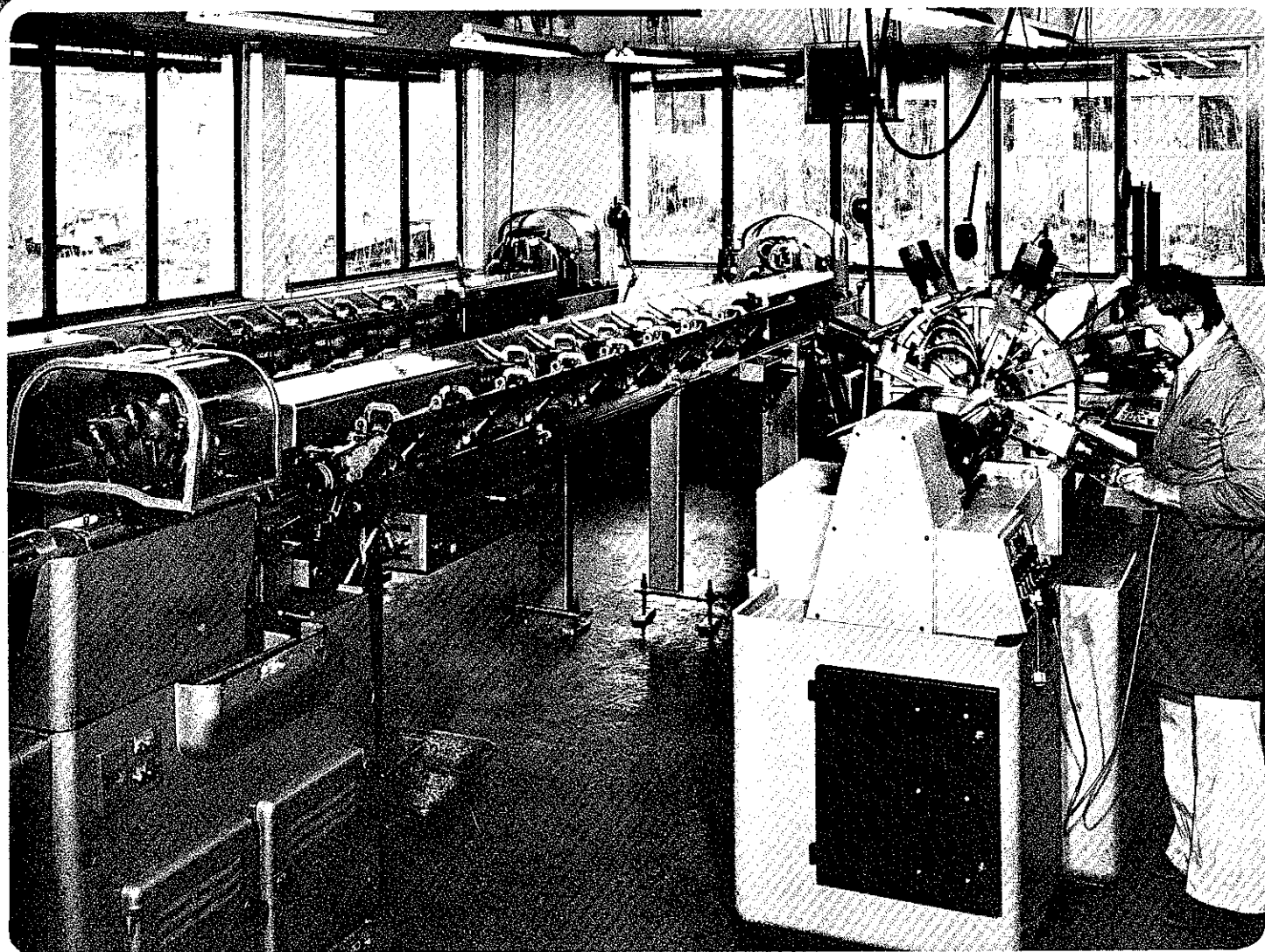


mecanique matériaux électricité

Organe officiel du
groupement pour
l'avancement de la
mécanique industrielle
G.A.M.I.

revue des techniques nouvelles au service de l'industrie



N° 388
Avril 1982
Prix 46 F

Choix et optimisation des cotes de réglage

P. BOURDET, Professeur à l'ENSET.

Régler une machine-outil c'est installer dans le repère de la machine, une surface de référence (par le montage d'usinage) et des surfaces usinées (par les outils).

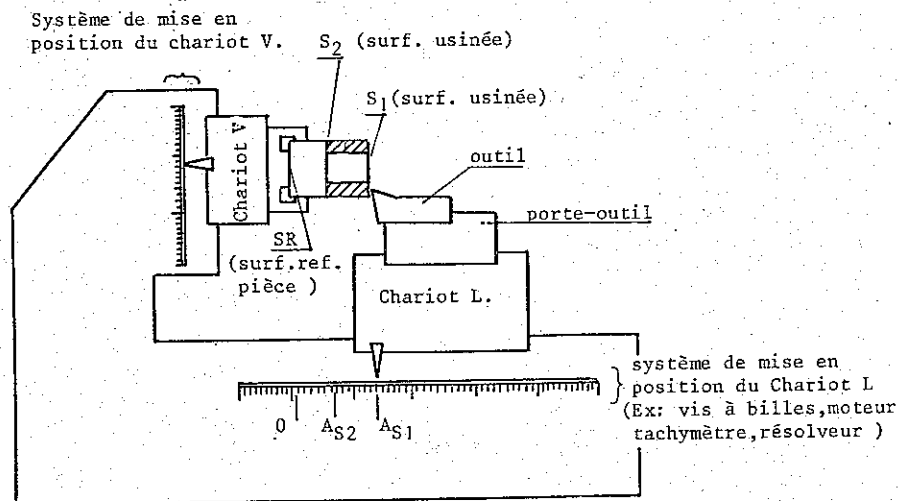
Il existe des écarts entre les positions théoriquement affichées dans le repère de la machine-outil et les positions réellement obtenues sur la pièce. S'il est possible d'améliorer les écarts de réglage en agissant sur les performances des matériels utilisés, on peut également agir sur le modèle de calcul des cotes de réglage. Il est proposé un modèle de simulation permettant de calculer les dimensions à afficher sur la machine, les dimensions à contrôler sur la pièce en cours de fabrication. Le calcul rend maximum les intervalles de variation possibles des surfaces, et par suite, simplifie le mode de réglage, et diminue les risques de rejet de pièces bonnes en cours de fabrication.

HOW TO CHOOSE AND OPTIMIZE SETTING DIMENSION FIGURES

To set a machine-tool is to fit up in the machine adjusting mark (by machining fitting out) bright parts surfaces (by tools).

Gaps exist between theoretically displayed positions in the machine adjusting mark and actual positions on the part. If it is possible to improve setting gaps by acting on performance of utilized working stock, one can also operate on computing model of adjusting marks. A simulation model is proposed, allowing to compute dimensions to display on the machine, dimensions to inspect on the part under manufacturing. Calculation maximizes possible surfaces variation gaps, and afterwards, simplifies setting mode, and reduces the risk of rejecting good parts in course of production.

1. INTRODUCTION AU REGLAGE DES MACHINES-OUTILS



Si dans le cas d'une série continue, on peut envisager d'ajuster le réglage par tâtonnements successifs basés sur une connaissance expérimentale précise du comportement de la machine (spécialement conçue pour la pièce réalisée), il n'en est pas de même dans les autres cas, où l'aptitude de passer rapidement d'une production à une autre nécessite de diminuer le nombre et les temps de réglage, voire de les supprimer. On sait en effet que lorsque l'on optimise le facteur temps de coupe, le gain en valeur absolu est plus important sur la réduction des temps morts que sur la réduction des temps de coupe pour le même investissement.

Dans une sous-phase d'usinage, la machine usine une succession de surfaces sans démontage de la pièce, par exemple suivant la direction Z les deux surfaces S_1 et S_2 . Un porte-pièce positionne une référence de la pièce, par

exemple la surface SR. Le réglage consiste à positionner entre-elles l'ensemble : surface de référence, surfaces usinées.

Les modes opératoires de réglage sont fonction de la morphologie et des technologies utilisées sur la machine-outil.

En commande numérique, régler les deux surfaces S_1 et S_2 revient à afficher les deux dimensions OAS_1 et OAS_2 , ces deux dimensions de réglage affichées tiennent compte de la position théorique de la surface de référence SR du montage d'usinage (Instruction G 9 2 d'une translation d'axe programmée). Ce type de réglage est comparable à celui effectué sur une machine classique à l'arrêt par des

cales étalons ou des butées. (On règle par exemple les dimensions entre les pointes des outils et l'appui-pièce).

Des écarts apparaissent sur la pièce usinée, ils sont dus :

- à l'imprécision de la connaissance de la position de la face de référence du montage d'usinage ;
- à l'imprécision de la position de la pointe de l'outil due à l'assemblage outil $\rightarrow$ porte-outil $\rightarrow$ chariot. Celle-ci est améliorée par un banc de préréglage ou par une correction d'outil effectuée directement par mesure sur la machine à commande numérique (système Sandvik-Coromant) ;
- à l'imprécision due aux défauts géométriques des guidages de la machine, ceux-ci auront une influence d'autant plus importante que la pointe de l'outil sera éloignée du capteur de déplacement de la Machine-Outil. En commande numérique il existe certains programmes permettant de tenir compte des défauts des guidages, des vis de commande, et par suite d'améliorer la précision de la machine [6] ;
- aux déformations dues aux efforts de coupe variables d'un outil à un autre ;
- à l'usure des outils.

Si le problème du réglage peut-être résolu en réduisant les causes de dispersion sur le matériel, il peut être très efficacement résolu par une action sur le modèle d'optimisation des cotes de réglage.

En effet les dimensions de réglage étant calculées puis affichées sur la machine, on obtient une pièce fabriquée. Il est impossible de vérifier directement les dimensions de réglage réalisées sur le site, il est également impossible de les vérifier sur la pièce démontée, puisque les dimensions de réglage sont en quelque sorte des paramètres cachés liés à l'ensemble pièce-outil, machine-outil. La seule information disponible est l'ensemble des dimensions réalisées sur la pièce. Vérifier que les réglages de la machine-outil sont corrects, c'est vérifier que certaines dimensions de la pièce fabriquée sont dans des intervalles de tolérance compatibles avec les contraintes du bureau des études (dessin de définition) et des méthodes.

On propose ici une nouvelle méthode permettant d'optimiser le choix des cotes fabriquées nécessaires au contrôle de la bonne exécution des réglages, cette méthode rend maximum les intervalles de tolérance des dimensions de réglage, et par suite, laisse une plus grande marge aux intervalles de variation des écarts dus aux performances des matériels.

2. MODELE FONDAMENTAL DE SIMULATION

Régler une machine, c'est dans chaque sous-phase, positionner entre elles les surfaces de l'ensemble : surface de référence, surfaces usinées. Le calcul des tolérances des cotes fabriquées liant les surfaces entre elles est obtenu par une simulation géométrique de la fabrication.

Il existe actuellement dans les bureaux de méthode deux modes opératoires de simulation géométrique des usinages. Ils ne prennent en compte que les cotes fabriquées de la pièce et ne diffèrent que sur le choix des cotes fabriquées.

Le premier mode opératoire, développé par la Régie Renault, consiste à choisir systématiquement comme cotes fabriquées, celles liant les surfaces usinées à la surface de réfé-

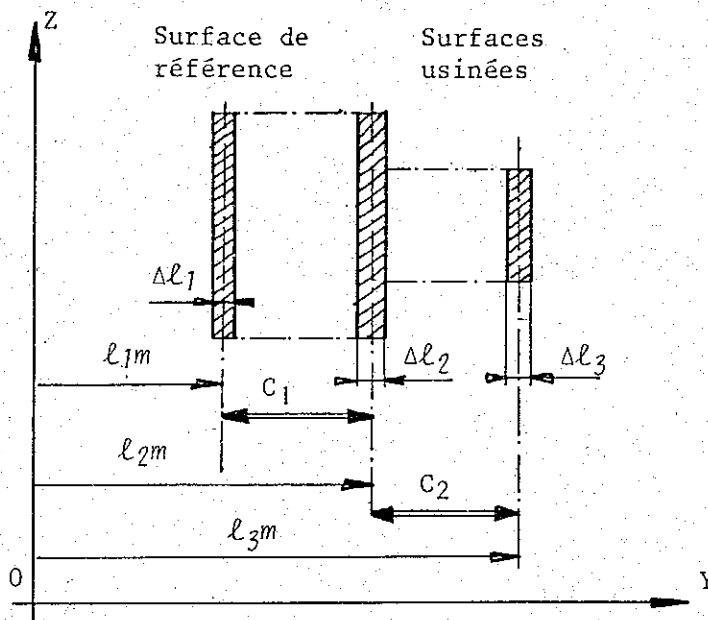
rence (*). Le régleur doit donc effectuer un réglage tel que les dimensions obtenues sur chaque pièce soient dans les tolérances des cotes fabriquées choisies. Cette méthode est très bien adaptée aux cas où une seule surface est usinée par sous-phase, par contre, dans le cas d'usinage de plusieurs surfaces dans une même sous-phase, les transferts de cotes réduisent inutilement, et le plus souvent de façon très importante, les tolérances des cotes à respecter [11]. Des exemples d'applications montrent, qu'une suite d'usinages facilement réalisables par l'atelier, se trouve rejetée par le bureau de méthode, uniquement par le mode opératoire de simulation utilisé.

Le deuxième mode opératoire consiste à choisir les cotes de fabrication correspondantes aux cotes du dessin (*), mais dans de nombreux cas, les cotes du dessin ne sont pas réalisées dans une même sous-phase et le choix des cotes de fabrication devient à nouveau arbitraire. Par suite les tolérances obtenues sur certaines cotes sont à nouveau inutilement réduites et augmentent le « coût précision » de la production. D'autre part cette méthode entraîne une augmentation des dimensions du « brut » et par suite une augmentation de la quantité de copeau à enlever.

Ces deux modes opératoires n'ont pas été trop remis en cause car l'effet restrictif sur les intervalles de tolérance de fabrication diminue les risques de pièces mauvaises au contrôle final. Il apparaît néanmoins que ce surcroît inutile de précision augmente les temps de réglage et donne un risque accru de rejeter des pièces bonnes en cours de production.

Aussi, nous proposons un modèle de simulation [1] dans lequel on considère comme indissociable la chaîne : machine, outil, pièce, porte-pièce.

Chaque cote fabriquée de la pièce résulte du comportement de la chaîne : porte-pièce, machine, outil. Cette chaîne sera traduite par des cotes de simulation L_i , définies de la façon suivante.



(*) A l'exception des « cotes outils » que l'on peut considérer comme réalisées par un outil de forme particulier.

Chaque pièce de la série a une position unique dans le repère fixe lié à la machine-outil.

L'enveloppe des positions de la surface de référence des pièces de la série en projection sur un axe oy définit l'écart Δl_1 de mise en position de la série dans le repère fixe. L'écart Δl_1 positionné sur l'axe oy par la distance moyenne l_{1m} donnent la cote de simulation L_1 (l_{1m} , Δl_1).

D'autre part, la (ou les) surface(s) usinée(s) occupe(nt) dans ce même repère une position pour chaque pièce.

L'enveloppe de ces positions pour la série définie en projection sur l'axe oy, l'écart d'usinage Δl_2 positionné par la distance moyenne l_{2m} donnent la cote de simulation L_2 (l_{2m} , Δl_2).

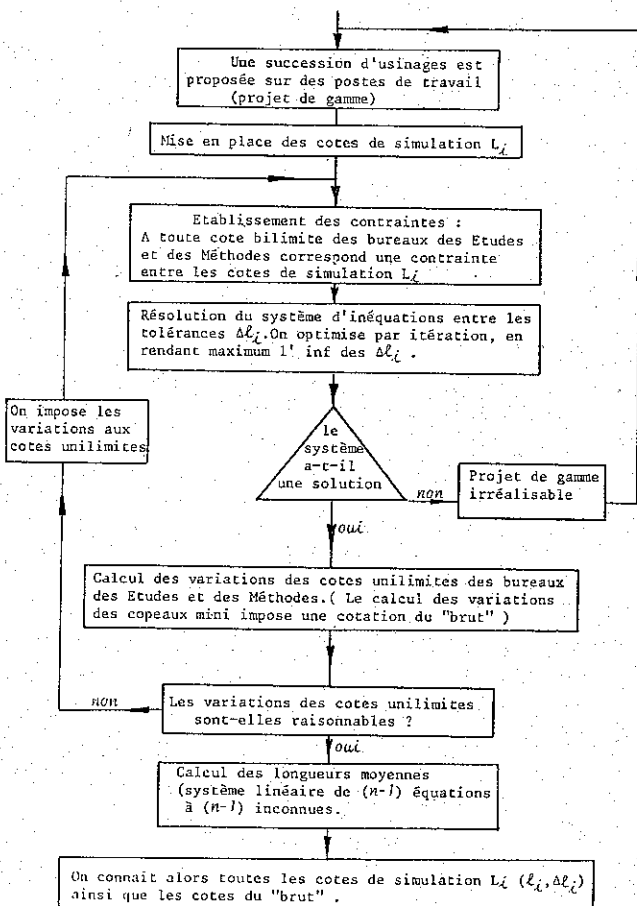
Ainsi, chaque cote fabriquée sur une pièce est le produit d'une combinaison de cotes de simulation L_i . Par exemple, la cote fabriquée C_1 est le produit d'une cote de mise en position de la surface de référence L_1 et d'une cote de mise en position de la surface usinée L_2 , la cote fabriquée C_2 est le produit de deux cotes de mise en position de surfaces usinées L_2 et L_3 .

$$C_1 = (L_1, L_2)$$

$$C_2 = (L_2, L_3)$$

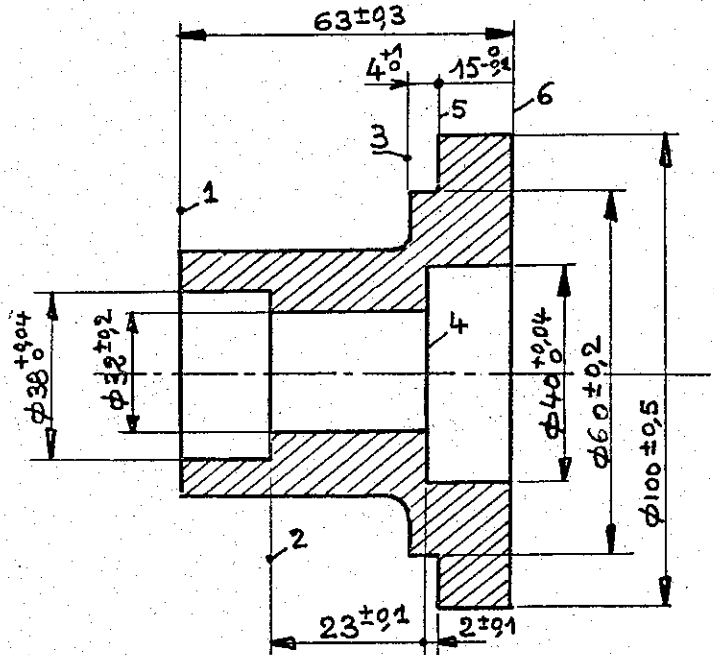
3. ALGORITHME DE LA SIMULATION GEOMETRIQUE D'UN PROJET DE GAMME :

Le mode opératoire de simulation est le suivant :



4. EXEMPLE D'APPLICATION SUR UNE PIECE SIMPLE

On désire réaliser la pièce suivante :

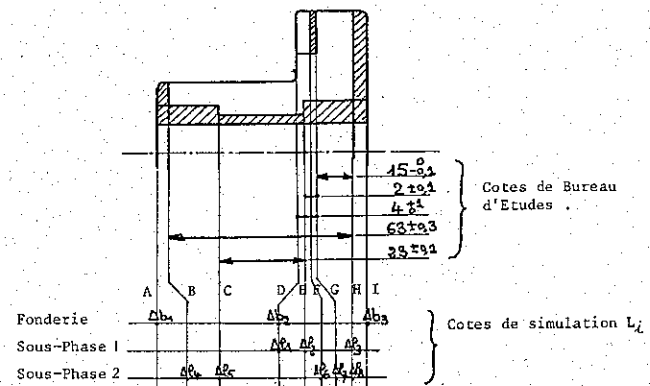


a) On propose, suivant la direction de l'axe, la succession d'usinages :

Sous-phase 1 : en appui sur 3, usinage de 4 usinage de 6

Sous-phase 2 : en appui sur 6, usinage de 5 usinage de 1 usinage de 2

b) Mise en place par sous-phase, des cotes de simulation :



c) Etablissement des contraintes entre les cotes de simulation :

A toute cote bilimite du dessin de définition correspond une contrainte entre les cotes de simulation.

Cotes du dessin entre :

1) les surf. G & H $\Delta C_{f15} = \Delta l_7 + \Delta l_8 \leq 0,1$

- 2) les surf. E & G $\Delta C_{f_2} = \Delta l_2 + \Delta l_3 + \Delta l_8 + \Delta l_7 \leq 0,2$
- 3) les surf. D & G $\Delta C_{f_4} = \Delta l_1 + \Delta l_3 + \Delta l_8 + \Delta l_7 \leq 1$
- 4) les surf. B & E $\Delta C_{f_{63}} = \Delta l_4 + \Delta l_8 \leq 0,6$
- 5) les surf. C & E $\Delta C_{f_{23}} = \Delta l_5 + \Delta l_8 + \Delta l_3 + \Delta l_2 \leq 0,2$

d) Résolution du système d'inéquations :

Etat initial du tableau d'optimisation des Δl_i

	Δl_1	Δl_2	Δl_3	Δl_4	Δl_5	Δl_6	Δl_7	Δl_8	IT	ΔC	ΔT	n	ε
14,35 ± 0,05 GH									0,1	0,06	0,04	2	0,02
2 ± 0,1 EG									0,2	0,12	0,08	4	0,02
4 ± 0,5 DG									1	0,59	0,41	3	0,136
63 ± 0,3 BH									0,6	0,06	0,54	2	0,27
23 ± 0,1 CE									0,2	0,12	0,08	4	0,02
Solution.	0,5	0,03	0,03	0,03	0,03	0,4	0,03	0,03					

e) Variation des cotes unilimites :

(Copeau mini : 2 en ébauche, 0,2 en finition)

- 6) $\Delta_{AB} = \Delta b_1 + \Delta b_2 + \Delta l_1 + \Delta l_3 + \Delta l_8 + \Delta l_4 = 2,5$
soit $C_{AB} = 3,25 \pm 1,25$
- 7) $\Delta_{FG} = \Delta l_6 + \Delta l_7 = 0,45$
soit $C_{FG} = 0,425 \pm 0,225$
- 8) $\Delta_{HI} = \Delta b_3 + \Delta b_2 + \Delta l_1 + \Delta l_3 = 1,90$
soit $C_{HI} = 2,95 \pm 0,95$

f) Après calcul des cotes moyennes, on obtient les cotes L_i

$L_1 = 0 \pm 0,42$	$L_5 = 39,95 \pm 0,025$
$L_2 = 2 \pm 0,025$	$L_6 = 15,37 \pm 0,2$
$L_3 = 19,45 \pm 0,025$	$L_7 = 14,95 \pm 0,025$
$L_4 = 63 \pm 0,27$	$L_8 = 0 \pm 0,025$

Cotes du «brut» imposées entre les surfaces :

$$A \text{ \& D : } C_{AD} = 46,80 \pm 0,5$$

$$D \text{ \& I : } C_{DI} = 22,40 \pm 0,5$$

5. REGLAGE D'UN POSTE D'USINAGE

Chaque cote de simulation L_i est un modèle, il représente la zone où devrait se trouver effectivement la surface réelle dans le repère machine.

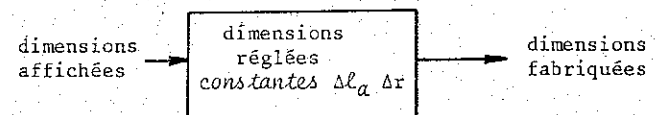
On distingue les dimensions suivantes :

- les «dimensions affichées» (sur le site)
par exemple : les dimensions X, Y, Z de la commande numérique ; les dimensions des cales de réglage, les dimensions entre les butées fixes d'une machine classique
- les «dimensions réglées» (sur le site)
ce sont les dimensions réalisées au niveau des surfaces, elles «appartiennent» au repère de la machine c'est-à-dire à l'ensemble pièce-machine. Ces dimensions réglées correspondent aux cotes de simulation L_i

- les «dimensions fabriquées» (sur la pièce)
ce sont les dimensions obtenues sur une pièce fabriquée.

Le réglage d'une machine suit un schéma où :

- les dimensions affichées sont les paramètres d'entrée
- les dimensions fabriquées sont les paramètres de sortie
- les dimensions réglées sont des paramètres cachés qui traduisent un modèle de comportement de la machine.



5.1 CALCUL DES «DIMENSIONS AFFICHEES» (SUR LE SITE)

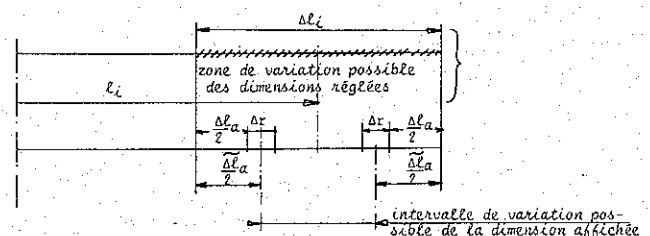
Par expérimentation on sait, dans le repère machine, déterminer la dispersion aléatoire Δl_a de la variation de position de la surface S_i des pièces de la série. On sait également déterminer la dispersion Δl_r de l'écart entre la dimension affichée, et la position moyenne qu'occupe la surface S_i des pièces de la série [10].

Soit $\tilde{\Delta l_a}$ la somme des variations Δl_a et Δl_r

L'écart maximum possible entre une dimension affichée et la dimension réglée sur le site est donc de $\tilde{\Delta l_a}/2$.

Suivant les valeurs relatives entre la consigne de simulation L_i et les dispersions $\tilde{\Delta l_a}$ et Δl_a , trois solutions de calcul de la dimension affichée sont possibles :

- a) la variation Δl_i optimisée en simulation est supérieure à $\tilde{\Delta l_a}$: $\Delta l_i > \tilde{\Delta l_a}$



Si la dimension affichée est située dans l'intervalle :

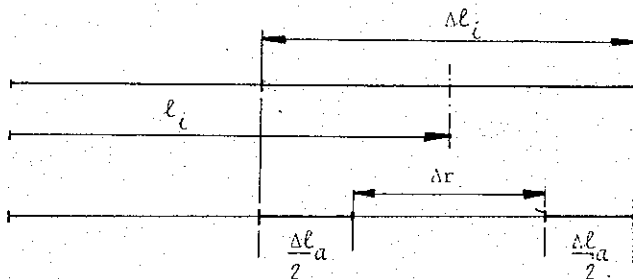
$$\left[l_i - \frac{\Delta l_i}{2} + \frac{\tilde{\Delta l_a}}{2} ; l_i + \frac{\Delta l_i}{2} - \frac{\tilde{\Delta l_a}}{2} \right]$$

la première pièce de la série sera à coup sûr dans la tolérance Δl_i .

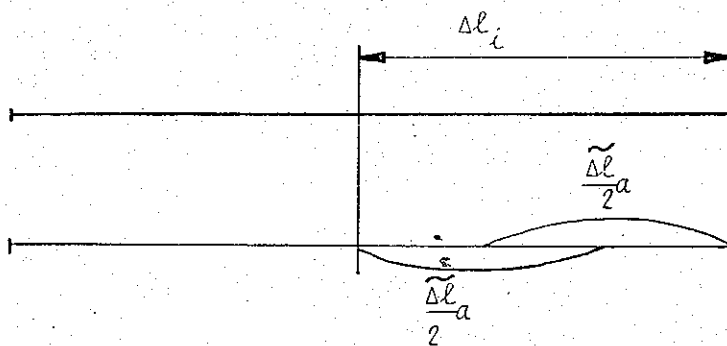
La dimension affichée choisie est le plus souvent la dimension moyenne l_i de la cote de simulation. Mais si on admet une usure d'outil, la dimension affichée sera, suivant le sens de l'usure, l'une des deux bornes de l'intervalle.

- b) la variation Δl_i optimisée en simulation est supérieure à Δl_a . La valeur de Δr n'est pas encore choisie car plusieurs valeurs de Δr sont possibles suivant la technique de réglage utilisée (réglage au réglé, au vernier, avec des cales étalons).

On prend alors la dimension moyenne ℓ_i de la cote de simulation comme dimension affichée. On en déduit la valeur du Δr possible $\Delta r = \Delta \ell_i - \Delta \ell_a$ et par suite, la technique de réglage correspondante aux cas exposés aux paragraphes a et c.



c) la variation $\Delta \ell_i$ optimisée en simulation est comprise entre $\Delta \ell_a$ et $\tilde{\Delta \ell}_a$: $\Delta \ell_a \leq \Delta \ell_i < \tilde{\Delta \ell}_a$



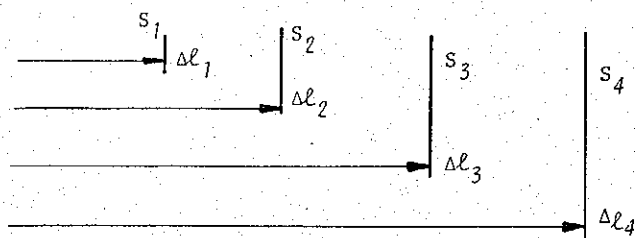
La première pièce de la série a un risque d'être hors tolérance, on ne peut afficher que la dimension moyenne ℓ_i de la cote de simulation.

Il est indispensable dans ce cas de corriger la dimension affichée en estimant à partir d'un échantillon de pièces la position moyenne des dimensions réglées. Ceci revient à maîtriser la dispersion Δr .

5.2 VERIFICATION DES DIMENSIONS REGLEES :

Le contrôle sur le site a pour but de vérifier si le comportement de l'ensemble pièce-machine est conforme au modèle de simulation utilisé.

Par exemple dans une sous-phase on a pour 4 surfaces : (une surface de référence et trois surfaces usinées)



les inéquations et les équations de la simulation :

$$\begin{aligned} () & \text{-----} + \Delta \ell_1 + \Delta \ell_2 + \text{-----} \leq \\ () & \text{-----} + \Delta \ell_2 + \Delta \ell_4 + \text{-----} \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} () & \text{-----} + \Delta \ell_4 + \Delta \ell_1 + \text{-----} = \\ () & \text{-----} + \Delta \ell_3 + \Delta \ell_4 + \text{-----} \leq \end{aligned}$$

expriment les contraintes et donnent après optimisation des valeurs $\Delta \ell_i$ maximales.

Les $\Delta \ell_i$ d'une même sous-phase apparaissent par paire dans les différentes relations, et désignent les cotes de la pièce à contrôler.

Par exemple : $Cf_{12}, Cf_{24}, Cf_{41}, Cf_{34}$

$$\begin{aligned} \text{avec } \Delta Cf_{12} &= \Delta \ell_1 + \Delta \ell_2 & \Delta Cf_{41} &= \Delta \ell_4 + \Delta \ell_1 \\ \Delta Cf_{24} &= \Delta \ell_2 + \Delta \ell_4 & \Delta Cf_{34} &= \Delta \ell_3 + \Delta \ell_4 \end{aligned}$$

Ainsi, pour déclarer la production conforme au modèle de simulation, il suffit de mesurer la pièce fabriquée et de vérifier les inclusions suivantes :

$$\begin{aligned} d_{12} &\subset Cf_{12} & d_{41} &\subset Cf_{41} \\ d_{24} &\subset Cf_{24} & d_{34} &\subset Cf_{34} \end{aligned}$$

Remarque :

Dans le cas des 3 surfaces S_1, S_2, S_4 on peut être amené, comme dans cet exemple, à vérifier une boucle fermée de 3 cotes $Cf_{12}, Cf_{24}, Cf_{41}$. Certaines habitudes imposent de ne vérifier que 2 conditions sur les trois.

Afin de ne pas trop réduire les intervalles de tolérance on devrait dans ce cas, choisir les deux cotes dont l'intervalle $\Delta \ell$ commun est le plus faible.

Ainsi si $\Delta \ell_2 < \Delta \ell_4 < \Delta \ell_1$ on devrait choisir les deux dimensions d_{12} et d_{42} et réduire leur tolérance de variation de la borne commune mini $\Delta \ell_2$.

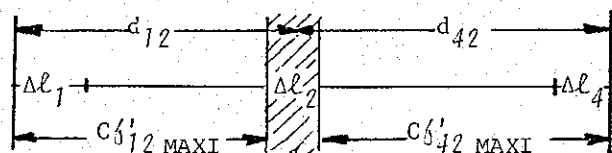
On ne contrôle alors que les deux inclusions suivantes :

$$\begin{aligned} d_{12} &\subset Cf'_{12} & \Delta Cf'_{12} &= \Delta \ell_1 \\ d_{42} &\subset Cf'_{42} & \Delta Cf'_{42} &= \Delta \ell_4 \end{aligned}$$

la troisième condition est vérifiée indirectement par un «transfert de cotes»

$$\Delta Cf_{14} = \Delta Cf'_{12} + \Delta Cf'_{42} = \Delta \ell_1 + \Delta \ell_4 \text{ (transfert de cotes)}$$

Cette habitude restrictive, fait que toutes les pièces (bonnes pour le contrôle final) ayant leurs dimensions d_{12} et d_{42} dans les intervalles de tolérance du schéma ci-dessous, seront systématiquement rebutées sur le site.



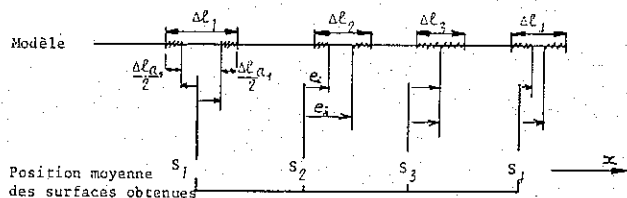
$$\begin{aligned} Cf'_{12} \text{ MAX} &> d_{12} > Cf'_{12} \text{ MAX} \\ Cf'_{42} \text{ MAX} &> d_{42} > Cf'_{42} \text{ MAX} \end{aligned} \text{ et } d_{14} \subset Cf_{14}$$

5.3 AJUSTEMENT D'UN REGLAGE

Celui-ci n'est possible qu'en estimant sur un échantillon de quelques pièces les dimensions moyennes obtenues et les tolérances correspondants.

Par le calcul, on situe alors la position moyenne des surfaces usinées dans les tolérances ($\Delta l_i - \Delta l_a$) prévues par le modèle de simulation L_i . On en déduit immédiatement les nouvelles dimensions à afficher sur le site.

Exemple pour 4 surfaces : ($n = 4$) :



En première approximation, le déplacement $\vec{ex}$ pour situer au mieux les surfaces obtenues par rapport au modèle est :

$$e = \frac{\sum (e_i - e_j)}{2n}$$

6. CONCLUSION

Le programme de simulation «Cote F» donne au bureau des méthodes une connaissance plus précise du comportement des fabrications, et permet d'augmenter sans risque les tolérances de fabrication. Il apporte une aide à l'élaboration des gammes (test rapide de comparaison entre plusieurs projets), et calcule les dimensions à afficher et à contrôler sur les machines.

Sur le poste de travail le programme «Cote R» apporte une aide au régleur, en lui précisant les écarts de réglage à effectuer. Ce programme devrait être prochainement intégré à une DNC et permettre une correction automatique sur la machine.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. BOURDET — Chaînes de cotes de fabrication : Modèles Ingénieur et Technicien de l'E.T. Décembre 1973.
- [2] BOURDET — Chaînes de cotes de fabrication : Mode opératoire. Ingénieur et Technicien de l'E.T. Mai-Juin 1975.
- [3] P. BOURDET, A. CLEMENT — Optimisation des montages d'usinage. Contrat de Recherche DRME 1972/811.
- [4] R. WEILL — Techniques d'usinage. Dunod 1971.
- [5] C. BERIN et B. ROUMEZY — Les essais d'usure, base de calcul d'optimisation. Journées d'études sur l'optimisation des techniques d'usinage traditionnelles. INSA de Lyon, Fascicule 1. 17-18 avril 1975.
- [6] A. CLEMENT — Modélisation des erreurs de trajectoires des machines-outils, des machines à mesurer tridimensionnelles et robots. Mécanique-Matériaux-Electricité, p. 294-297, 1980.
- [7] P. BOURDET — Nouvelle méthode de définition des paramètres entre surfaces fabriquées (Conf. GAMI, 13 décembre 1979).
- [8] P. PELLETIER — Techniques numériques appliquées au calcul scientifique. Masson.
- [10] P. BOURDET — Cotation de fabrication. Polycopié ENSET 1979.
- [11] Techniques Industrielles, n° 79, Octobre 1976.