) - (\alpha l_i + \beta m_i + u a_i + v b_i + w c_i)$ avec $d_i = \frac{ z_i }{\cos \Delta} + r_i \tan \Delta$ et $r_i = d_i \cdot \delta$ soit $e_i = r_i - (\alpha l_i + \beta m_i + u a_i + v b_i + w c_i + d_i \delta)$ $W = \sum e_i^2$ $\frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial \beta} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial u} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial v} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial w} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial \delta} = 0$ $\begin{vmatrix} \sum l_i^2 & \sum l_i m_i & \sum l_i a_i & \sum l_i b_i & \sum l_i c_i & \sum l_i d_i \\ \sum l_i m_i & \sum m_i^2 & \sum m_i a_i & \sum m_i b_i & \sum m_i c_i & \sum m_i d_i \\ \sum l_i a_i & \sum m_i a_i & \sum a_i^2 & \sum a_i b_i & \sum a_i c_i & \sum a_i d_i \\ \sum l_i b_i & \sum m_i b_i & \sum a_i b_i & \sum b_i^2 & \sum b_i c_i & \sum b_i d_i \\ \sum l_i c_i & \sum m_i c_i & \sum a_i c_i & \sum b_i c_i & \sum c_i^2 & \sum c_i d_i \\ \sum l_i d_i & \sum m_i d_i & \sum a_i d_i & \sum b_i d_i & \sum c_i d_i & \sum d_i^2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \alpha \\ \beta \\ u \\ v \\ w \\ \delta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum r_i l_i \\ \sum r_i m_i \\ \sum r_i a_i \\ \sum r_i b_i \\ \sum r_i c_i \\ \sum r_i d_i \end{vmatrix}$ Si on ne désire pas faire varier l'angle Δ, le système d'équations est obtenu en supprimant la dernière ligne et la dernière colonne de la matrice.

V. CONNAISSANT LE TORSEUR D'ECART , DETERMINATION DES PARAMETRES
DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE A LA SURFACE FABRIQUEE

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	CENTRE SUR $Oxyz$			RAMENE A LA POSITION RELLE	
	L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL EST DEFINI PAR :	L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE AUX CENTRES DES SPHERES DE PALPAGE EST DEFINI PAR :		L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE AUX CENTRES DES SPHERES DE PALPAGE EST DEFINI PAR	L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE A LA SURFACE FABRIQUEE COMPTE TENU DU DIAMETRE d DE LA SPHER DE PALPAGE
DROITE	2 points extrêmes $O \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}$ $\omega_2 \begin{cases} 0 \\ 0 \\ z_2 \end{cases}$	2 points extrêmes $O' \begin{cases} u \\ v \\ 0 \end{cases}$ $\omega'_2 \begin{cases} z_2 \beta + u \\ -z_2 \alpha + v \\ z_2 \end{cases}$	R^{-1} $-T$	2 points extrêmes Ω_1 Ω_2	2 points extrêmes P_1 et P_2 (un troi- sième point Ω_3 appartenant au plan contenant la droite est palpé) on définit $\vec{n} = \overrightarrow{\Omega_1 \Omega_2} \wedge \overrightarrow{\Omega_2 \Omega_3}$ $\overrightarrow{OP_1} = \overrightarrow{O\Omega_1} + \text{Signe} \times \frac{d}{2} \vec{n}$ $\overrightarrow{OP_2} = \overrightarrow{O\Omega_2} + \text{Signe} \times \frac{d}{2} \vec{n}$
PLAN	3 points $\omega_0 \begin{cases} x_0 \\ y_0 \\ 0 \end{cases}$ avec $x_0 = \frac{x_{iM} - x_{i\min}}{2}$ $y_0 = \frac{y_{iM} - y_{i\min}}{2}$ $\sigma \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}$ $\omega_2 \begin{cases} x_2 \\ y_2 \\ 0 \end{cases}$	3 points $\omega'_0 \begin{cases} x_0 \\ y_0 \\ y_0 \alpha - x_0 \beta + w \end{cases}$ $\sigma' \begin{cases} 0 \\ 0 \\ w \end{cases}$ $\omega'_2 \begin{cases} x_2 \\ y_2 \\ y_2 \alpha - x_2 \beta - w \end{cases}$	R^{-1} $-T$	3 points Ω_0 O Ω_2	Une normale $\vec{n}$ au plan $\vec{n} = \overrightarrow{O\Omega_0} \wedge \overrightarrow{O\Omega_2}$ Un point P "Centre" de la surface $\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{O\Omega_0} + \text{Signe} \times \frac{d}{2} \vec{n}$

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	CENTRE SUR O			RAMENE A LA POSITION RELLE	
	L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL EST DEFINI PAR :	L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE AUX CENTRES DES SPHERES DE PALPAGE EST DEFINI PAR :		L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE AUX CENTRES DES SPHERES DE PALPAGE EST DEFINI PAR	L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE A LA SURFACE FABRIQUEE COMPTE TENU DU DIAMETRE d DE LA SPHERE DE PALPAGE
CERCLE	CENTRE $O \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}$ Rayon : R	CENTRE $C' \begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases}$ Rayon $R' = R + r$ 2 points $w'_1 \begin{cases} u + R' \\ v \\ w - R\beta \end{cases}$ $\theta_1 = 0$ $w'_2 \begin{cases} u \\ v + R' \\ w + R\alpha \end{cases}$ $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$	R^{-1} $-T$	CENTRE C Rayon R' 2 points Ω_1 Ω_2	UNE NORMALE $\vec{n}$ $\vec{n} = \vec{C} \vec{\Omega}_1 \wedge \vec{C} \vec{\Omega}_2$ Un rayon R'' $R'' = R' + \text{signe}_2 \times \frac{d}{2}$ Un centre C'' $\vec{OC''} = \vec{OC} + \text{signe}_1 \frac{d}{2} \vec{n}$
SPHERE	CENTRE $O \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}$ Rayon R	CENTRE $C' \begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases}$ Rayon R' $R' = R + r$	$-T$	CENTRE C Rayon R'	CENTRE C Rayon R'' $R'' = R' + \text{signe}_2 \times \frac{d}{2}$
CYLINDRE	2 points de l'axe $O \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}$ $\Omega \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 3_{\text{Maxi}} \end{cases}$ Rayon R	2 points de l'axe $C' \begin{cases} u \\ v \\ 0 \end{cases}$ $\Omega' \begin{cases} u + 3\beta \\ v - \alpha 3_M \\ 3_M \end{cases}$ Rayon R' $R' = R + r$	$-T$ R^{-1}	2 points extrêmes de l'axe C Ω Rayon R'	2 points extrêmes de l'axe C Ω Rayon R'' $R'' = R' + \text{signe}_3 \times \frac{d}{2}$

NATURE DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL	CENTRÉ SUR O			RAMENE A LA POSITION RELLE	
	L'ELEMENT GEOMETRIQUE NOMINAL EST DEFINI PAR :	L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE AUX CENTRES DES SPHERES DE PALPAGE EST DEFINI PAR :		L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE AUX CENTRES DES SPHERES DE PALPAGE EST DEFINI PAR	L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE A LA SURFACE FABRIQUEE COMPTE TENU DU DIAMETRE d DE LA SPHERE DE PALPAGE
CONE	2 points de l'axe Le sommet $O \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}$ Le point le plus bas ou celui de plan de jauge $W \begin{cases} 0 \\ 0 \\ z_0 \end{cases}$ Version A : l'angle provisoire Δ Version B : l'angle imposé Δ	2 points de l'axe Le sommet $S' \begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases}$ $\Omega' \begin{cases} u + z_0 \beta \\ v - z_0 \alpha \\ w \end{cases}$ Version A : l'angle Δ' $\Delta' = \Delta + \delta$ Version B : L'angle $\Delta' = \Delta$	R^{-1} $-T$	2 points de l'axe Le sommet S Ω L'angle Δ'	2 points de l'axe Le sommet $S' = S + \text{signe}_3 \times \frac{d}{2 \sin \Delta'}$ Le point le plus éloigné de S' ou celui du plan de jauge. $P = \Omega + \text{Signe}_3 \times \frac{d}{2 \sin \Delta'}$ L'angle Δ'

ETUDE DU SIGNE

Le signe se détermine en comparant le sens d'accostage du dernier point palpé et la normale à la surface en ce point.

Le sens d'accostage est défini par le sens du déplacement du palpeur sur l'un des trois axes de la machine.

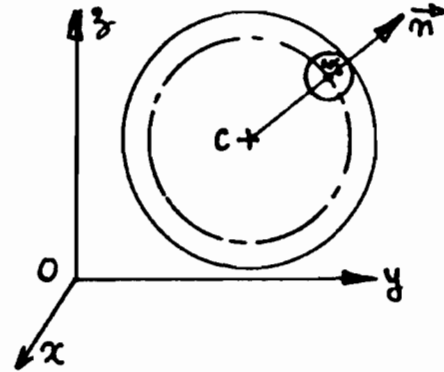
Détermination de la normale $\vec{n}$ au point w_j dernier point palpé.

a) Cas du plan: $\vec{n}$ est la normale au plan



b) Cas du cercle et de la sphère

$$\vec{n} = \vec{O\omega_j} - \vec{OC}$$



c) Cas du cylindre

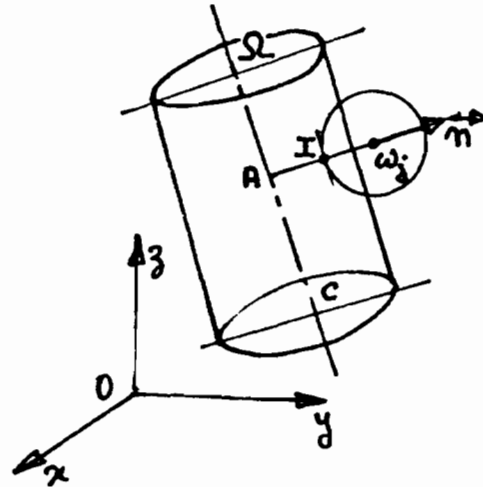
On définit la direction $\vec{n}_1$
de la droite $C\Omega$

$$\vec{n}_1 = \frac{\vec{C\Omega}}{|\vec{C\Omega}|}$$

$$\vec{C\omega_j} \cdot \vec{n}_1 = \lambda$$

$$\vec{OA} = \vec{OC} + \lambda \vec{n}_1$$

$$\vec{n} = \vec{O\omega_j} - \vec{OA}$$



d) Cas du cône

Directions $\vec{n}_1$ de $\vec{S\Omega}$

$$\vec{n}_1 = \frac{\vec{S\Omega}}{|\vec{S\Omega}|}$$

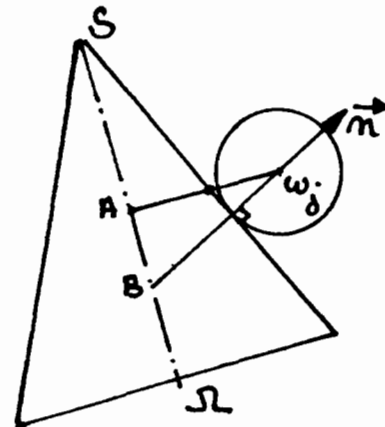
$$\vec{S\omega_j} \cdot \vec{n}_1 = \lambda_A$$

$$\vec{OA} = \vec{OS} + \lambda_A \vec{n}_1$$

$$\lambda_B = \lambda_A + |\vec{\omega_j A}| \tan \Delta$$

$$\vec{OB} = \vec{OS} + \lambda_B \vec{n}_1$$

$$\vec{n} = \vec{O\omega_j} - \vec{OB}$$



Dans les quatre cas :

On compare le signe d'accostage et le signe de la composante de $\vec{n}$ sur le même axe machine

S'ils sont de même signe : signe = 1

S'ils sont de signe contraire : signe = - 1

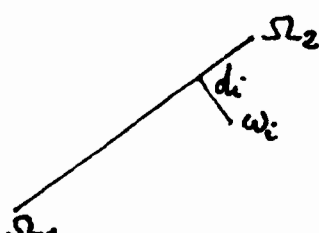
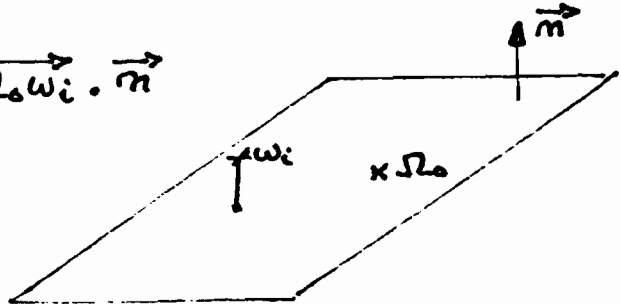
CHAPITRE VII

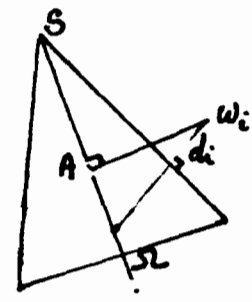
ETUDE SUR LA PRECISION DES ECARTS DE FORMES OPTIMISEES.

I. CALCUL DES ECARTS DE FORMES OPTIMISEES

Deux modes de calcul peuvent être utilisés :

- soit calculer le nouvel écart e_i par l'équation qui a permis de définir le torseur des petits déplacements lorsque la surface est centrée sur le repère $o x y z$.
- soit calculer directement la distance d_i entre le centre ω_i de la sphère de palpation et l'élément géométrique associé aux centres des sphères de palpation de la surface.

NATURE ET DEFINITION DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE AUX CENTRES DES SPHERES DE PALPAGE	CALCUL DE e_i x_i, y_i, z_i ETANT LES COORDONNEES DE LA SURFACE CENTREE SUR LE REPERE MACHINE A MESURER . CALCUL DE d_i DISTANCE ENTRE ω_i ET L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE AUX CENTRES DES SPHERES DE PALPAGE .
<u>DROITE</u> : 2 points extrêmes Ω_1 et Ω_2	$e_{i1} = x_i - (z_i \beta + u)$ $e_{i2} = y_i - (-z_i \alpha + v)$ $e_i = \sqrt{e_{i1}^2 + e_{i2}^2}$ $d_i = \frac{\overrightarrow{\Omega_1 \Omega_2} \wedge \overrightarrow{\Omega_1 \omega_i}}{ \overrightarrow{\Omega_1 \Omega_2} }$ 
<u>PLAN</u> Une normale $\vec{n}$ au plan Un point Ω_0	$e_i = z_i - (y_i \alpha - x_i \beta + w)$ $d_i = \overrightarrow{\Omega_0 \omega_i} \cdot \vec{n}$ 

NATURE ET DEFINITION DE L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE AUX CENTRES DES SPHERES DE PALPAGE	CALCUL DE e_i : x_i, y_i, z_i ETANT LES COORDONNEES DE LA SURFACE CENTREE SUR LE REPERE MACHINE A MESURER . CALCUL DE d_i : DISTANCE ENTRE w_i ET L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE AUX CENTRES DES SPHERES DE PALPAGE .
<u>CERCLE</u> Une normale $\vec{n}$ Rayon R' Centre C	$e_i = \sum_i - (u \cos \theta_i + v \sin \theta_i + r)$ $d_i = \vec{Cw_i} - R'$
<u>SPHERE</u> Centre C Rayon R'	$e_i = \sum_i - (u \cos \beta_i \cos \theta_i + v \cos \beta_i \sin \theta_i + w \sin \beta_i + r)$ avec : $\sin \theta_i = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}$ $\sin \beta_i = \frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}$ $\cos \theta_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}$ $\cos \beta_i = \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}$ $d_i = \vec{Cw_i} - R'$
<u>CYLINDRE</u> 2 points extrêmes de l'axe C Ω Rayon R'	$e_i = \sum_i - (-z_i \sin \theta_i \alpha + z_i \cos \theta_i \beta + u \cos \theta_i + v \sin \theta_i + r)$ avec $\cos \theta_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}$ $\sin \theta_i = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}$ $d_i = \left \frac{\vec{C\Omega} \wedge \vec{Cw_i}}{ \vec{C\Omega} } \right - R'$
<u>CONE</u> 2 points de l'axe le sommet S et Ω l'angle Δ	$e_i = \sum_i - (\alpha e_i + \beta m_i + u a_i + v b_i + w c_i + d_i \delta)$ $\vec{n}_1 = \frac{\vec{S\Omega}}{ \vec{S\Omega} }$ $\vec{Aw_i} = \frac{\vec{\Omega S} \wedge \vec{\Omega w_i}}{ \vec{\Omega S} }$  $d_i = [Aw_i - (\vec{Sw_i} \cdot \vec{n}_1) \tan \Delta] \cos \Delta$

II. COMPARAISON ENTRE LES ECARTS $\sum_i e_i$ d_i :

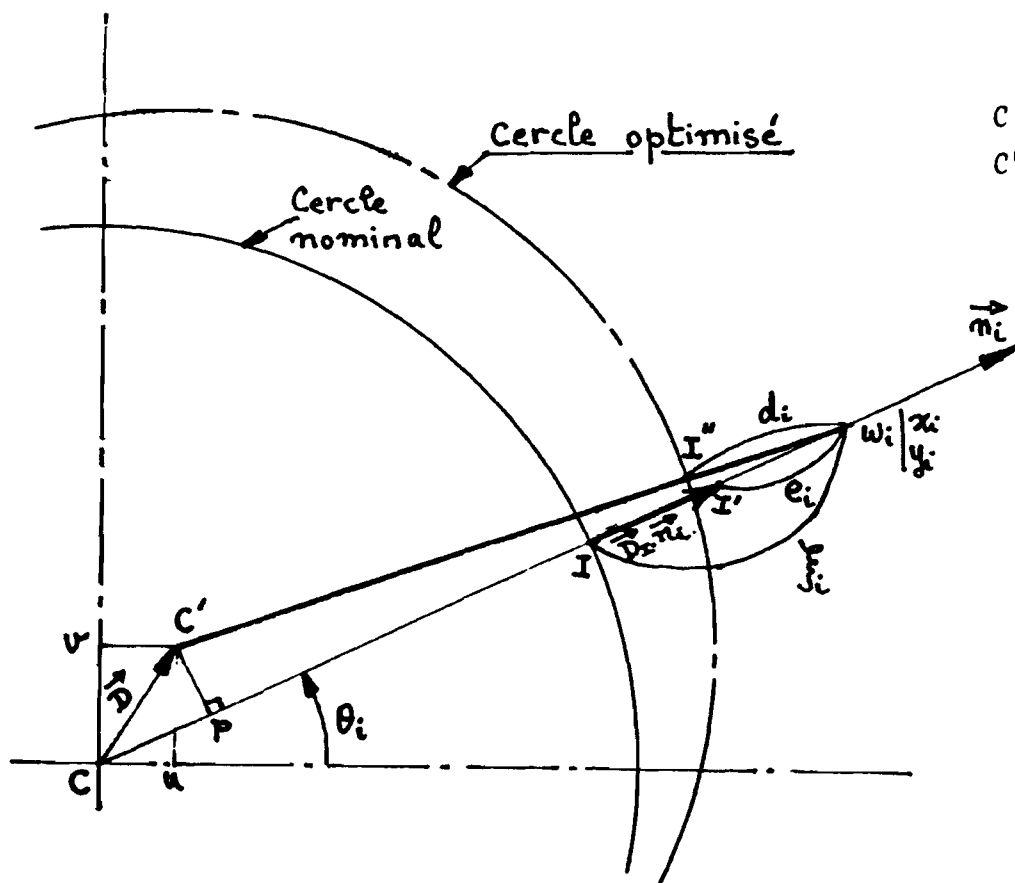
$\sum_i$ est l'écart mesuré entre la surface fabriquée et l'élément géométrique nominal.

e_i est l'écart optimisé entre la surface fabriquée et l'élément géométrique associé obtenu par : $e_i = \sum_i - [\mathcal{P}_i] \cdot [\mathcal{U}_i]$

d_i est la distance entre la surface fabriquée et l'élément géométrique associé.

Dans le cas de surfaces complexes, le calcul exact de d_i étant souvent impossible on définit les écarts de forme par les e_i optimisés, on considère alors que la différence entre d_i et e_i est négligeable et du second ordre. Vérifions cette hypothèse dans les cas simples où les distances d_i sont calculables et extrapolons les résultats au cas général de surfaces quelconques.

a) Cas du cercle et de la sphère



C : centre du cercle nominal

C' : centre du cercle optimisé

Ecart mesuré : $\sum_i = I\omega_i$

Ecart optimisé : $e_i = \sum_i - \vec{D}_i \cdot \vec{n}_i$

$e_i = I'\omega_i$

Distance d_i après optimisation

$d_i = I''\omega_i$

La méthode proposée optimise les écarts e_i et non pas les distances au cercle d_i . Les différences entre les distances d_i et les écarts e_i permettent d'apprécier la précision de la méthode :

- dans le cas du cercle, on a :

$$d_i - e_i = [\omega_i C' - R] - [\omega_i C - CP - R]$$

(1) soit

$$d_i - e_i = \omega_i C' - \omega_i P$$

L'optimisation nous donne le déplacement $\vec{CC'}$ défini par ses composantes u et v , ce qui donne :

$$(1) \quad d_i - e_i = \sqrt{(x_i - u)^2 + (y_i - v)^2} - [\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - u \cos \theta_i - v \sin \theta_i]$$

Plaçons nous dans le cas où la différence $d_i - e_i$ sera maximum, c'est-à-dire lorsque le déplacement $\vec{D}$ est perpendiculaire à $\vec{n}$

$$\text{soit } \theta_i = 0 \quad u = 0 \quad y_i = 0$$

en prenant $x_i = R + \xi_i$, on a :

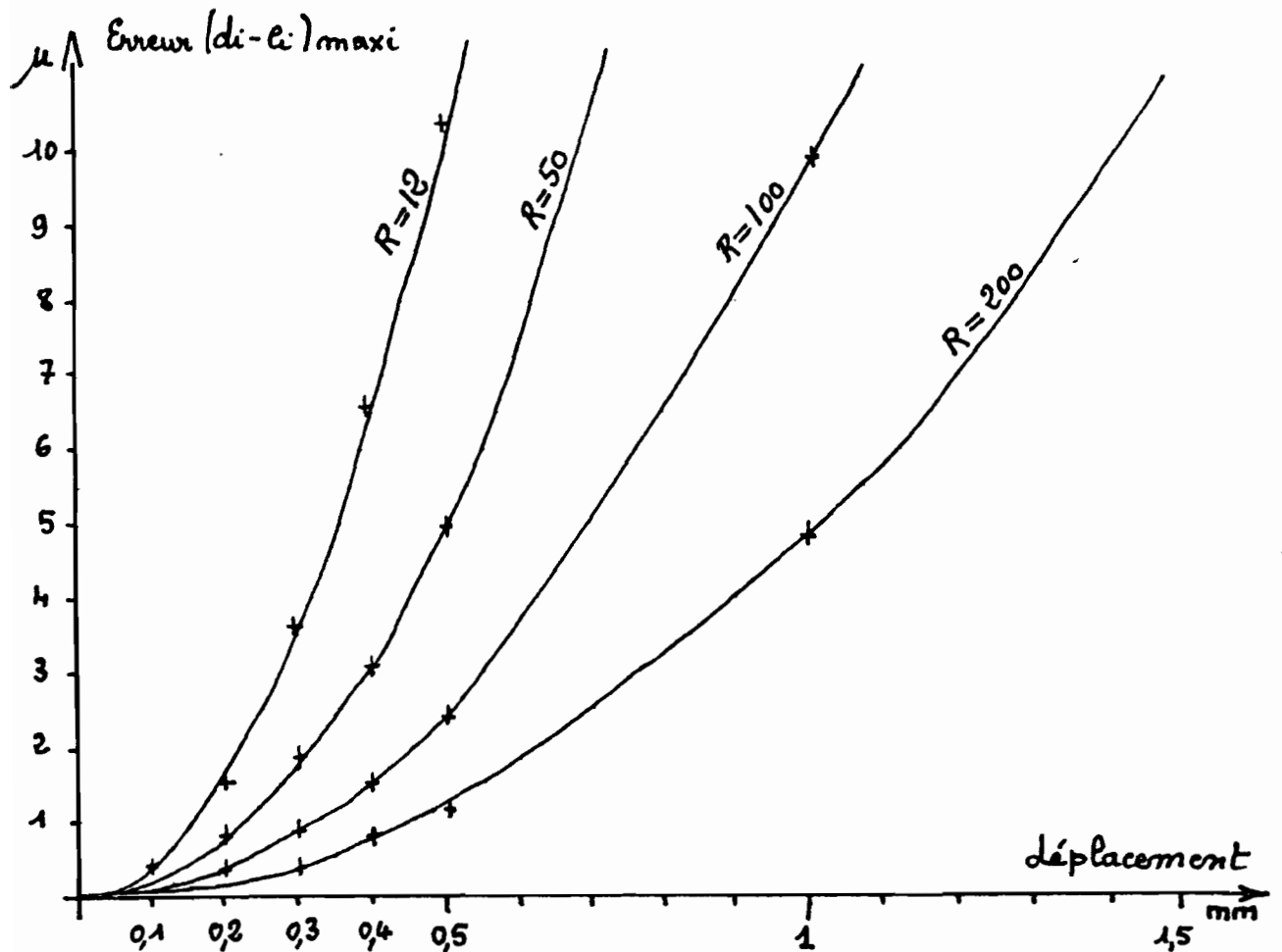
$$(1) \quad (d_i - e_i)_{\max i} = \sqrt{(R + \xi_i)^2 + v^2} - (R + \xi_i)$$

L'influence de ξ_i est négligeable sur le résultat, on se place dans le cas défavorable de $\xi_i = 0$.

On obtient, en faisant varier le déplacement $|\vec{D}| = v$ de 0,01 à 4 pour 4 diamètres 24-50-100 et 200, les résultats suivants :

$ \vec{D} = v =$	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	1,5	2	4
$\phi = 24$ $R = 12$	$4 \cdot 10^{-6}$	0,0001	0,0004	0,0016	0,0037	0,0066	0,0104	0,041	0,093	0,165	0,6
$\phi = 50$ $R = 25$	210^{-6}	0,00005	0,0002	0,0008	0,0018	0,0032	0,005	0,02	0,045	0,079	0,3
$\phi = 100$ $R = 50$	10^{-6}	0,000025	0,0001	0,0004	0,0009	0,0016	0,0025	0,01	0,0225	0,0399	0,1
$\phi = 200$ $R = 100$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$125 \cdot 10^{-6}$	0,00005	0,0002	0,00045	0,0008	0,00125	0,0049	0,0112	0,0199	0,0
Erreur $< 1 \mu$							Erreur $> 1 \mu$				

Soit le réseau de courbes donnant l'erreur $(d_i - e_i)$ en fonction du déplacement $|\vec{D}|$ du centre du cercle



En effectuant un développement limite de $\left((R + \xi_i)^2 + v^2 \right)^{\frac{1}{2}}$ et en prenant $\xi_i = 0$, l'expression (1) devient :

$$(1) \quad (d_i - e_i)_{\text{maxi}} = \frac{v^2}{2R}$$

Dans le cas où le système d'axes choisis donne une composante u différente de zéro, on obtient l'erreur maxi suivant la direction $\vec{n}$ perpendiculaire au déplacement $\vec{D}$ de module $\sqrt{u^2 + v^2}$
soit

$$(d_i - e_i)_{\text{maxi}} = \frac{v^2 + u^2}{2R}$$

cas du cercle complet.

Dans le cas de la sphère complète, on aurait de la même façon en se plaçant dans le plan w_i , C, C' l'erreur maxi donnée par la formule

$$(d_i - e_i)_{\max} = \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2R}$$

Dans le cas de portions de cercles ou de sphères on définit l'erreur en tout point w_i . Par un changement d'axe, on place l'axe $\vec{z}_i$ confondu avec $\vec{n}_i$. Si $\vec{D}_{P_i}$ est le déplacement $\vec{D}$ (u, v, w) du centre du cercle ou de la sphère projetée dans le plan perpendiculaire à $\vec{n}_i(a_i, b_i, c_i)$ on a en tout point i

$$(d_i - e_i) = \frac{|\vec{D}_{P_i}|^2}{2R} \quad \text{avec} \quad |\vec{D}_{P_i}|^2 = u^2(1-a_i^2) + v^2(1-b_i^2) + w^2(1-c_i^2)$$

soit

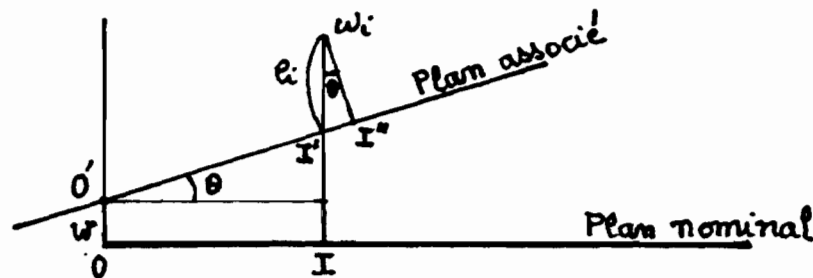
$$d_i - e_i = \frac{u^2(1-a_i^2) + v^2(1-b_i^2) + w^2(1-c_i^2)}{2R}$$

On remarque que $d_i - e_i$ est toujours positif.

b) Cas du plan

Si θ est l'angle de rotation optimisé du plan nominal pour coïncider au plan optimisé : $\theta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$

on a la figure suivante :



ξ_i : écart mesuré $w_i I$

e_i : écart optimisé $e_i = \xi_i - w - \alpha I \cdot \theta$

d_i : distance au plan associé $w_i I''$

La différence entre d_i et e_i est :

$$d_i - e_i = -e_i(1 - \cos \theta)$$

On remarque que cette différence est toujours négative.

.../...

Le tableau suivant donne les valeurs de la différence $d_i - e_i$, pour un écart e_i de 1 mm.

θ	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4
$d_i - e_i$	-0,000038	-0,00015	-0,00034	-0,0006	-0,00095	0,00137	0,0024
ERREUR $< 1\mu$						ERREUR $> 1\mu$	

On peut considérer que cette erreur est dans tous les cas, négligeable ; en effet une rotation de $2^{\circ}5$ correspond à un défaut de 1mm sur une longueur de 23 mm ce qui n'est jamais atteint dans le cas de pièces mécaniques.

D'autre part, le défaut de forme donné par les écarts e_i sera toujours donné par excès.

c) Cas général

Une surface quelconque peut être définie en tout point M_i par sa normale $m_i (a_i, b_i, c_i)$ et par une sphère osculatrice de centre C_i et de rayon R_i . Par la méthode d'optimisation proposée, on peut calculer le déplacement du centre C_i $\vec{D}_{C_i} = \vec{D}_0 + \vec{C}_i \vec{\omega} \wedge \vec{R}$. soit $\vec{D}_{C_i} (u_i, v_i, w_i)$

La différence entre la distance d_i et l'écart optimisé e_i sera celle trouvée dans le cas de la sphère :

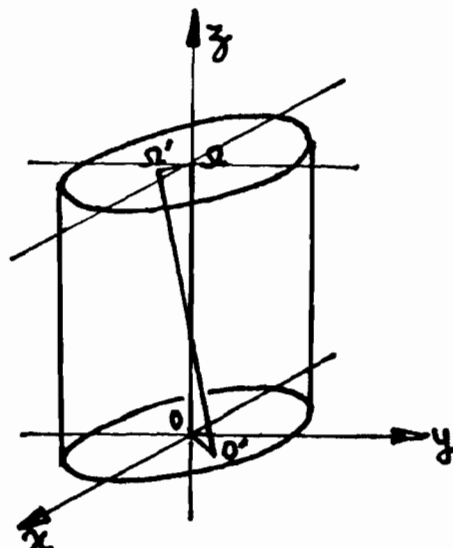
soit

$$d_i - e_i \leq \frac{u_i^2(1-a_i^2) + v_i^2(1-b_i^2) + w_i^2(1-c_i^2)}{2R}$$

d) Application de la formule générale au cylindre complet.

La sphère osculatrice de rayon R a son centre sur l'axe du cylindre.

La différence $d_i - e_i$ sera maxi pour le déplacement maxi du centre de la sphère osculatrice, soit dans le plan z maxi ou le plan z mini



L'optimisation du torseur des petits déplacements donne :

$$[\tau]_0 \begin{Bmatrix} d \\ \beta \\ 0 \\ 0 \\ \alpha \\ 0 \end{Bmatrix}$$

soient les déplacements :
au point M

$$\vec{D}_M \begin{Bmatrix} (u + z\beta) \vec{x} \\ (v - z\alpha) \vec{y} \end{Bmatrix}$$

au point O

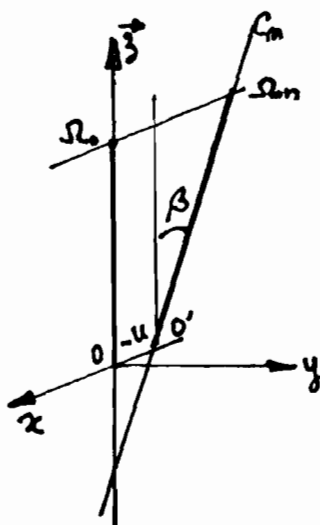
$$\vec{D}_0 \begin{Bmatrix} u \vec{x} \\ v \vec{y} \end{Bmatrix}$$

La différence $(d_i - e_i)$ maxi est :

$$(d_i - e_i)_{\max} \leq \frac{\text{Sup}[\{(u+3\beta)^2 + (v-3\alpha)^2\} \text{ et } \{u^2 + v^2\}]}{2R}$$

Vérification expérimentale :

En prenant un cylindre C_0 parfait de rayon R on lui associe un cylindre nominal C_n dont l'axe fait un angle β' avec l'axe du cylindre C_0 . Cet axe est translaté suivant $\vec{x}$ de $-u'$. On calcule alors pour le point le plus défavorable :



a) l'écart mesuré. ξ_i

b) l'écart optimisé e_i par la méthode proposée.

c) la distance exacte d_i

Les résultats sont transcrits dans le tableau suivant :

avec
$$(d_i - e_i)_{\max}^{\text{estimé}} = \frac{(u + 3\beta)^2}{2R}$$

HAUTEUR 100 mm RAYON:50								
ANGLE β'	DEPLACEMENT u'	TORSEUR OPTIMISE	ξ MESURE	e_i OPTIMISE	d_i	$(d_i - e_i)_{\max}$ CALCULÉ	$(d_i - e_i)_{\max}$ estimé par formule générale	$\vec{D}_n$ $u' + 3\beta$
0	$u' = 0,2$	$\beta = 0$ $u = 0,199998$	0,00039998	-0,000399998	0	0,00039999	0,0003999	0,2
atan 2/100 1145762	$u' = -2$	$\beta = 0,019885$ $u = 1,9986031$	0,159712	-0,1581828	$1,00210^{-6}$	0,158183	0,158976	3,987
atan 0,3/100	$u' = 0$	$\beta = 0,0029999$ $u = 0,000000675$	0,000899987	-0,00089993	$2 \cdot 10^{-10}$	0,00089993	0,00089996	0,2999
2°	$u' = 0$	$\beta = 0,034815$ $u = 0,001057$	0,1216495	-0,120695	$1,34 \cdot 10^{-6}$	0,120696	0,12128	3,4826
HAUTEUR 25 mm RAYON:10								
atan(2/25) 4573921	$u' = 0$	$\beta = 0,078387$ $u = 0,00019624$	0,19679	-0,18551846	0,000088	0,1856	0,192401072	1,96

On remarque :

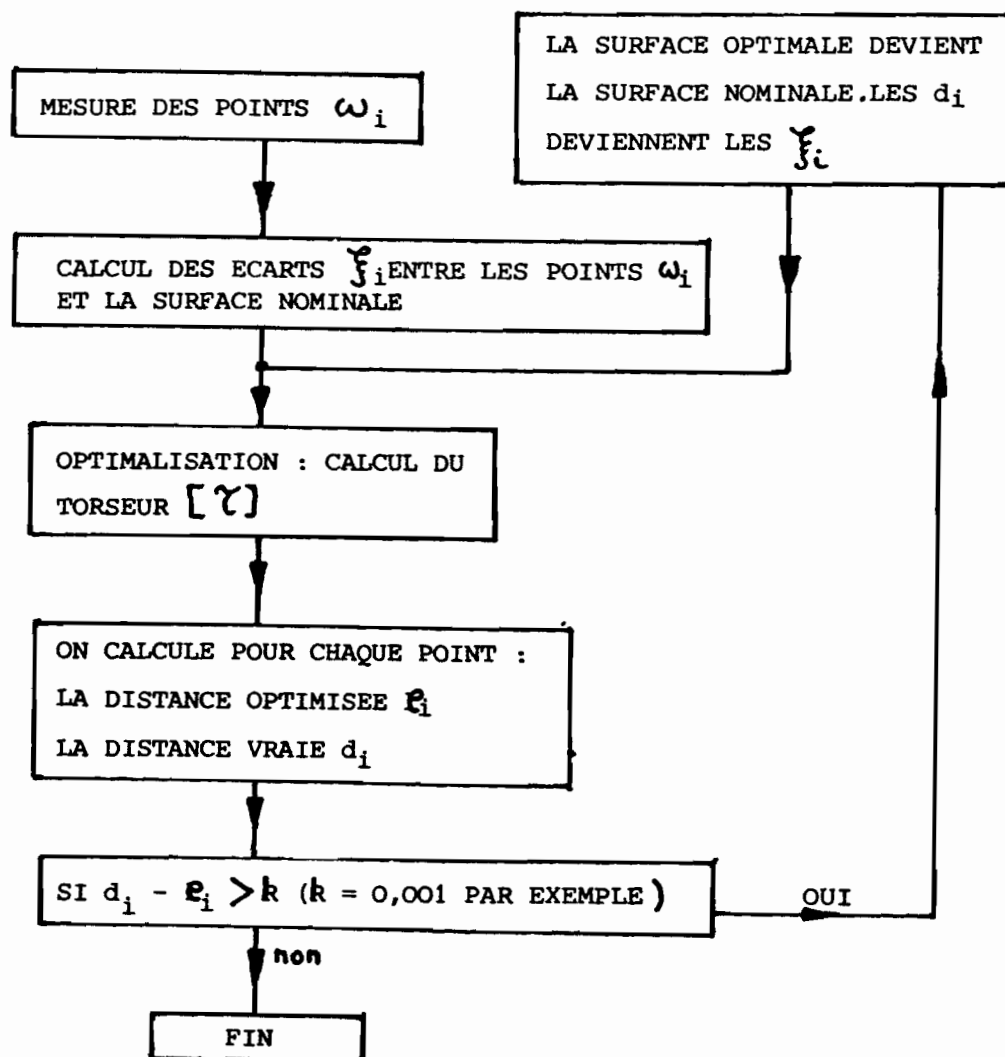
1° que la valeur estimée de $(d_i - e_i)$ est une bonne approximation de $(d_i - e_i)$ réel; moins de 0,01 pour un angle de $4^\circ 57'$.

2° que sur le plan pratique, la valeur de e_i optimisée peut être très éloignée de la valeur d_i recherchée, plusieurs dixièmes de millimètres.

d) Amélioration de l'optimisation :

- Dans le cas du plan et de la droite, on considère que e_i est une très bonne approximation des distances d_i .

- Dans tous les cas où l'on peut calculer la distance d_i entre les points de mesure ω_i et la surface optimisée, on suit l'algorithme suivant :



.../...

- Dans le cas de surfaces complexes où tout calcul de distance d_i est impossible, on estime à partir du déplacement (u_i, v_i, w_i) du centre de la sphère osculatrice de rayon R , l'erreur

$$\Delta e_i = d_i - e_i = \frac{u_i^2(1-a_i^2) + v_i^2(1-b_i^2) + w_i^2(1-c_i^2)}{2R}$$

Si le sup des erreurs $(d_i - e_i)$ est inférieur à quelques microns, on considère que les e_i sont une estimation suffisante des d_i .

Si le sup des erreurs $(d_i - e_i)$ est supérieur à quelques microns, on peut procéder de deux façons.

a) Faire subir à la pièce, un déplacement physique correspondant au torseur du petit déplacement, puis recommencer une série de mesures et de calculs.

b) Donner un résultat plus précis par excès en ajoutant aux valeurs de e_i calculées, les accroissements $(d_i - e_i) = \Delta e_i$ estimées,

et

$$\boxed{e_i = e_i + \Delta e_i}$$

.../...

CHAPITRE VIII

NOUVELLE METHODE DE DEFINITION DES REPERES ET DES PARAMETRES DE POSITION ENTRE SURFACES FABRIQUEES

I. NOUVELLE DEFINITION DES REPERES ET DES PARAMETRES GEOMETRIQUES DE POSITION

Les éléments géométriques associés aux surfaces fabriquées sont définis par :

<u>SURFACE FABRIQUEE.</u>	<u>L'ELEMENT GEOMETRIQUE ASSOCIE EST DEFINI PAR :</u>
Une petite surface	un point
une droite	une droite (donnée par les 2 points extrêmes)
un plan	un point (au centre des points palpés) une normale au plan
un cercle	un point (centre) - le rayon - la normale au plan contenant le cercle.
une sphère	un point (centre). - le rayon.
un cylindre	une droite (l'axe du cylindre donné par les 2 points extrêmes.). un rayon
un cône	une droite (l'axe du cylindre donné par le sommet et un point de la base du cône. un point le sommet le 1/2 angle au sommet

.../...

Positionner deux éléments géométriques revient à définir les distances et les angles entre les éléments point droite plan pris deux à deux.

soit 6 cas :

point-point	point-droite	point-plan
droite-droite	droite-plan	plan-plan

CALCUL DES DISTANCES ET DES ANGLES

a) Lorsque l'un des éléments est un point, la distance au deuxième élément est la distance purement géométrique.

soit

1° point 1 - point 2

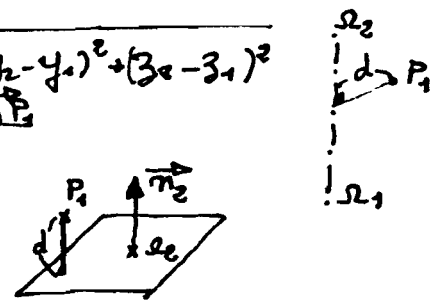
$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

2° point 1 - droite 2

$$d = \frac{|\vec{\Omega}_1 \wedge \vec{\Omega}_2 \cdot \vec{\Omega}_1 \vec{P}_2|}{|\vec{\Omega}_1 \wedge \vec{\Omega}_2|}$$

3° point 1 plan 2

$$d = |\vec{\Omega}_2 \vec{P}_1 \cdot \vec{n}_2|$$



b) Cas de combinaisons entre droites et plans :

Exemple : distance entre la droite 1 et la droite 2 appartenant à un même plan
Le modèle est donné par deux droites parallèles appartenant à un même plan.
En pratique, les deux droites associées ne sont pas tout à fait parallèles, et n'appartiennent pas tout à fait à un même plan.

La distance strictement géométrique entre les deux droites donne un résultat aberrant car elle est très éloignée de la distance désirée (on trouve une distance comprise entre 0 et la distance désirée).

Je propose une méthode générale de définition des paramètres de position d'un élément géométrique par rapport à un autre par les torseurs des petits déplacements (ou torseurs d'écarts).

Nous avons vu précédemment que la position de chaque élément géométrique associé peut-être caractérisée par un élément géométrique nominal et un torseur d'écart.

METHODE

Après avoir défini les torseurs d'écarts propres à la nature des deux éléments géométriques, on leur choisit un référentiel commun tel que sa position entraîne un maximum d'écarts nuls sur les torseurs.

Par convention (norme), on privilégie le premier élément géométrique associé. A chaque écart non nul correspond un paramètre de position.

APPLICATIONS

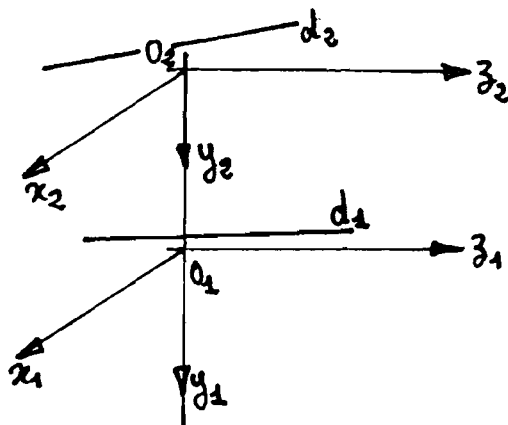
a) Paramètre entre la droite 1 et la droite 2 modélisées en deux droites parallèles

MODELE :

Les deux droites nominales z_1 et z_2 sont parallèles à une distance

l_0 ($O_1 O_2 = l_0$)

Le référentiel lié aux deux droites modèles est défini par les deux systèmes



d'axes $O_2 x_2 y_2 z_2$ et $O_1 x_1 y_1 z_1$, le vecteur $O_1 O_2$ confondu avec les axes y_1 et y_2 .

Les deux droites associées n'étant pas confondues avec les deux droites nominales z_1 et z_2 leurs positions peuvent être caractérisées par deux torseurs d'écart

$$[\tau_1] \begin{Bmatrix} d_1 \\ \beta_1 \\ 0 \\ u_1 \\ v_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad [\tau_2] \begin{Bmatrix} d_2 \\ \beta_2 \\ 0 \\ u_2 \\ v_2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

METHODE :

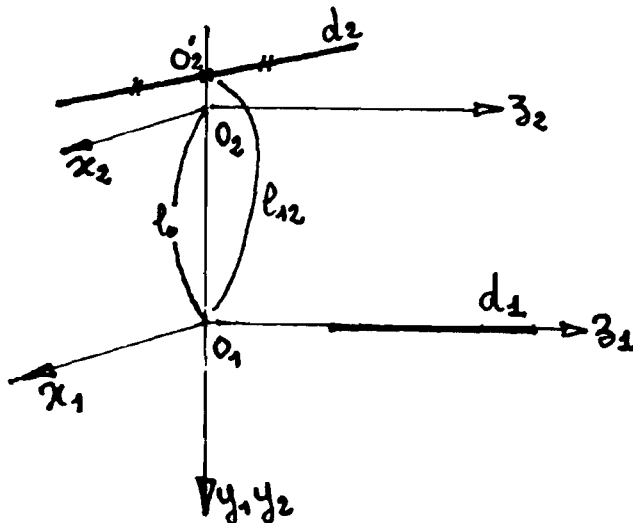
Le référentiel lié aux deux droites modèles est choisi tel que le maximum d'écarts des deux torseurs $[\tau_1]$ et $[\tau_2]$ soient nuls en privilégiant le premier élément géométrique :

l'axe z_1 est choisi confondu avec la droite associée d_1 ($d_1 = \beta_1 = u_1 = v_1 = 0$)

O_1 est la projection sur z_1 du milieu O'_2 de la droite d_2

Le point O_2 est choisi sur la droite $O_1 O'_2$ ($u_2 = 0$)

Le repère est alors entièrement défini, il reste 3 écarts non nuls d_2 , β_2 et v_2



$$[\tau_1] \begin{Bmatrix} d_1 = 0 \\ \beta_1 = 0 \\ 0 \\ u_1 = 0 \\ v_1 = 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$[\tau_2] \begin{Bmatrix} d_2 \\ \beta_2 \\ 0 \\ u_2 = 0 \\ v_2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

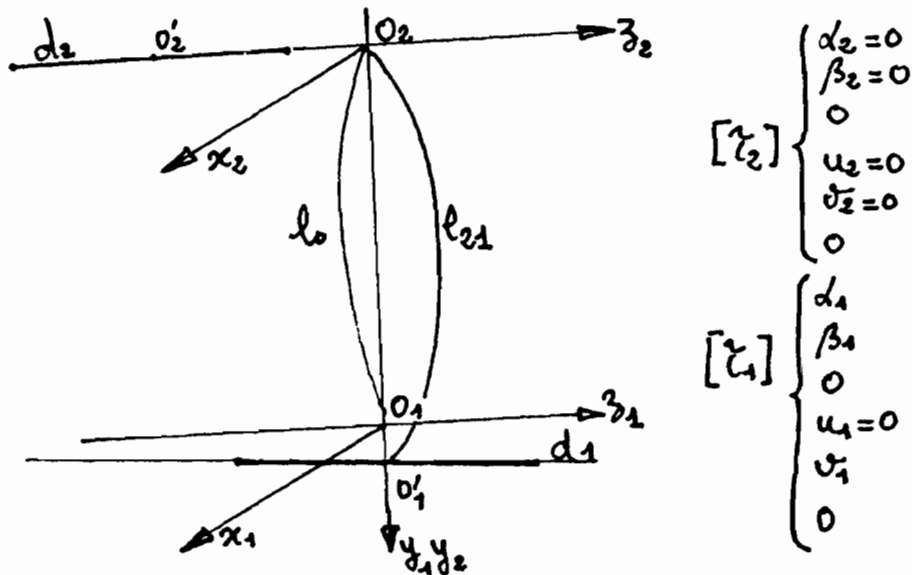
v_2, d_2, β_2 , correspondant à 3 paramètres de position : la distance nominale l_0 et deux angles nominaux autour des 2 axes x_2 et y_2 .

La métrologie donne :

une distance $l_{12} = l_0 + v_2$
deux angles $0 + d_2$
 $0 + \beta_2$

b) Paramètres entre la droite d_2 et la droite d_1

MODELE : deux droites nominales z_1 et z_2 parallèles et distantes de l_0



DEFINITION DU REPERE

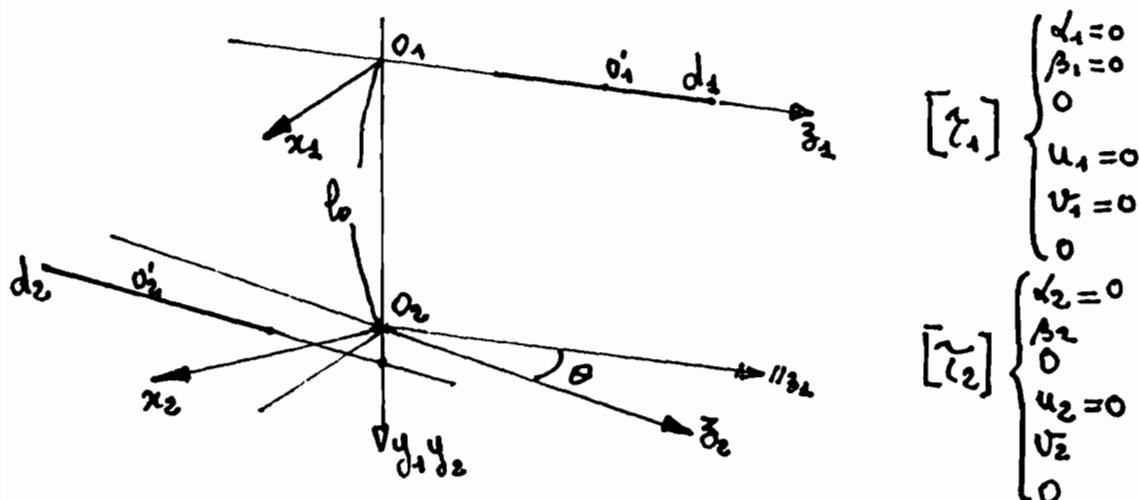
On procède de la même façon que précédemment avec la droite d_2 prise comme référence privilégiée.

La métrologie donne : une distance $l_{21} = l_0 + v_1$
deux angles $0 + d_1$
 $0 + \beta_1$

REMARQUE

Les distances l_{12} et l_{21} ainsi trouvées sont différentes.

c) Paramètres entre deux droites quelconques faisant un angle θ



MODELE

Deux droites nominales z_1 et z_2 distantes de l_0 suivant la perpendiculaire communes, faisant entre elles un angle θ .

DEFINITION DU REPERE

- z_1 confondu avec la droite associée ($\alpha_1 = \beta_1 = 0 \quad u_1 = v_1 = 0$)
- $O_1 O_2 = l_0$ sur la perpendiculaire commune aux deux droites d_1 et d_2 ($\alpha_2 = u_2 = 0$)
- O_1 sur d_1

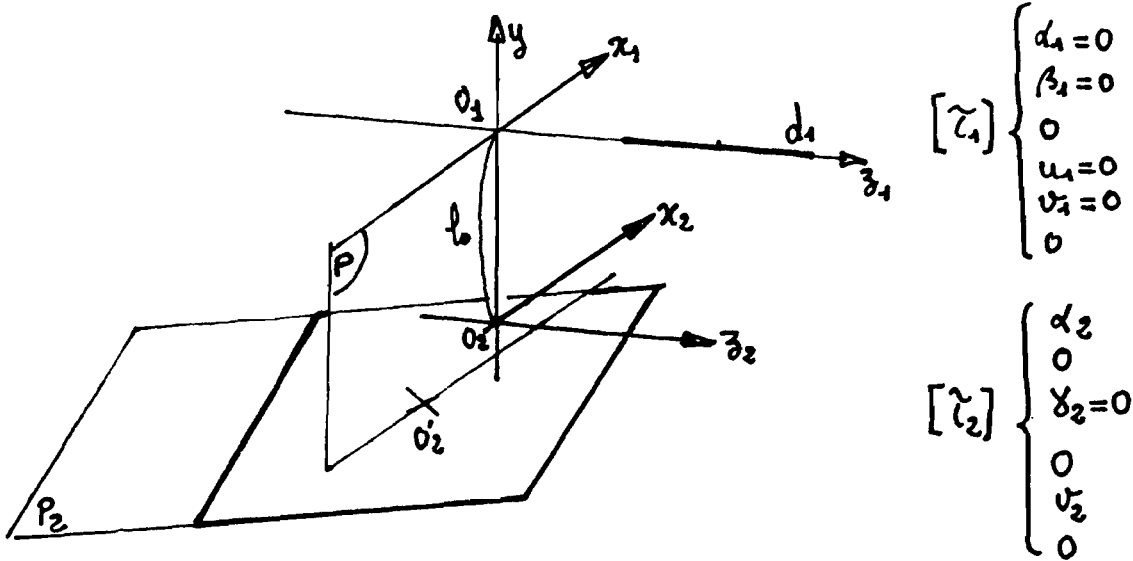
LA METROLOGIE DONNE :

- la distance $l_{12} = l_0 + v_2$
- l'angle des deux droites suivant $\vec{z}$: $\theta + \beta_3$

REMARQUE :

La distance l_{12} est égale à la distance l_{21}

d) Paramètres entre une droite 1, un plan 2 à une distance l_0



MODELE :

Une droite nominale $\vec{z}_1$ parallèle et à une distance l_0 d'un plan nominal $\vec{x}_2, \vec{z}_2$

.../...

DEFINITION DU REPERE :

axe $\vec{z}_1$ confondu avec la droite associée d_1 ($\alpha_1 = \beta_1 = u_1 = v_1 = 0$)

les axes $\vec{x}_1$ et $\vec{x}_2$ sont parallèles à l'intersection du plan P_2 du plan P passant par O'_2 et perpendiculaire à d_1 ($\gamma_2 = 0$)

O_1 est l'intersection de P et de d_1

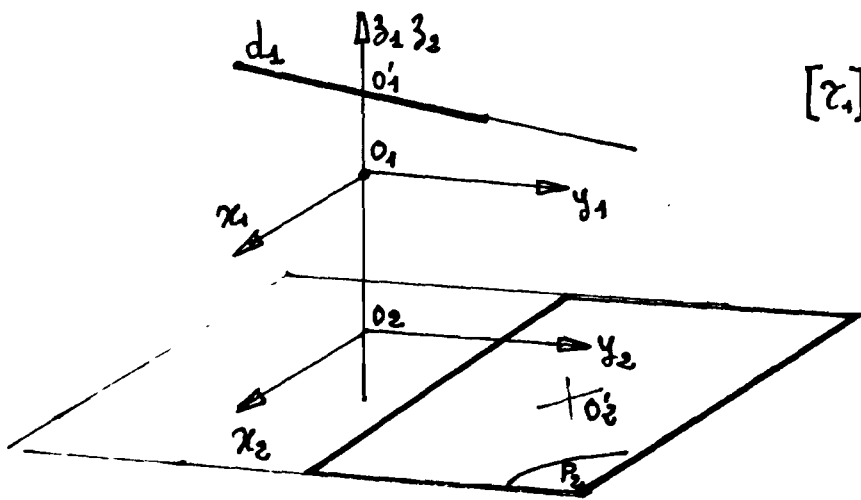
O_2 est sur la droite $(O_1 O_3)$ $\perp$ à P_2

LA METROLOGIE DONNE :

la distance entre la droite 1 et le plan P_2 : $l_{12} = l_0 + v_2$

un angle autour de $\vec{x}$: $0 + \alpha_2$

e) Paramètres entre un plan 2 et une droite 1 parallèles et à une distance nominale l_0



$$[\tau_1] \begin{cases} \alpha_1 \\ 0 \\ \gamma_1 = 0 \\ u_1 = 0 \\ 0 \\ w_1 \end{cases} \quad [\tau_2] \begin{cases} \alpha_2 = 0 \\ \beta_2 = 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_2 = 0 \end{cases}$$

O_2 projection du milieu O'_1

de d_1 sur P_2 . $\vec{z}_1 \perp$ à P_2

$O_2 O_1 = l_0$

$\vec{x}_2$ et $\vec{x}_1 \perp$ à $(\vec{d}_1, \vec{z}_1)$ ($\gamma_1 = 0$)

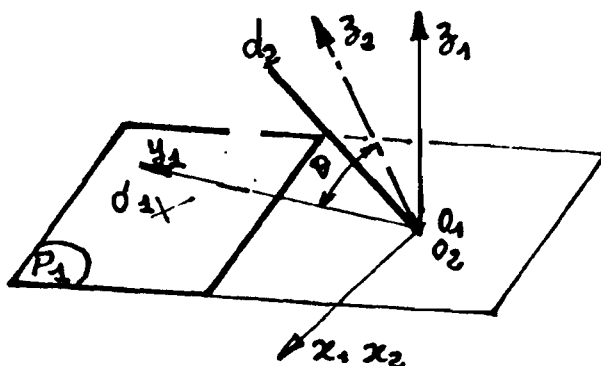
De la même façon la métrologie donnera :

la distance entre le plan 2 et la droite 1 : $l_{21} = l_0 + w_2$

un angle d'axe $\vec{x}_1$: $0 + \alpha_1$

On remarque que $l_{12} \neq l_{21}$

f) Paramètres entre un plan 1 et une droite 2 inclinée d'un angle θ



$$[\tau_1] \begin{cases} \alpha_1 = 0 \\ \beta_1 = 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_1 = 0 \end{cases} \quad [\tau_2] \begin{cases} \alpha_2 \\ \beta_2 = 0 \\ 0 \\ u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \\ 0 \end{cases}$$

MODELE : 1 Plan P_1 (x_1, y_1) et une droite (z_2) faisant un angle θ .

DEFINITION DU REPERE

P plan passant par la droite associée d_2 et perpendiculaire à P_1

O_1 intersection de d_2 et de P_1 $u_2 = v_2 = w_2 = 0$

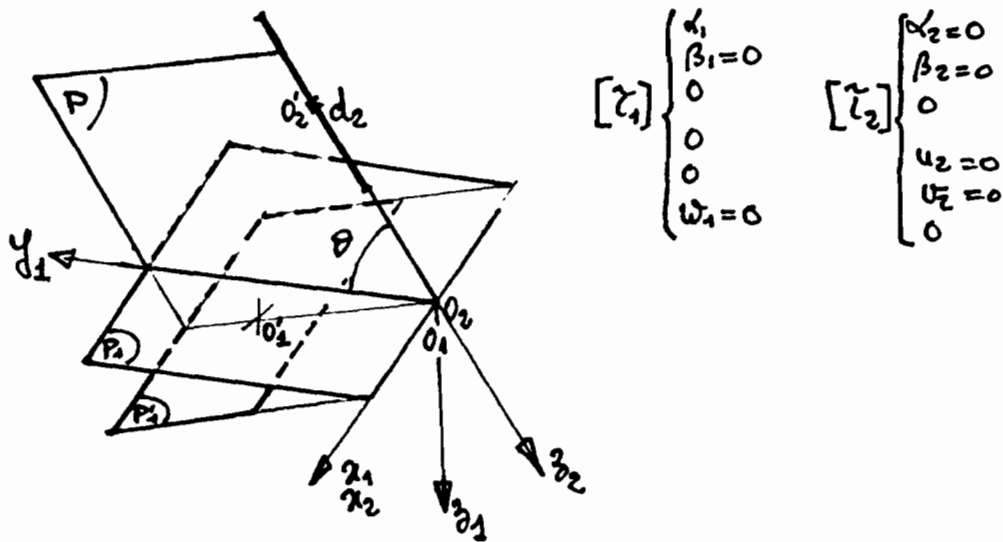
y_1 intersection de P_1 et de P $\alpha_1 = \beta_1 = 0$

$\vec{z}_1 \perp \vec{\alpha}_1$

O_1 et O_2 ; x_1 et x_2 sont confondus $\beta_2 = 0$

LA METROLOGIE DONNE : l'angle $\theta_{12} = \theta + \alpha_2$

g) Paramètres entre une droite 2 et un plan 1 inclinés d'un angle θ :



MODELE : une droite nominale $(\vec{z}_2)$ et un plan nominal $(\vec{x}_1, \vec{y}_1)$ faisant un angle θ

DEFINITION DU REPERE :

L'axe z_2 est confondu avec la droite associée d_2 : $\alpha_2 = \beta_2 = u_2 + v_2 = 0$

P plan passant par d_2 et perpendiculaire à P'_1

x_2 et x_1 confondus $[P \cap P'_1]$

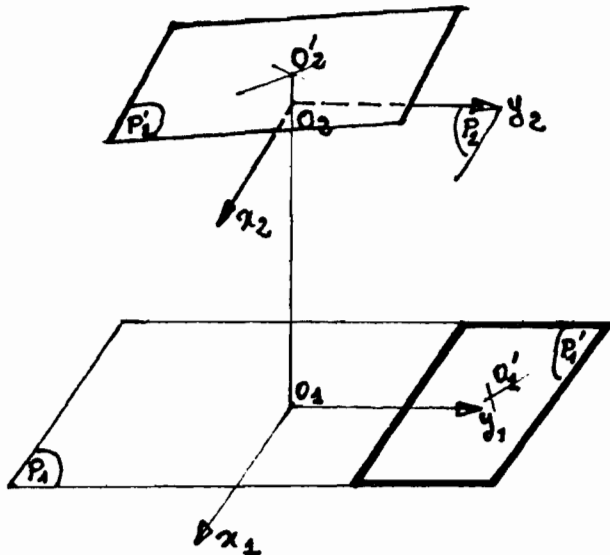
O_2 et O_1 confondus : intersection de d_2 et de P'_1 :

$$(\vec{z}_2, y_1) = \theta$$

LA METROLOGIE DONNE : l'angle $\theta_{21} = \theta + \alpha_1$. On remarque que $\theta_{12} = \theta_{21}$

.../...

h) Paramètre entre plan 1 et plan 2 parallèles à la distance l_0 :



$$[Z_1] \begin{cases} \alpha_1 = 0 \\ \beta_1 = 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega_1 = 0 \end{cases} \quad [Z_2] \begin{cases} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega_2 \end{cases}$$

MODELE : 2 Plans $(\vec{x}_1\vec{y}_1)$ et $(\vec{x}_2\vec{y}_2)$ parallèles distants de l_0

DEFINITION DU REPERE :

O_1 projection de O'_2 sur P_1 $\omega_1 = 0$

x_1 et y_1 choisis arbitrairement dans P_1 $\alpha_1 = \beta_1 = 0$

x_2 y_2 respectivement parallèles à x_1 et y_1

O_2 sur la droite O'_2O_1 avec $O_2O_1 = l_0$

LA METROLOGIE DONNE :

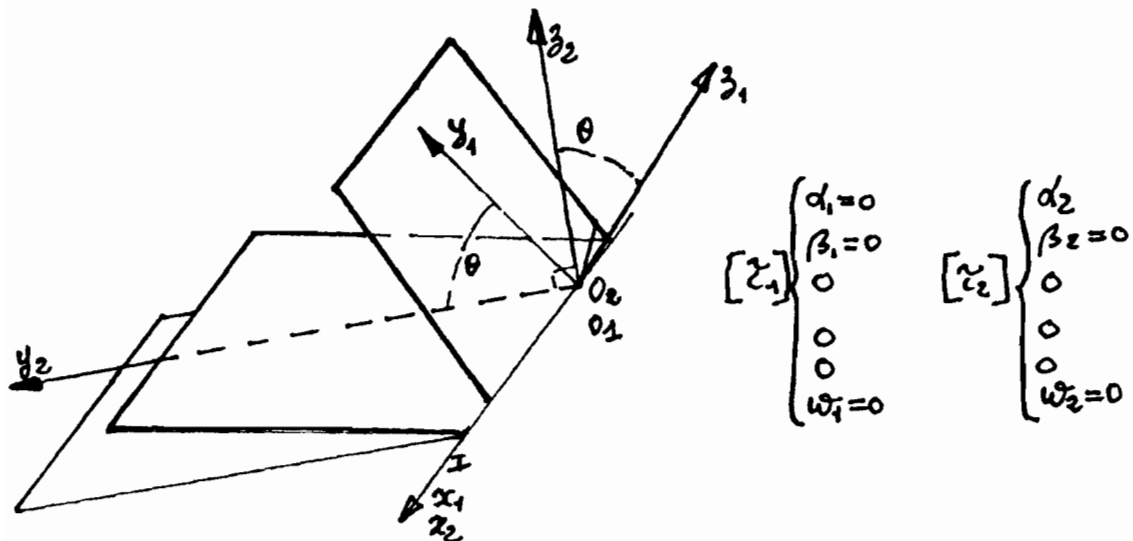
La distance entre le plan 1 et le plan 2 : $l_0 + \omega_2 = l_{12}$

l'angle d'axe $\vec{x}_2$ $0 + \alpha_2$

l'angle d'axe $\vec{y}_2$ $0 + \beta_2$

REMARQUE si l'on cherche les paramètres du plan 2 au plan 1 on procède de la même façon. On constate que la distance l_{21} ainsi trouvée est différente de la distance l_{12} précédente.

i) Paramètre entre un plan 1 et un plan 2 inclinés d'un angle



MODELE : Deux plans $(\vec{x}_1 \vec{y}_1)$ et $(\vec{x}_2 \vec{y}_2)$ faisant un angle θ

DEFINITION DU REPERE

$\vec{x}_1$ et $\vec{x}_2$ sont confondus avec l'intersection I des 2 plans ($\beta_1 = \beta_2 = 0$)

$\vec{o}_1$ et $\vec{o}_2$ confondus sont choisis sur I : ($\omega_1 = \omega_2 = 0$)

$\vec{y}_1$ est contenu dans P_1 ($\alpha_1 = 0$)

$$(\vec{y}_1, \vec{y}_2) = \theta$$

LA METROLOGIE DONNE : l'angle des deux plans $\theta_{12} = \theta + \alpha_2$

on a $\theta_{12} = \theta_{21}$

II. APPLICATION DE LA DEFINITION DES REPERES ET DES PARAMETRES DE POSITION, A LA MESURE DES TOLERANCES NORMALISEES.

a) Dans le cas où l'un des éléments géométriques est un point, il y a aucune difficulté particulière : on calcule la distance géométrique entre le point et le deuxième élément géométrique.

b) Cas de combinaisons entre droites et plans :

La tolérance de position tient compte du contour de la surface réelle.

La norme prévoit 6 tolérances de positions résumées dans le tableau suivant :

.../...

TOLERANCE	SYMBOLE	ELEMENTS GEOMETRIQUES		
Parallélisme	//	Droites	Plans	Droite et Plan
Inclinaison	∠	Droites	Plans	Droite et Plan
Perpendicularité	⊥	Droites	Plans	Droite et Plan
Position	⊕	Droites		
Coaxialité	⊙	Droites		
Symétrie	≡	Droites	Plans	Droite et Plan

PRINCIPE

Dans tous les cas le premier élément nommé sert de référence à la mesure.

METHODE

Par la méthode proposée au paragraphe précédent, on associe aux deux surfaces un repère en privilégiant le premier élément géométrique nommé. Le premier élément géométrique associé est toujours confondu avec son élément géométrique nominal (torseur des écarts nul).

Le deuxième élément géométrique nominal n'est pas confondu avec l'élément géométrique associé, leur Ecart de position est caractérisé par un torseur d'écart ; afin de tenir compte du contour de la surface réelle, on caractérise leur Ecart par l'ensemble des distances f_i entre les points mesurés (*) et l'élément géométrique nominal correspondant.

On définit alors les tolérances optimales de :

$$\left. \begin{array}{l} // \text{ parallélisme} \\ \angle \text{ inclinaison} \\ \perp \text{ perpendicularité} \end{array} \right\} \sup f_i - \inf f_i$$

$$\left. \begin{array}{l} \oplus \text{ position} \\ \odot \text{ coaxialité} \\ \equiv \text{ symétrie} \end{array} \right\} \sup [|f_i|]$$

(*) Dans le cas du cylindre et du cône, entre les deux points extrêmes de l'axe de l'élément géométrique associé et l'axe de l'élément géométrique nominal.

CHAPITRE IX

PROGRAMME DE CONTROLE AUTOMATIQUE ET TRIDIMENSIONNEL DES PIECES MECANQUES

1. PRINCIPE RETENU

A chaque pièce mécanique correspond une séquence de contrôles et par suite un programme différent. Aussi chaque programme de contrôle sera constitué à la demande par un enchaînement de modules.

Chaque module est autonome. On peut donc en améliorer les performances ou ajouter de nouveaux modules, sans désorganiser l'ensemble du programme. L'appel et l'enchaînement des différents programmes est réalisé par un programme moniteur. Ce dernier par l'intermédiaire de questions, guide l'opérateur dans l'écriture de sa gamme.

Une gamme est une succession d'opérations de contrôle, chaque opération est composée d'une succession d'instructions. L'écriture se fait donc par l'intermédiaire d'un clavier à 30 touches "instruction" associé à un clavier numérique et une touche de validation d'une opération de contrôle.

TOLERANCE	Polaire	ECART DE FORME	MILIEU	ANGLE	INTERS.
ENR. GAMME	DEGAUCH.	CONSIGNE	PALPEUR	DISTANCE	PARAMETRE
NON	FIN. APP.	QUELCONQ.	CONE	SPHERE	DROITE
OUI	REF. CN.	PLAN	CYLINDRE	CERCLE	POINT
//	∠	⊥	⊕	⊙	≡

7	8	9
4	5	6
1	2	3
0	.	—

VALIDATION

11. CHOIX DES MODULES

L'expérience et de nombreuses études de cas ont permis de classer les 56 modules en quatre groupes :

- 1°) Les modules permettant d'identifier une surface par palpé direct
- 2°) Les modules permettant de définir un élément géométrique sans palpé direct
- 3°) Les modules établissant des relations entre les éléments géométriques
- 4°) Les modules d'aide à la mise en oeuvre du programme.

A) MODULES D'IDENTIFICATION D'UNE SURFACE PAR PALPAGE DIRECT

L'instruction paramètre permet :

- de placer en mémoire les paramètres géométriques de l'élément géométrique associé aux points palpés,
- d'écrire les paramètres géométriques intrinsèques à la surface : diamètre tolérance de forme,
- et à l'aide d'une instruction particulière d'écrire les écarts de forme optimisés.

On a les 8 modules suivants :

INSTRUCTIONS	MEMOIRE	IMPRIMANTE	
			Avec Instructions Supplémentaires
Paramètre Point.	Centre de la sphère de palpé.	Rien	Coordonnées cartésiennes ou polaires
Paramètre Droite	2 points extrêmes	Tolérance de forme	Ecarts de forme optimisés.
Paramètre Plan	1 point, 1 normale.	Tolérance de forme	Ecarts de forme optimisés.
Paramètre Cercle.	Centre. rayon normale au plan de mesure.	Diamètre Tolérance de forme.	Ecarts de forme optimisés. Coord. cartésienne ou polaire du centre.

INSTRUCTIONS	MEMOIRE	IMPRIMANTE	
			Avec instructions supplément.
Paramètre cylindre	rayon. 2 points extrêmes de l'axe	diamètre tolérance de forme	Ecarts de forme optimisés.
Paramètre sphère	Centre Rayon	Diamètre Tolérance de forme.	Ecarts de forme optimisés. Coordonnées cartésiennes ou polaires du centre Diamètre dans plan jauge.
Paramètre Cône	2 points de l'axe dans l'ordre : le plus près du sommet puis celui du plan de base, l'angle au sommet.	Angle Tolérance de forme.	Ecarts de forme optimisés. Diamètre dans plan de jauge.
Paramètre Surface quelconque définie par un ensemble de points et de normales	Points mesurés et si nécessaire le repère optimisé	Les écarts de forme	Les écart de forme optimisés.

B) MODULE DE DEFINITION D'ELEMENTS GEOMETRIQUES SANS PALPAGE DIRECT :

On a les 11 modules suivants :

INTERSECTION DROITE DROITE : définition d'un point (milieu de la perpendiculaire commune).

INTERSECTION DROITE PLAN : définition d'un point

INTERSECTION PLAN PLAN : définition d'une droite

MILIEU DE DEUX POINTS : définition d'un point

MILIEU DE 2 DROITES PARALLELES d_1 ET d_2 : définition d'une nouvelle droite parallèle à d_1 et passant par le milieu de la distance entre d_1 et d_2 définie au paragraphe précédent. :

MILIEU DE DEUX PLANS PARALLELES :

Définition d'un plan passant par le milieu de la distance entre P_1 et P_2 définie au paragraphe précédent et parallèle au plan P_1 .

POINT : Définition d'un point à une distance $\pm d$ d'un plan de référence.

Définition d'un point $x y z$ dans un repère R orienté.

DROITE : Définie par :

n points

un point et perpendiculaire à un plan

un point et parallèle à une droite

un axe machine

tangente à deux cercles

un point $(x y z)$ une direction $(a b c)$ dans un repère R

PLAN : défini par :

n points numérotés

une droite et perpendiculaire à un plan

un point et perpendiculaire à une droite

un point et parallèle à un plan

plan de jauge d'une sphère

plan de jauge d'un cône

CERCLE : par n points numérotés

par n points projetés dans un plan

SPHERE : par n points numérotés.

C) MODULES ETABLISSANT DES RELATIONS ENTRE LES ELEMENTS GEOMETRIQUES (26 modules).

<u>DISTANCE</u>	: entre deux éléments géométriques (8 modules)
<u>ANGLE</u>	: entre deux éléments géométriques (3 modules)
<u>TOLERANCE DE //</u>	: entre deux éléments géométriques (4 modules)
<u>TOLERANCE DE $\angle$</u>	} : entre deux éléments géométriques compatibles (4 modules).
<u>TOLERANCE DE $\perp$</u>	
<u>TOLERANCE DE $\parallel$</u>	} : entre deux éléments géométriques droites (1 module)
<u>TOLERANCE DE $\odot$</u>	
<u>TOLERANCE DE $\equiv$</u>	: entre deux éléments géométriques compatibles (3 modules).

DEGAUCHISSAGE

: définition d'un plan de projection ou d'un ,
deux ou trois axes de projection avec ou sans
origine.

Les coordonnées d'un point et les distances sont
alors données en projection dans un plan ou un
deux ou trois axes de projection.

POLAIRE

: résultat en coordonnée polaire dans un plan par
rapport à un 1/2 axe orienté.

ZERO PALPEUR

: entrée du (des) Ø palpeur (s)
permet de faire le (ou les) séro(s) palpeur
par palpation d'une sphère.

D) MODULES D'AIDE A LA MISE EN OEUVRE DU PROGRAMME (11 modules)

EDITION

: écriture sur l'imprimante de la gamme.

ENREGISTREMENT

: enregistrement sur cassette de la gamme.

CONSIGNE

: comparaison des résultats à une valeur affichée.

OUI

: - réponse à une question.
- demande l'exécution de la gamme déjà écrite.

NON

: - réponse à une question.
- supprime la dernière instruction.

REFERENCE CN

: après avoir défini un référentiel pièce, on peut :
- en mode apprentissage : enregistrer les points
de déplacement du palpeur lors de la mesure de
la première pièce.
- en mode métrologie automatique : commander les
déplacements du palpeur.

FIN D'APPRENTISSAGE.

SAUVEGARDE
et
REPRISE



: permet l'arrêt et la reprise de la machine et
du calculateur en cours d'exécution ou d'écriture
d'une gamme.

III. STRUCTURE D'UN MODULE

Chaque module est structuré en trois parties . Chaque partie sera ou non exécutée suivant le mode dans lequel le programme est initialisé :

- a) Ecriture d'une gamme sans exécution immédiate.
- b) Ecriture d'une gamme avec exécution simultanée.
- c) Exécution d'une gamme déjà écrite.

A) PREMIERE PARTIE :

Ecriture d'une opération de gamme. Guidé, par une série de questions, l'opérateur introduit une suite de données formant une phrase nécessaire à l'exécution de l'opération.

EXEMPLES :

On désire la distance entre une droite 4 et un plan sans numéro

ECRAN CALCULATEUR	CLAVIER OPERATEUR	IMPRIMANTE THERMIQUE CALCULATEUR
Attente instruction	Consigne	
Premier élément géométrique	Distance Droite	Distance Droite
A-t-il un numéro ?	4	4
Deuxième élément géométrique	Plan	Plan
A-t-il un numéro ?	Non	12
Instruction correcte	Oui	
Cote nominale	58,5	
Ecart Maxi	0,1	
Ecart Mini	- 0,2	

Phrase correspondante :

CODE DISTANCE	CODE NATURE	N°	CODE Nature	N°	DISTANCE NOMINAL	ECART MAXI	ECART MINI	N° PALP.
	ELEMENT 1		ELEMENT 2					

On désire le paramètre d'un cylindre sans numéro

ECRAN CALCULATEUR	CLAVIER OPERATEUR	IMPRIMANTE THERMIQUE CALCULATEUR
Attente instruction	Consigne	Consigne
Elément géométrique	Paramètre cylindre	PARAMETRE CYLINDRE
A-t-il un numéro ?	Non	13
Instruction correcte	Oui	
L'axe du cylindre est-il parallèle à :		
OX ?	Non	
OY ?	Non	
OZ ?	Non	
Perpendiculaire à un plan	Oui	
A-t-il un numéro	Oui	
Lequel	3	
Numéro du palpeur	4	
Nombre de points de mesure	12	
Rayon nominal	35	
Ecart Maxi	- 0,03	
Ecart Mini	- 0,006	

Phrase correspondante :

CODE PARAMETRE	CODE NATURE ELEMENT GEOMETRIQUE.	N°	CODE DIRECTION DE L'AXE	COTE NOM.	ECART MAXI	ECART MINI	N° PALP.	NBRE DE POINTS DE MESURE
-------------------	---	----	-------------------------------	--------------	---------------	---------------	-------------	-----------------------------------

B) DEUXIEME PARTIE :

Vérification dans le tableau des paramètres des surfaces si les surfaces désignées dans l'opération ont été palpées. Si non, appel du module paramètre correspondant et ordre d'exécution des mesures. (en manuel ou en automatique).

C) TROISIEME PARTIE :

Exécution de l'instruction demandée et écriture des résultats. (en mémoire et sur le listing).

EXEMPLE DE COMPTE-RENDU :

```

*****
*NO* OPERATION * RESULTAT *COTE NOM * TOL MAX * TOL MIN *ECART * *
*****
* 1* PALPEUR * * * * *
* * CTE 1 * 1.980* * * *
* * DIAMETRE SPHERE REFERENCE 59.994 * *
* * * * *
* 2*PARAMETRE PL 1*DF 0.088* * * *
* * * * *
* 3*PARAMETRE CY 2*DF 0.035* * * *
* * *D 9.060* * * *
* * * * *
* 4*PARAMETRE CY 3*DF 0.049* * * *
* * *D 9.152* * * *
* * * * *
* 5*PARAMETRE CY 4*DF 0.026* * * *
* * *D 10.018* * * *
* * * * *
* 6*PARAMETRE CY 5*DF 0.050* * * *
* * *D 10.008* * * *
* * * * *
* 7*PL 1 INT. CY 2*POINT 6* * * *
* * * * *
* 8*PL 1 INT. CY 3*POINT 7* * * *
* * * * *
* 9*PL 1 INT. CY 4*POINT 8* * * *
* * * * *
*10*PL 1 INT. CY 5*POINT 9* * * *
* * * * *
*11*DEF.THEO. DR10* PT 6 PT 9* * * *
* * * * *
*12*DEF.THEO. DR11* PT 8 PT 9* * * *
* * * * *
*13*DR10 DIST DR11*DE 12.931* 13.000* 0.100* -0.100*-0.069*OK*
* * * * *
*14*PT 6 DIST PT 7*DE 104.104* 104.000* 0.100* -0.100* 0.104*HT*
* * * * *
*15*DEGAUCHISSAGE *PROJECTIONS SUR LES AXES X,Y,Z *
* * *PT ORIG. 6* * * *
* * * * *
*16*PARAMETRE PT 8* * * *
* * *X 0.000* * * *
* * *Y 219.046* * * *
* * *Z 12.705* * * *
* * * * *
*17*PT 6 DIST PT 8*Dx 0.000* 0.000* 0.100* -0.100* 0.000*OK*
* * *DY 219.046* 219.000* 0.100* -0.100* 0.046*OK*
* * *DZ 12.705* 13.000* 0.100* -0.100*-0.295*HT*
* * * * *
*18*PT 6 DIST PT 9*Dx 0.000* 0.000* 0.100* -0.100* 0.000*OK*
* * *DY 114.981* 115.000* 0.100* -0.100*-0.019*OK*
* * *DZ 13.158* 13.000* 0.100* -0.100* 0.158*HT*
* * * * *
*19*DR10 ANG. DR11*T 0.078* 0.000* 2.000* -2.000* 0.078*OK*
* * * * *

```

IV. RÔLE DU MONITEUR ET GAMME DE METROLOGIE

La gamme se compose d'une succession ordonnée d'opérations. Chaque opération représentée par une phrase, est stockée sur disquette.

Le moniteur a pour but de lire dans l'ordre les opérations introduites au clavier ou par la disquette. Pour chaque opération, il décode la première instruction puis vérifie si les deuxième et troisième instructions sont compatibles puis appelle le module correspondant pour être exécuté. L'exécution terminée, le moniteur recommence avec l'opération suivante et ainsi de suite jusqu'à la fin de la gamme.

V. CONCLUSION

Ce programme a été développé industriellement en collaboration avec l'A.D.E.P.A. et S.E.I.V. automation du groupe RENAULT. Il comporte 30 000 instructions FORTRAN.

Implanté sur les machines à mesurer MMT, le programme semble répondre parfaitement aux besoins des utilisateurs (plus de 40 dans le monde). Il se confirme que sa précision, sa fidélité dans les résultats et sa facilité d'utilisation en font le programme le plus performant actuellement, sur le marché mondial (Etude comparative entre DEA - SEIV - ZEISS.)

ANNEXE I

LISTE DES REALISATIONS INDUSTRIELLES REFERENCEES DANS LE TEXTE

=====

- 1 SNECMA Ferrure du moteur Olympus équipant le Concorde.
- 2 Industries des tubes.
Industrie de la chaussure : réalisation d'un moule métallique à partir d'un modèle.
Atelier d'outillages, spécialisé dans la réalisation de moules métalliques et de matrices.
- 3 Contrôle d'un carter de boîte de vitesse R6 18 h (RENAULT).
Contrôle d'un porte fusée de train avant 8 h.
- 4 CREUSOT-LOIRE Usinage de grosses pièces de fonderie.
- 5 Contrôle de dents d'engrenages R.N.U.R.
- 6 Contrôle de réflecteurs de phares de voiture CIBIÉ.
- 7 Contrôle d'un villebrequin (R.N.U.R.).
- 8 MESSIAN-CITROEN. Fabrication d'engrenages de grande dimension.
L'usinage étant très long, on est amené à démonter et à remonter la pièce en cours d'usinage afin de libérer la M.O.
- 9 TAYLOR OBSON. TALYROND.

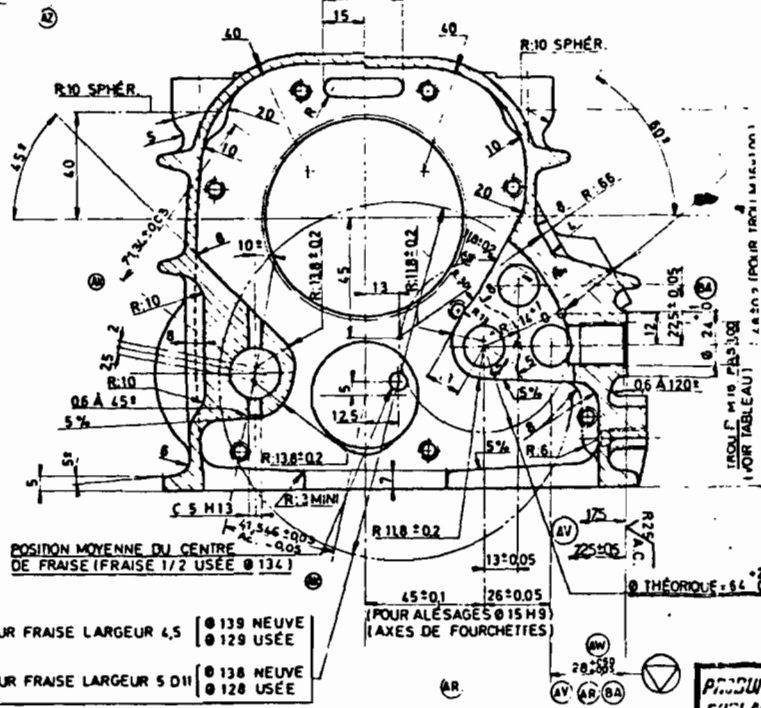
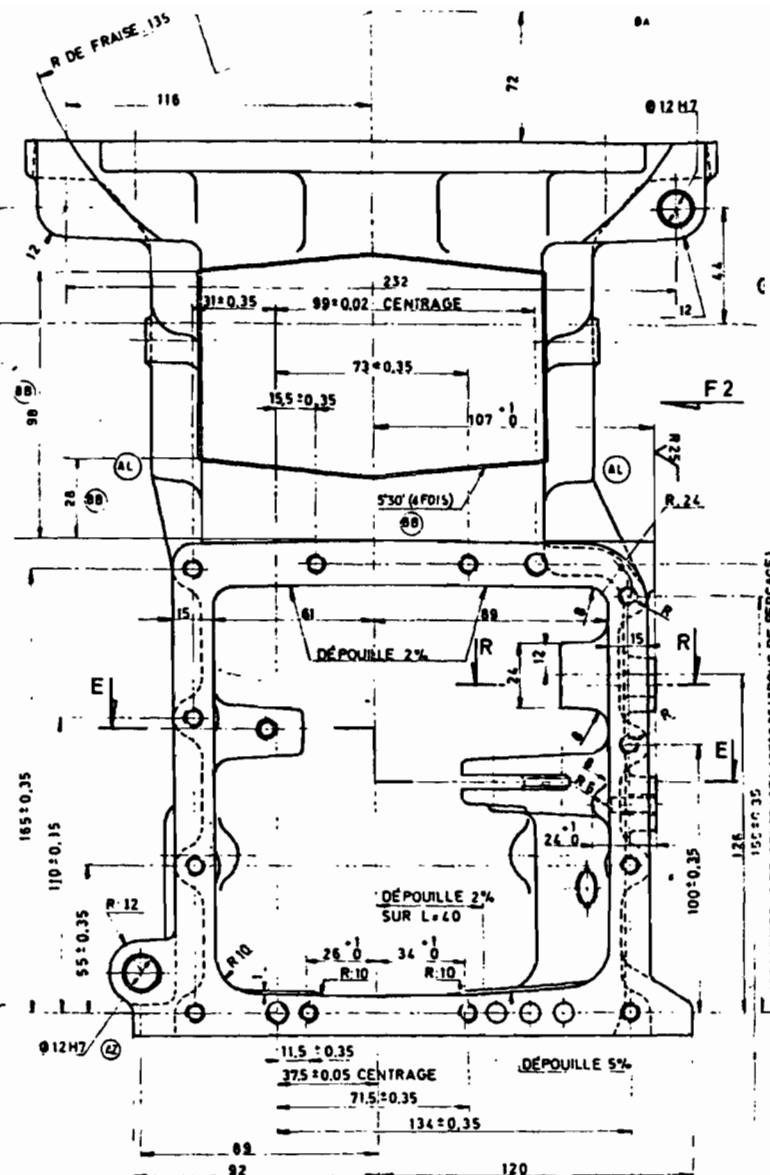
=====

ANNEXE II

BIBLIOGRAPHIE

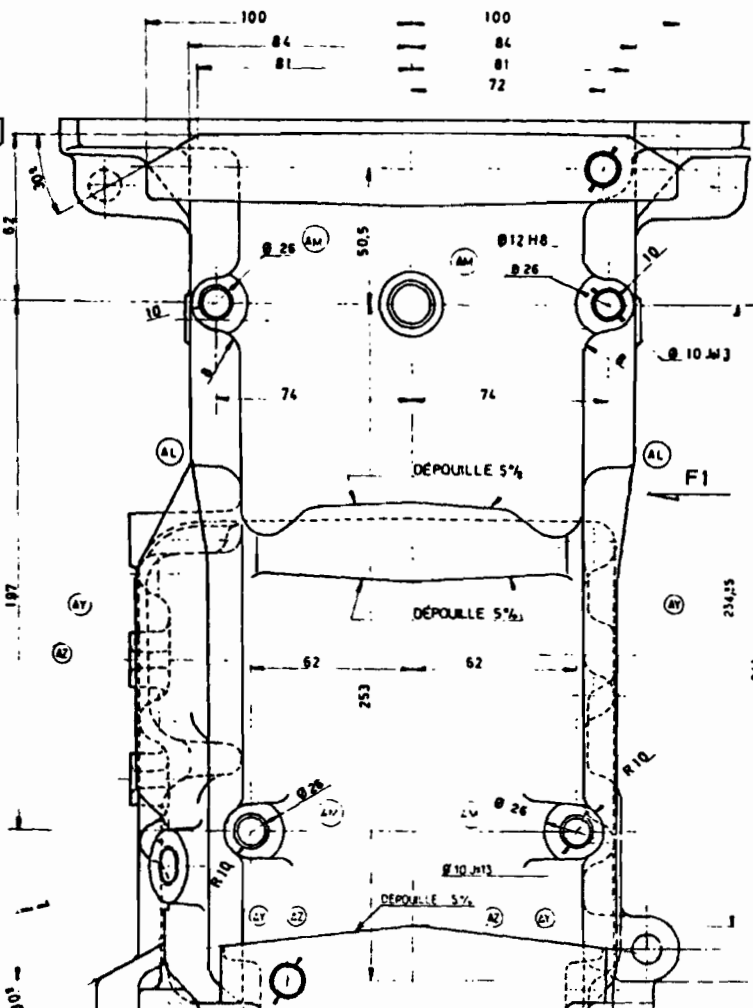
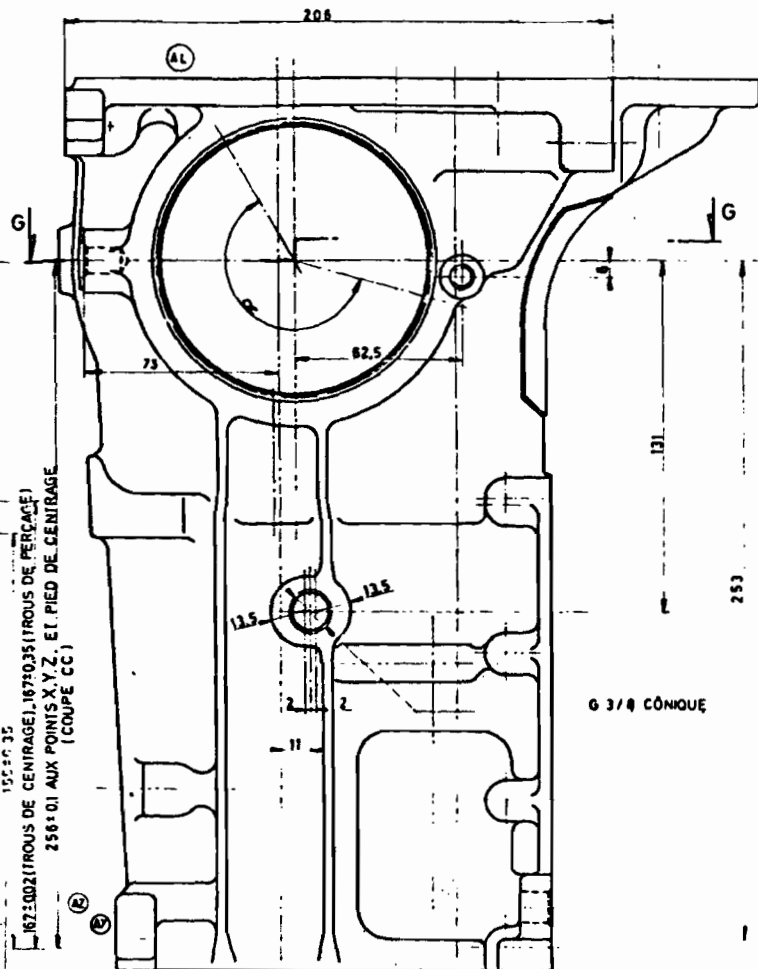
- 10 Norme Française NFE 04-121. Tolérances de forme et de position.
- 11 Norme Française NF E 60-100. Dispositions générales pour le contrôle de la précision.
- 12 R. BOUDET. Mobilité. Ingénieur et Technicien de l'E.T. 6. 1972.
- 13 M. BASSIERE - M. GAGNEBET. Métrologie générale. DUNOD. 1966.
- 14 P. BOURDET - A. CLEMENT. Optimisation des montages d'usinage. Contrat de Recherche D.R.M.E. 1972/811.
- 15 P. BOURDET - A. CLEMENT. Métrologie automatique. Journée du G.A.M.I. Mai 1975;
- 16 P. BOURDET. Chaînes de cotes de fabrication : Modèles. Ingénieur et Technicien de l'E.T. Décembre 1973.
- 17 P. BOURDET. Chaînes de cotes de fabrication : Mode opératoire.
- 18 W. DE BRUIN - J. MEIDER - A. NAWIJN. Surface plate measurements. C.I.R.P. Annals 1977.
- 19 WIRTZ - C. RINNER. A contribution on two dimensional measurement of workpieces.
- 20 P. BOURDET - A. CLEMENT. Controlling a Complex Surface with a 3 Axis Measuring Machine. C.I.R.P. ANNALS. 1976.
- 21 P. BOURDET - A. CLEMENT. Automatisation du contrôle tridimensionnel des pièces mécaniques. 2ème Journée Nationale de la Production Automatisée 6 Juin 1978.
- 22 P. BOURDET - A. CLEMENT. A Program to Aid Measurement on a Three Dimensional Measuring Machine. C.I.R.P. HAIFA. Juillet 1978.

=====

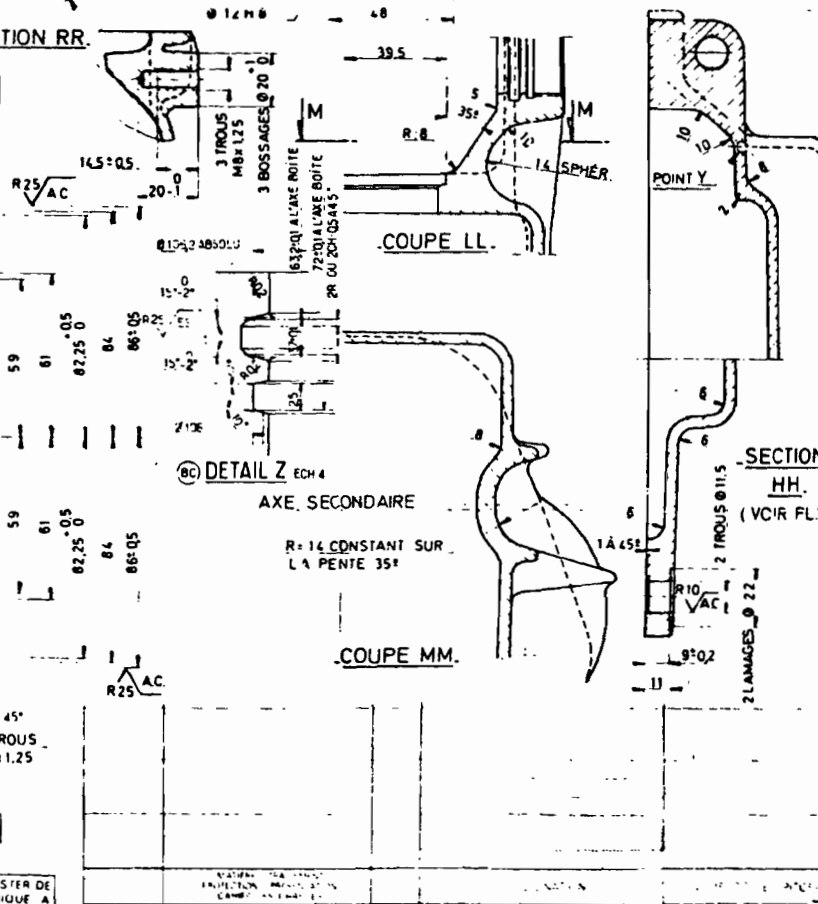
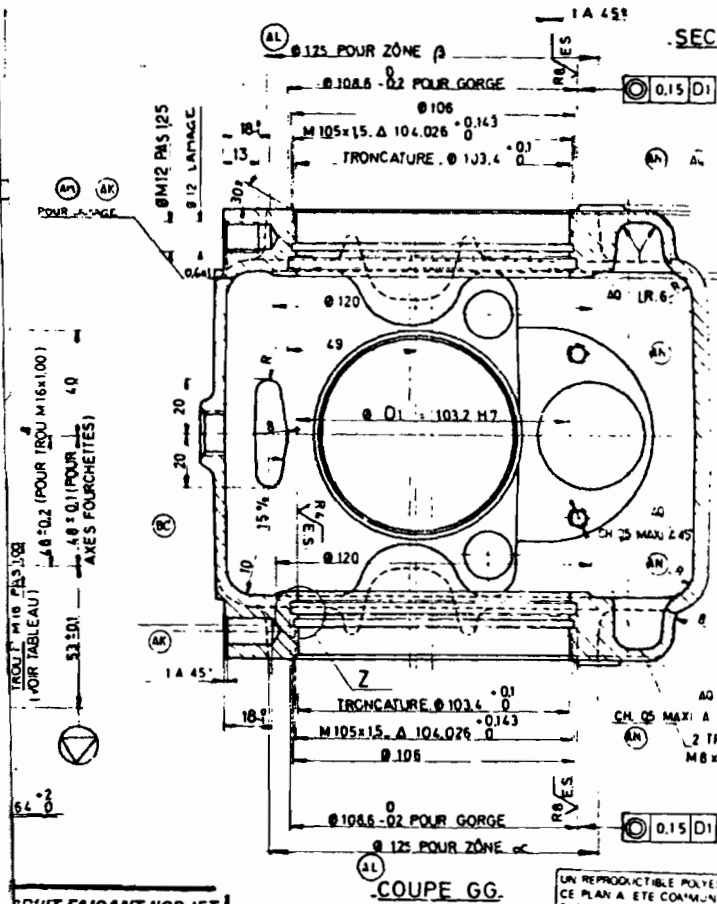


62720991ben 1272095ben 1272091ben 1272085ben 1272077ben 1272071ben 1272065ben 1272059ben 1272053ben 1272047ben 1272041ben 1272035ben 1272029ben 1272023ben 1272017ben 1272011ben 1272005ben 1271999ben 1271993ben 1271987ben 1271981ben 1271975ben 1271969ben 1271963ben 1271957ben 1271951ben 1271945ben 1271939ben 1271933ben 1271927ben 1271921ben 1271915ben 1271909ben 1271903ben 1271897ben 1271891ben 1271885ben 1271879ben 1271873ben 1271867ben 1271861ben 1271855ben 1271849ben 1271843ben 1271837ben 1271831ben 1271825ben 1271819ben 1271813ben 1271807ben 1271801ben 1271795ben 1271789ben 1271783ben 1271777ben 1271771ben 1271765ben 1271759ben 1271753ben 1271747ben 1271741ben 1271735ben 1271729ben 1271723ben 1271717ben 1271711ben 1271705ben 1271699ben 1271693ben 1271687ben 1271681ben 1271675ben 1271669ben 1271663ben 1271657ben 1271651ben 1271645ben 1271639ben 1271633ben 1271627ben 1271621ben 1271615ben 1271609ben 1271603ben 1271597ben 1271591ben 1271585ben 1271579ben 1271573ben 1271567ben 1271561ben 1271555ben 1271549ben 1271543ben 1271537ben 1271531ben 1271525ben 1271519ben 1271513ben 1271507ben 1271501ben 1271495ben 1271489ben 1271483ben 1271477ben 1271471ben 1271465ben 1271459ben 1271453ben 1271447ben 1271441ben 1271435ben 1271429ben 1271423ben 1271417ben 1271411ben 1271405ben 1271399ben 1271393ben 1271387ben 1271381ben 1271375ben 1271369ben 1271363ben 1271357ben 1271351ben 1271345ben 1271339ben 1271333ben 1271327ben 1271321ben 1271315ben 1271309ben 1271303ben 1271297ben 1271291ben 1271285ben 1271279ben 1271273ben 1271267ben 1271261ben 1271255ben 1271249ben 1271243ben 1271237ben 1271231ben 1271225ben 1271219ben 1271213ben 1271207ben 1271201ben 1271195ben 1271189ben 1271183ben 1271177ben 1271171ben 1271165ben 1271159ben 1271153ben 1271147ben 1271141ben 1271135ben 1271129ben 1271123ben 1271117ben 1271111ben 1271105ben 1271099ben 1271093ben 1271087ben 1271081ben 1271075ben 1271069ben 1271063ben 1271057ben 1271051ben 1271045ben 1271039ben 1271033ben 1271027ben 1271021ben 1271015ben 1271009ben 1271003ben 1270997ben 1270991ben 1270985ben 1270979ben 1270973ben 1270967ben 1270961ben 1270955ben 1270949ben 1270943ben 1270937ben 1270931ben 1270925ben 1270919ben 1270913ben 1270907ben 1270901ben 1270895ben 1270889ben 1270883ben 1270877ben 1270871ben 1270865ben 1270859ben 1270853ben 1270847ben 1270841ben 1270835ben 1270829ben 1270823ben 1270817ben 1270811ben 1270805ben 1270799ben 1270793ben 1270787ben 1270781ben 1270775ben 1270769ben 1270763ben 1270757ben 1270751ben 1270745ben 1270739ben 1270733ben 1270727ben 1270721ben 1270715ben 1270709ben 1270703ben 1270697ben 1270691ben 1270685ben 1270679ben 1270673ben 1270667ben 1270661ben 1270655ben 1270649ben 1270643ben 1270637ben 1270631ben 1270625ben 1270619ben 1270613ben 1270607ben 1270601ben 1270595ben 1270589ben 1270583ben 1270577ben 1270571ben 1270565ben 1270559ben 1270553ben 1270547ben 1270541ben 1270535ben 1270529ben 1270523ben 1270517ben 1270511ben 1270505ben 1270499ben 1270493ben 1270487ben 1270481ben 1270475ben 1270469ben 1270463ben 1270457ben 1270451ben 1270445ben 1270439ben 1270433ben 1270427ben 1270421ben 1270415ben 1270409ben 1270403ben 1270397ben 1270391ben 1270385ben 1270379ben 1270373ben 1270367ben 1270361ben 1270355ben 1270349ben 1270343ben 1270337ben 1270331ben 1270325ben 1270319ben 1270313ben 1270307ben 1270301ben 1270295ben 1270289ben 1270283ben 1270277ben 1270271ben 1270265ben 1270259ben 1270253ben 1270247ben 1270241ben 1270235ben 1270229ben 1270223ben 1270217ben 1270211ben 1270205ben 1270199ben 1270193ben 1270187ben 1270181ben 1270175ben 1270169ben 1270163ben 1270157ben 1270151ben 1270145ben 1270139ben 1270133ben 1270127ben 1270121ben 1270115ben 1270109ben 1270103ben 1270097ben 1270091ben 1270085ben 1270079ben 1270073ben 1270067ben 1270061ben 1270055ben 1270049ben 1270043ben 1270037ben 1270031ben 1270025ben 1270019ben 1270013ben 1270007ben 1269991ben 1269985ben 1269979ben 1269973ben 1269967ben 1269961ben 1269955ben 1269949ben 1269943ben 1269937ben 1269931ben 1269925ben 1269919ben 1269913ben 1269907ben 1269901ben 1269895ben 1269889ben 1269883ben 1269877ben 1269871ben 1269865ben 1269859ben 1269853ben 1269847ben 1269841ben 1269835ben 1269829ben 1269823ben 1269817ben 1269811ben 1269805ben 1269799ben 1269793ben 1269787ben 1269781ben 1269775ben 1269769ben 1269763ben 1269757ben 1269751ben 1269745ben 1269739ben 1269733ben 1269727ben 1269721ben 1269715ben 1269709ben 1269703ben 1269697ben 1269691ben 1269685ben 1269679ben 1269673ben 1269667ben 1269661ben 1269655ben 1269649ben 1269643ben 1269637ben 1269631ben 1269625ben 1269619ben 1269613ben 1269607ben 1269601ben 1269595ben 1269589ben 1269583ben 1269577ben 1269571ben 1269565ben 1269559ben 1269553ben 1269547ben 1269541ben 1269535ben 1269529ben 1269523ben 1269517ben 1269511ben 1269505ben 1269499ben 1269493ben 1269487ben 1269481ben 1269475ben 1269469ben 1269463ben 1269457ben 1269451ben 1269445ben 1269439ben 1269433ben 1269427ben 1269421ben 1269415ben 1269409ben 1269403ben 1269397ben 1269391ben 1269385ben 1269379ben 1269373

.VUE SUIVANT F1.



SECTION RR.



**SCUT FAISANT L'OBJET
D'UN AGREMENT OFFICIEL**

UN REPRODUCTIBLE POLYESTER DE
CE PLAN A ETE COMMUNIQUE A
FASA
L'ORIGINAL NE DOIT MÊME ETRE MODIFIE
SANS CONSULTER LE BE FASA

614	AL 48	336 206
CHANGE & L'AVANCE	DANS COUPE GG	
+ 26 F. TANT	RETS, ETAT 1122	
+ 25	MISE A JOUR DES	
CHANGE L'AVANCE	AUTRES VUES	
11012 ETAT CHAN	VONS PL 1/2	
REFORME 1445		
EFFRANC 810.113		
73.1 C 50 P	LE 2642.72	
DUCE 11 C 25 1/2		F. CARRÉ

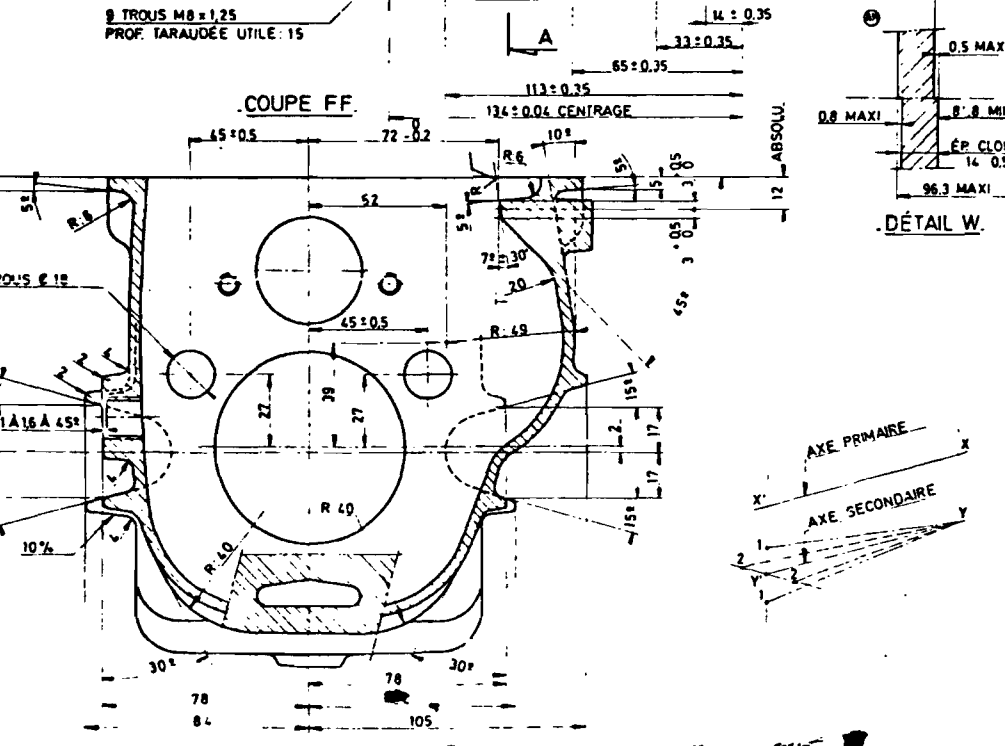
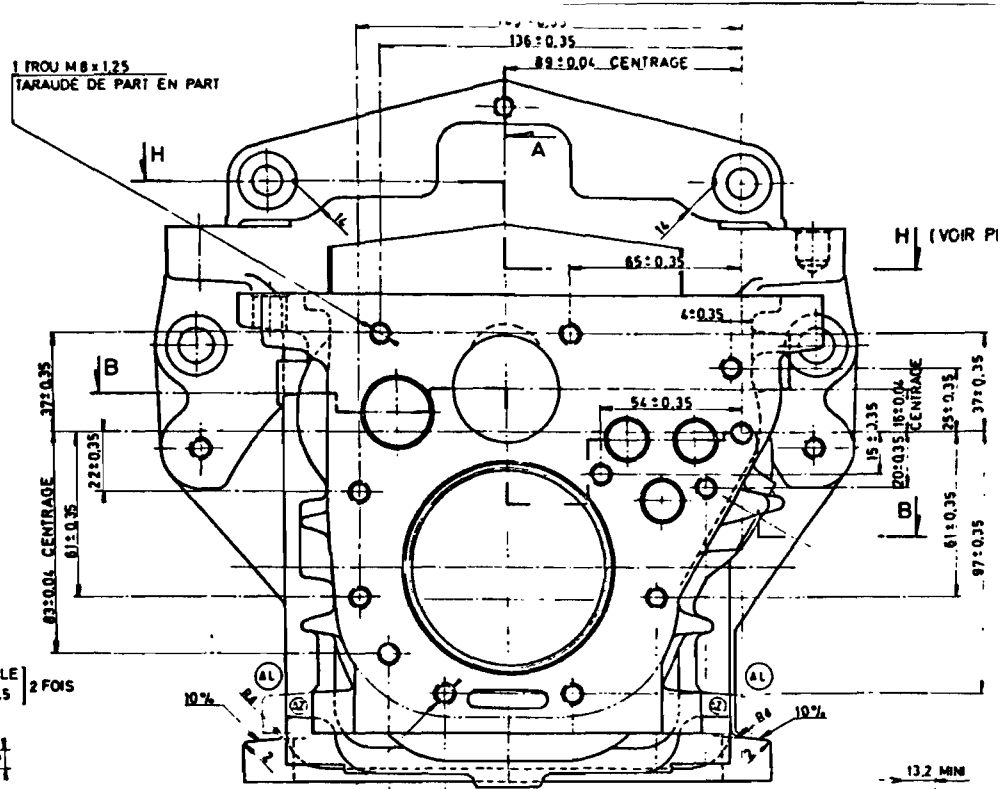
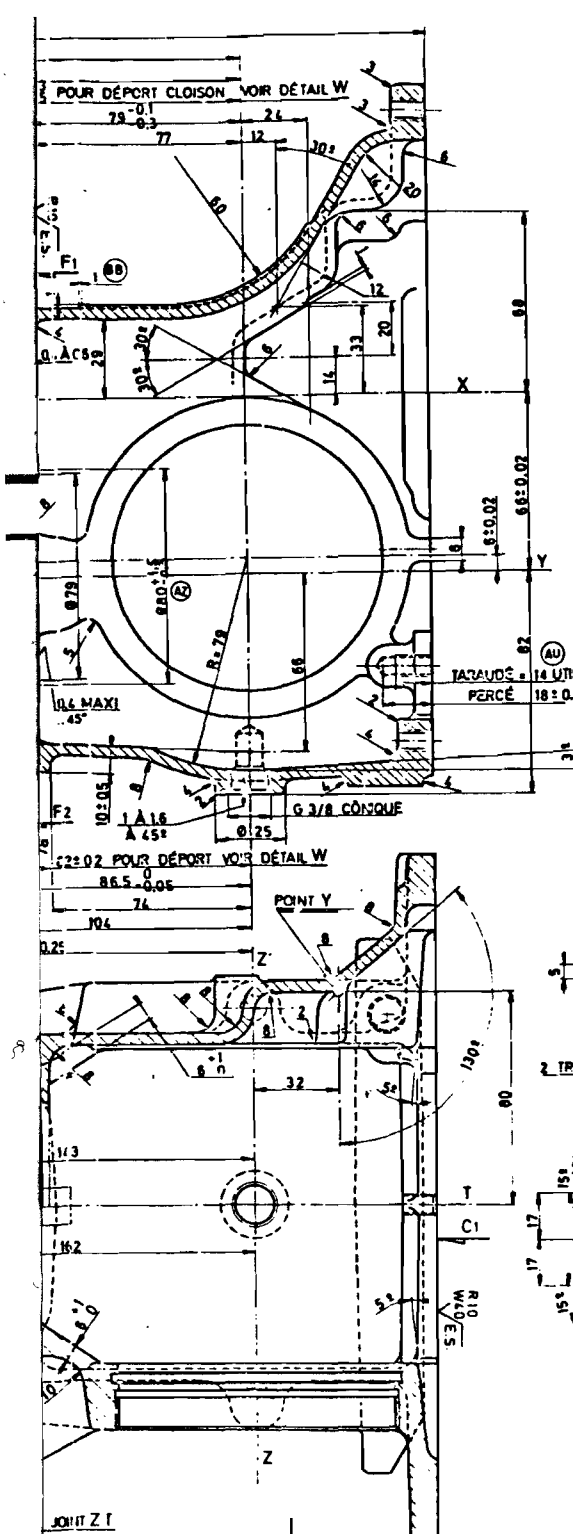
ANAL 533 206 0094
DANS COUPE GG PM 12 PM 1255
LTS AVANT TROU #103513
LTS ETAT TROU #103513
LTS #103513 TRCJ #103513 LBS
ETAT L 103513
CHANGE COTATION DANS COUPE
EE : SUPPRIME COTES 402620
58, 48, 0002 AJOUTE COTES
71, 34, 0003 102546 2903
CHANGE LA LIGNE DE RAPPEL
DE LA COTE 13.2 PM 1255
LE DETAIL
VOIR PLANCHIE 7/2
SURCOT 3 10/76

AJ 0816
PLAN REFAIT.
DEPLACE VUES
GUING 11.21

CARTER MÉCANISME

ANNEXE III.

01/72095401	01/720968	01/720991	01/720992	01/720993	01/720994	01/720995	01/720996	01/720997	01/720998	01/720999	01/721000	01/721001	01/721002	01/721003	01/721004	01/721005	01/721006	01/721007	01/721008	01/721009	01/721010	01/721011	01/721012	01/721013	01/721014	01/721015	01/721016	01/721017	01/721018	01/721019	01/721020	01/721021	01/721022	01/721023	01/721024	01/721025	01/721026	01/721027	01/721028	01/721029	01/721030	01/721031	01/721032	01/721033	01/721034	01/721035	01/721036	01/721037	01/721038	01/721039	01/721040	01/721041	01/721042	01/721043	01/721044	01/721045	01/721046	01/721047	01/721048	01/721049	01/721050	01/721051	01/721052	01/721053	01/721054	01/721055	01/721056	01/721057	01/721058	01/721059	01/721060	01/721061	01/721062	01/721063	01/721064	01/721065	01/721066	01/721067	01/721068	01/721069	01/721070	01/721071	01/721072	01/721073	01/721074	01/721075	01/721076	01/721077	01/721078	01/721079	01/721080	01/721081	01/721082	01/721083	01/721084	01/721085	01/721086	01/721087	01/721088	01/721089	01/721090	01/721091	01/721092	01/721093	01/721094	01/721095	01/721096	01/721097	01/721098	01/721099	01/721100	01/721101	01/721102	01/721103	01/721104	01/721105	01/721106	01/721107	01/721108	01/721109	01/721110	01/721111	01/721112	01/721113	01/721114	01/721115	01/721116	01/721117	01/721118	01/721119	01/721120	01/721121	01/721122	01/721123	01/721124	01/721125	01/721126	01/721127	01/721128	01/721129	01/721130	01/721131	01/721132	01/721133	01/721134	01/721135	01/721136	01/721137	01/721138	01/721139	01/721140	01/721141	01/721142	01/721143	01/721144	01/721145	01/721146	01/721147	01/721148	01/721149	01/721150	01/721151	01/721152	01/721153	01/721154	01/721155	01/721156	01/721157	01/721158	01/721159	01/721160	01/721161	01/721162	01/721163	01/721164	01/721165	01/721166	01/721167	01/721168	01/721169	01/721170	01/721171	01/721172	01/721173	01/721174	01/721175	01/721176	01/721177	01/721178	01/721179	01/721180	01/721181	01/721182	01/721183	01/721184	01/721185	01/721186	01/721187	01/721188	01/721189	01/721190	01/721191	01/721192	01/721193	01/721194	01/721195	01/721196	01/721197	01/721198	01/721199	01/721200	01/721201	01/721202	01/721203	01/721204	01/721205	01/721206	01/721207	01/721208	01/721209	01/721210	01/721211	01/721212	01/721213	01/721214	01/721215	01/721216	01/721217	01/721218	01/721219	01/721220	01/721221	01/721222	01/721223	01/721224	01/721225	01/721226	01/721227	01/721228	01/721229	01/721230	01/721231	01/721232	01/721233	01/721234	01/721235	01/721236	01/721237	01/721238	01/721239	01/721240	01/721241	01/721242	01/721243	01/721244	01/721245	01/721246	01/721247	01/721248	01/721249	01/721250	01/721251	01/721252	01/721253	01/721254	01/721255	01/721256	01/721257	01/721258	01/721259	01/721260	01/
-------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----



JOINT Z I
(TRESSES).
1 (SAUF INDICATIONS CONTRAIRES)
F. MEC. (CONTRAIRES) (ACC. 45°/11).

1. B1, C1:
0.1 MAXI POUR GAUCHE
ES. PRIMAIRE ET SECONDAIRE:
S XX', YY' ET PAR RAPPORT A XX'
Y (POSITION N°1 DU SCHEMA).
ES XX', YY' ET PAR RAPPORT A XX'
Y (POSITION N°2 DU SCHEMA).
POR. AUX AXES XX', YY':
TARCHE R.
POR. A L'AXE SECONDAIRE YY':
FOURCHETTES
NEUR APPLIQUE SUR FACE A1.
RA SUBIR UNE OPERATION DE
E. ETRE TOTALEMENT EXEMPT DE
TACHABLES.

S. ALÉSAGES ET ASSIMILÉS.
AUTRES CAS.
FONTE RIL. = 0.05

NON PERPENDICULARITÉ PAR RAPPORT A L'AXE YY':
0.02% MAXI POUR AXE Z' Z
NON PERPENDICULARITÉ PAR RAPPORT A L'AXE XX':
0.05% MAXI LU AU COMPAREUR APPLIQUÉ SUR
FACES F1, B1, C1.
NON PERPENDICULARITÉ PAR RAPPORT A L'AXE YY':
0.05% MAXI LU AU COMPAREUR APPLIQUÉ SUR
FACE F2.
NON PERPENDICULARITÉ PAR RAPPORT AUX AXES DE
FOURCHETTES. 0.05% MAXI POUR FACE H1.
FAUX PARALLÉLISME PAR RAPPORT A LA FACE H1:
DANS LA TOLÉRANCE 5 D11 POUR FACE G1
EXCENTRATION PAR RAPPORT A 0 D1:
0.05 MAXI LU AU COMPAREUR APPLIQUÉ SUR 0 A.
(FILETAGE M105x15).
EXCENTRATION PAR RAPPORT A 0 K1:
0.05 MAXI LU AU COMPAREUR APPLIQUÉ SUR 0 A
(FILETAGE M76x15).

UN REPRODUCTIBLE POLYESTER DE
CE PLAN A ÉTÉ COMMUNIQUÉ A
FASA
L'ORIGINAL NE DOIT PAS ÊTRE MODIFIÉ
SANS CONSULTER LE B.E. FASA

N° DE PIÈCE BRUTE: 77 00 520 527.

**PRODUIT FAISANT L'OBJET
D'UN AGREMENT OFFICIEL**

NORMES REGLEMENTATION
ANTI POLLUTION ESSENCE
- FEUX DE M.A.R.

ECE 15
CEE 70 220
CEE 74 290
CEE 77 102
CEE 76 756
FMVSS 108 (U.S.A.)
DRI (AUSTRALIE)
0017-0819

SERVICE CORESPONDANT:				CARTER MÉCANISME	
AVEC SANS	1180	FONTE 901	G20	27 00 555 523	
AVEC AVEC	1180	FONTE 901	G20	77 00 550 935	
AVEC SANS	1180	FONTE 901	G20	77 00 535 057	
AVEC AVEC	1180	FONTE 901	G20	77 00 520 526	
SANS SANS	1180	FONTE 901	G20	77 00 520 525	

TR. P. TROU R. RECUL	TYPE	MAT. 100% L'ÉTAT PROTECT. PRESENT. IN CARTE (10% CHAMP)	DESIGNATION	N. MARCHÉ DE 100
1	0814	26.03.68	M. JALLAS	250360

ANNEXE III.