

REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

JEAN MORICEAU

Une méthode statistique d'évaluation des temps opérationnels

Revue de statistique appliquée, tome 2, n° 3 (1954), p. 57-74

http://www.numdam.org/item?id=RSA_1954__2_3_57_0

© Société française de statistique, 1954, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « *Revue de statistique appliquée* » (<http://www.sfds.asso.fr/publicat/rsa.htm>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

UNE MÉTHODE STATISTIQUE D'ÉVALUATION DES TEMPS OPÉRATIONNELS

par

Jean MORICEAU

Ingénieur en chef au Centre d'études et de mesures de Productivité

Détaché au Centre de Productivité du Syndicat Général des Fondeurs, M. MORICEAU, a eu l'occasion de faire, dans diverses usines, des études concrètes de productivité portant en particulier sur la mesure et la comparaison des temps d'exécution.

On trouvera ci-après une analyse des résultats obtenus dans l'étude des temps de moulage en fonderie.

Les résultats obtenus montrent l'intérêt d'études analogues qui pourraient être faites dans d'autres secteurs industriels (usinage, constructions mécaniques).

La gestion rationnelle d'une entreprise de production suppose que l'on connaisse a priori les temps d'exécution des divers travaux qui doivent être effectués pour fabriquer un objet déterminé. Cette connaissance est, en effet, indispensable pour :

- permettre le calcul sur devis des prix de revient et de vente d'une nouvelle fabrication, lors d'un appel d'offre de la clientèle ;
- appliquer, dans une entreprise, un système de rémunération aux pièces ou au rendement ;
- réaliser un ordonnancement correct de la fabrication ;
- tenir rationnellement et avec précision un planning d'exécution.

Dans un certain nombre d'industries, cette connaissance a prioriste des temps opérationnels résulte de l'application de tables et de barèmes de temps, de chronométrage ou de l'emploi de méthodes d'évaluation des temps élémentaires (B. T. E. ou M. T. M.). Ces divers systèmes sont d'une application courante, à l'entière satisfaction des utilisateurs, dans les industries mécaniques.

En revanche, dans d'autres secteurs industriels, en particulier en fonderie, la détermination a priori des temps opérationnels relève, le plus souvent, de l'empirisme le plus absolu. On peut en donner pour preuve les résultats des enquêtes faites par les bureaux régionaux des prix du Syndicat Général des Fondeurs de France. Ces organismes adressent périodiquement à leurs adhérents des plans de pièces en précisant le processus technique de réalisation. Les entreprises destinataires sont priées d'indiquer, entre autres renseignements, les temps de moulage, de noyautage et d'ébarbage qu'elles jugent nécessaires. On constate que, pour une même pièce, les temps prévus par des usines techniquement comparables sont très différents et peuvent varier dans la proportion de 1 à 6. La position d'une usine par rapport à la moyenne du groupe n'est pas systématiquement la même. Elle peut parfaitement indiquer pour une pièce A le temps le plus bref, et le plus long pour une pièce B. Notons d'ailleurs que cette situation n'est pas propre à la fonderie.

Plusieurs raisons peuvent expliquer cette imperfection de la prévision. Tout d'abord, la réalisation d'une pièce de fonderie présente toujours un caractère empirique et parfois aléatoire. L'exécution est souvent laissée à l'initiative de l'ouvrier, qui n'est pas toujours bon juge en la matière. Par exemple, au moulage, sur une machine à secousses, la durée de serrage est indéterminée et varie avec l'exécutant. Le caractère aléatoire de l'opération est particulièrement net à l'ébarbage où le travail à effectuer, sur des pièces identiques, varie avec la réussite des opérations antérieures.

D'autre part, la majorité des fonderies travaille sur modèles, à la demande des clients. La nature de la fabrication change donc constamment et son caractère non répétitif rend fort difficile, voire impossible, l'utilisation des méthodes classiques d'estimation de temps.

L'intérêt présenté par la prévision des temps opérationnels, joint à l'impuissance des méthodes classiques d'évaluation, nous ont conduit à rechercher s'il n'était pas possible de trouver une solution statistique à ce problème. Par ailleurs, lors de recherches poursuivies pour mesurer la productivité en fonderie, des liaisons stochastiques avaient pu être mises en évidence entre le poids des pièces et les divers temps opérationnels par unité de poids (1). Ces liaisons devant servir au calcul des coefficients de pondération des productions pour les rendre comparables dans le temps (2), il était nécessaire d'examiner si ce choix était justifié. Pour cela, il fallait apprécier l'importance du facteur poids dans la détermination des temps par rapport à l'importance d'autres facteurs qui, techniquement, semblaient rentrer en ligne de compte.

Ces deux préoccupations se rejoignent donc, et il s'agissait, aussi bien pour tester la validité de notre méthode de mesure de productivité que pour donner satisfaction aux industriels désireux de prévoir leurs temps, de déterminer les facteurs qui influent sur un temps d'opération et de mesurer leur importance respective.

Les premiers travaux eurent pour objet l'estimation des temps de moulage en raison de l'importance de cette opération qui est à la base de tout travail de fonderie. Au moulage main, trois études ont été menées à bien et deux sont en cours, au moulage machine, deux viennent d'être abordées.

Dans les mois à venir, nous espérons résoudre les problèmes posés par le noyautage et l'ébarbage, domaine que nous avons d'ailleurs déjà largement défriché.

* * *

La première partie A est consacrée à l'exposé des principes de base de la méthode ; dans la seconde partie B figurent deux études concrètes réalisées dans l'industrie de la fonderie.

En annexe, nous donnons un bref aperçu de la technique de fonderie.

A. — PRINCIPES

Considérons un objet sur lequel un travail bien précis doit être effectué à l'aide d'un outillage déterminé, suivant un processus technique connu à l'avance et invariable (3). Nous désirons évaluer a priori le temps « T » nécessaire pour effectuer ce travail en fonction de m variables, qualitatives ou quantitatives (x_1, x_2, \dots, x_m) caractéristiques de l'objet, de l'outillage et du processus d'exécution. En d'autres termes, nous cherchons à préciser la forme et à estimer les paramètres de la fonction f de l'expression :

$$T = f(x_1, x_2, \dots, x_m, b_1, b_2, \dots, b_m)$$

Seuls des renseignements fournis par l'observation ou l'expérimentation peuvent nous permettre d'explicitier cette équation. Il s'agit donc, en définitive, d'une étude de régression à m variables qui pose les problèmes suivants :

1. — Choix de la forme de la fonction f ;
2. — Détermination des conditions de validité de l'analyse ;
3. — Estimation des paramètres de la fonction f ;
4. — Evaluation de la précision obtenue ;
5. — Etablissement et mise en place d'un plan expérimental.

(1) Ces études ont mis en particulier en évidence les liaisons suivantes : Poids des pièces, temps d'ébarbage ; Poids des pièces, temps de noyautage ; Poids des noyaux, temps de noyautage, etc... (Cf. un article à paraître : La mesure de la productivité dans l'industrie de la fonderie).

(2) L'expérience a montré aux fondeurs que, toutes choses égales par ailleurs, un kilo de petites pièces est beaucoup plus long à fabriquer qu'un kilo de grosses pièces.

(3) Par exemple : perçage d'un trou ouvert de 10 mm de diamètre, 30 mm de profondeur dans une plaque de fonte de 40 kilos de dureté Brinell 235 à l'aide d'une mèche américaine neuve en acier rapide, montée sur une perceuse type X dont la broche unique tourne à 600 tours minute et supporte une pression P, etc...

A. — I. CHOIX DE LA FORME DE LA FONCTION.

A. 11. — Fonction linéaire.

L'expérience montre que, dans le domaine de la détermination des temps opérationnels, les liaisons entre les variables ne sont pas obligatoirement linéaires. Dans le cas le plus général, il s'agira donc d'une étude de régression non linéaire à m variables indépendantes. Des changements de variables appropriés permettent cependant de simplifier le problème et de ramener l'étude à celle beaucoup plus facile d'une régression linéaire.

A 12. — Principe des changements de variables :

Les variables $(x_1, x_2 \dots x_m, y)$ sont alors remplacées par k nouvelles variables $(X_1, X_2, \dots, X_m, Y)$ fonction des variables directement observées et telles que :

$$\begin{aligned} X_i &= g_i (x_1, x_2, \dots, x_m) \quad i = 1, 2, \dots, k \\ Y &= h (y) \end{aligned}$$

Les équations normales subissent alors les transformations suivantes. Les coefficients des inconnues deviennent :

$$\sum_{v=1}^n [g_i (x_{iv}, \dots, x_{mv}) - \bar{g}_i] [g_j (x_{iv} \dots x_{mv}) - \bar{g}_j], (i, j) = 1, 2 \dots k$$

et les termes de droite :

$$\sum_{v=1}^n [g_i (x_{iv}, \dots, x_{mv}) - \bar{g}_i] [h (y_v) - \bar{h}] .$$

Si $k = m$ et $X_i = g_i (x_i)$ le système se simplifie encore et nous avons alors, comme coefficients des inconnues dans le système d'équations normales :

$$\begin{aligned} &\sum_{v=1}^n [g_i (x_{iv}) - \bar{g}_i] [g_j (x_{jv}) - \bar{g}_j] \\ \text{et} &\sum_{v=1}^n [g_i (x_{iv}) - \bar{g}_i] [h (y_v) - \bar{h}] , \end{aligned}$$

comme termes de droite.

A 13. — Détermination de la forme des fonctions g et h :

La détermination correcte de la forme des fonctions g et h est extrêmement délicate et repose pour une large part sur l'intuition du chercheur, jointe à l'expérience qu'il peut avoir de l'industrie étudiée. Cette expérience lui permet de formuler, sur le comportement du phénomène, certaines hypothèses conduisant à telle ou telle forme de ces fonctions.

Une étude graphique complète est impossible dans la généralité des cas, puisqu'elle devrait se dérouler dans un hyper espace à m ($m > 3$) dimensions. Cependant l'étude graphique des liaisons entre les diverses variables prises deux par deux (dans le plan) ou trois par trois (dans l'espace) permet souvent de préciser les formes de g et h . Si l'on hésite entre plusieurs formes possibles, il est toujours loisible d'évaluer la précision obtenue (en formant par exemple $v^2 = s_2^2/s_1^2$) avec chacune d'elle et d'adopter celle qui donne le meilleur ajustement ; c'est malheureusement une tâche souvent fort longue.

A —2. CONDITIONS DE VALIDITÉ DE L'ÉTUDE.

Rappelons, en tenant compte des changements de variables, les conditions de validité d'une étude de régression linéaire.

A 21. — Les diverses valeurs de : Y correspondantes à une valeur donnée de $(X_1, X_2 \dots, X_m)$ sont distribuées normalement. Autrement dit, les distributions liées de Y doivent être normales.

A 22. — Les moyennes conditionnelles de Y doivent être une fonction linéaire de (X_1, X_2, \dots, X_m) soit :

$$\bar{Y}_{x_1 x_2 \dots x_m} = a + b_1 (g_1 - \bar{g}_1) + \dots + b_k (g_k - \bar{g}_k) .$$

A 23. — Les (x_1, x_2, \dots, x_m) doivent être connus avec exactitude et ne pas contenir de termes aléatoires.

A 24. — La variance conditionnelle de Y doit être, soit indépendante, soit liée fonctionnellement à (X_1, X_2, \dots, X_m) .

A 25. — Les observations doivent être stochastiquement indépendantes, c'est-à-dire que les valeurs de $(x_{1\mu}, x_{2\mu}, \dots, x_{m\mu}, y_{\mu})$ doivent être stochastiquement indépendantes des valeurs de $(x_{1\nu}, x_{2\nu}, \dots, x_{m\nu}, y_{\nu})$.

A 26. — Les fluctuations de Y_{x_1, x_2, \dots, x_m} autour de sa valeur calculée en fonction de (X_1, X_2, \dots, X_m) doivent être additives.

A 27. — Lors de chaque étude, il est indispensable de vérifier que ces diverses conditions se trouvent effectivement satisfaites.

A — 3. ESTIMATION DES PARAMÈTRES DE LA FONCTION f .

Plusieurs méthodes de calcul des paramètres de la fonction f sont possibles. On a retenu deux d'entre elles, la méthode des moindres carrés et la méthode de réduction pivotale d'Aitken.

A 31. — La méthode des moindres carrés :

Divers systèmes ont été proposés pour résoudre les équations normales. Nous avons choisi l'un des plus simples, établi par Gauss, celui de l'élimination successive des inconnues. La première équation est utilisée pour l'élimination de la première des inconnues b_1 dans les équations restantes de manière telle que le système primitif d'équations soit transformé en un système composé d'une équation (la première) avec m inconnues et d'un système de $(m - 1)$ équations à $(m - 1)$ inconnues. Dans ce dernier système d'équations (celui de $m - 1$ équations) la première est utilisée pour l'élimination de b_2 et le procédé se répète jusqu'à ce que l'on aboutisse à une équation. Nous obtenons la solution finale par substitution successive dans les équations réduites.

Par exemple, considérons un système d'équations à trois inconnues :

$$a_{11} b_1 + a_{12} b_2 + a_{13} b_3 = a_{10} \quad (1)$$

$$a_{21} b_1 + a_{22} b_2 + a_{23} b_3 = a_{20} \quad (2)$$

$$a_{31} b_1 + a_{32} b_2 + a_{33} b_3 = a_{30} \quad (3)$$

ou $a_{ij} = a_{ji}$.

L'équation (1) est multipliée par $-a_{12}/a_{11}$ et $-a_{13}/a_{11}$ ce qui conduit respectivement à

$$-a_{12} b_1 - \frac{a_{12}^2 b_2}{a_{11}} - \frac{a_{12} a_{13}}{a_{11}} b_3 = -\frac{a_{12} a_{10}}{a_{11}}, \quad (1_2)$$

$$-a_{13} b_1 - \frac{a_{12} a_{13}}{a_{11}} b_2 - \frac{a_{13}^2 b_3}{a_{11}} = -\frac{a_{13} a_{10}}{a_{11}}. \quad (1_3)$$

En additionnant ces équations aux équations 2 e 3, nous obtenons respectivement

$$(a_{22} - \frac{a_{12}^2}{a_{11}}) b_2 + (a_{23} - \frac{a_{12} a_{13}}{a_{11}}) b_3 = a_{20} - \frac{a_{12} a_{10}}{a_{11}}, \quad (2')$$

$$(a_{32} - \frac{a_{12} a_{13}}{a_{11}}) b_2 + (a_{33} - \frac{a_{13}^2}{a_{11}}) b_3 = a_{30} - \frac{a_{13} a_{10}}{a_{11}}. \quad (3')$$

Ce système d'équations peut être écrit

$$a_{22.1} b_2 + a_{23.1} b_3 = a_{20.1}, \quad (2'')$$

$$a_{32.1} b_2 + a_{33.1} b_3 = a_{30.1}, \quad (3'')$$

$a_{ij.1}$ indiquant que les équations ont été obtenues en éliminant b_1 du système primitif. La multiplication de l'équation (2'') par $-a_{23.1}/a_{22.1}$ donne

$$-a_{23.1} b_2 - \frac{a_{23.1}^2 b_3}{a_{22.1}} = -\frac{a_{23.1} a_{20.1}}{a_{22.1}} \quad (2''')$$

qui additionnée à 3' conduit à

$$\left(a_{33.1} - \frac{a_{23.1}^2}{a_{22.1}} \right) b_3 = a_{30.1} - \frac{a_{23.1} a_{20.1}}{a_{22.1}} \quad (3'')$$

qui peut être écrit $a_{33.12} b_3 = a_{30.12}$.

En résolvant cette équation par rapport b_3 et en introduisant b_3 dans l'équation (2') nous obtenons b_2 . b_1 est calculé à partir de l'équation 1 en y introduisant b_2 et b_3 .

Ces calculs peuvent être commodément exécutés en les disposant comme indiqué dans le tableau C dont la présentation est due à Doolittle. Dans ce schéma, les inconnues ont été omises et on a utilisé la symétrie du système de coefficients. L'équation 2' est calculée, l'équation 3' est donnée par la somme de (3), (1₃) et (2'₃), si bien que l'équation 3' ne figure pas explicitement dans le tableau de calcul. Pour vérifier les opérations au cours de leur exécution, on calcule horizontalement les sommes :

$$\begin{aligned} a_1 &= a_{11} + a_{12} + a_{13} + a_{10} , \\ a_2 &= a_{12} + a_{22} + a_{23} + a_{20} , \\ a_3 &= a_{13} + a_{23} + a_{33} + a_{30} . \end{aligned}$$

Les valeurs obtenues font l'objet des mêmes calculs que les coefficients et que les membres de droite des équations normales. On obtient ainsi les égalités suivantes permettant de vérifier l'exactitude des calculs :

$$\begin{aligned} a_{2.1} &= a_{22.1} + a_{20.1} . \\ a_{3.12} &= a_{33.12} + a_{30.12} . \end{aligned}$$

A 32. — La méthode de réduction pivotale d'Aitken modifiée.

Cette méthode, surtout utilisée en psychométrie pour l'analyse factorielle, répond à deux de nos préoccupations. Elle permet en effet :

- d'estimer l'importance relative de chaque facteur dans la détermination des temps opérationnels ;
- de calculer les coefficients de régression.

Sa mise en œuvre se fait d'après le schéma suivant :

a) Calculer les coefficients de corrélation totale entre tous les éléments pris deux par deux. Ce calcul, portant sur les variables transformées X_i et Y peut être mené à bien à l'aide de n'importe quelle méthode classique.

b) Dresser une matrice de corrélation d'après le modèle suivant, Y étant la variable dépendante et X_i les variables indépendantes

	Y	X_1	X_2		X_m
Y	1	r_{YX_1}	r_{YX_2}		r_{YX_m}
X_1	r_{X_1Y}	1	r		$r_{X_1X_m}$
X_2	r_{X_2Y}	$r_{X_2X_1}$	1		$r_{X_2X_m}$
X_m	r_{X_mY}	$r_{X_mX_1}$	$r_{X_mX_2}$		1

Naturellement, $r_{X_i X_j} = r_{X_j X_i}$ et $r_{YX_i} = r_{X_i Y}$

c) Supprimer la colonne critère (la colonne Y) de cette matrice et reporter la ligne critère (la ligne Y) en bas après la dernière ligne de la matrice. On obtient ainsi une matrice oblongue qui se présente de la manière suivante :

$$\begin{array}{cccc}
 | & r_{x_1 x_2} & \dots & r_{x_1 x_m} \\
 r_{x_2 x_1} & | & \dots & r_{x_2 x_m} \\
 \hline
 r_{x_m x_1} & r_{x_m x_2} & \dots & | \\
 r_{Y x_1} & r_{Y x_2} & \dots & r_{Y x_m}
 \end{array}$$

d) A la droite de cette matrice oblongue, tracer autant de colonnes que la matrice en comporte plus une colonne supplémentaire ou colonne de contrôle. Remplir les colonnes intermédiaires, diagonalement en partant en haut à gauche avec des moins un (-1) sans rien inscrire dans la dernière ligne et compléter avec des zéros. Dans la colonne de contrôle, porter la somme algébrique S des termes de chaque ligne. (Cf. le cadre A du tableau A.)

e) Exécuter les calculs en suivant le schéma de principe exposé au tableau A et illustré par un exemple théorique à 3 variables indépendantes ($m = 3$).

A — 4. ÉVALUATION DE LA PRÉCISION OBTENUE.

A 41. — Sélection des variables dominantes :

Les variables dites indépendantes figurant dans les calculs peuvent, en réalité, se trouver plus ou moins étroitement liées. En conséquence, il est impossible d'affirmer que l'introduction d'une variable supplémentaire entraîne automatiquement une diminution de la variance résiduelle et une augmentation du coefficient de corrélation multiple.

Parmi les différentes méthodes possibles pour déterminer la précision obtenue en estimant Y, nous avons choisi le calcul et la comparaison de la variance résiduelle à la variance totale. Concrètement, nous calculons la régression pour toutes les combinaisons des variables prises de toutes les manières possibles (une par une, deux par deux, trois par trois, etc...) et nous retenons la ou les combinaisons de variables indépendantes conduisant à la plus petite variance résiduelle. Cette méthode, assurément fort longue, se révèle pleine d'enseignements et permet souvent, au prix d'un léger sacrifice de précision, d'estimer les temps opérationnels en ayant recours à un faible nombre de variables. C'est ce que nous verrons ultérieurement.

Un exemple de tableau de comparaison des variances résiduelles est donné en annexe (Tableau E).

A 42. — Précision de la prévision :

Après avoir choisi les variables à retenir, le calcul du coefficient de corrélation multiple R permet d'apprécier l'intensité de la liaison et la précision obtenue. Une analyse de variance permet ensuite de tester la signification de ce coefficient.

Il est enfin possible de calculer, pour un seuil de probabilité donné, l'intervalle de confiance de l'estimation du temps opérationnel.

A — 5. ÉTABLISSEMENT ET MISE EN PLACE D'UN PLAN EXPÉRIMENTAL.

A 51. — Étude du processus technique de production :

La mise en place d'un plan expérimental pour la prévision de temps opérationnels implique une connaissance aussi parfaite que possible de la technique utilisée et du déroulement des opérations élémentaires de fabrication. Cette étude doit être approfondie et surtout systématique pour ne rien oublier. Elle doit être faite sur le « tas », par un technicien averti qui utilisera, avec le plus grand profit, le système d'analyse constitué par le graphique de déroulement des étapes (Tableau D).

Pour une même opération globale (confection d'un moule à la main en châssis en sable, par exemple), le nombre des opérations élémentaires peut atteindre une centaine. Celles-ci sont ensuite regroupées pour obtenir des étapes principales, homogènes du point de vue technique, dépendantes du point de vue durée, en première approximation, des mêmes facteurs simples.

A 52. — Choix préliminaire des caractéristiques :

C'est à partir de ces étapes principales que l'on dresse une liste des caractéristiques qui semblent influencer sur les temps. On peut d'ailleurs retrouver le ou les mêmes facteurs dans plusieurs étapes. Ce mode opératoire permet de ne rien oublier. Il est toutefois nécessaire, pour appréhender certains facteurs aléatoires, de répéter plusieurs fois une telle analyse graphique. C'est l'ensemble des observations qui permettra d'établir la liste définitive des étapes et des caractéristiques qui vont donner lieu, dans l'usine, à des relevés systématiques pour obtenir les données de base nécessaires aux calculs de régression.

A 53. — Collecte des données :

La collecte des données doit être faite avec beaucoup de soin, de leur exactitude dépend, en grande partie, la validité des résultats définitifs.

a) Mesure des temps de réalisation.

Deux méthodes peuvent être utilisées, le chronométrage et les relevés de temps réels.

Si les temps sont chronométrés, ils doivent être corrigés par le jugement d'allure et ramenés à l'allure cent. Ceci implique que les chronométrages soient faits par des chrono-analyseurs qualifiés. Il est souhaitable que ces derniers aient une bonne connaissance de la technique pour éviter les fraudes de la part des exécutants. Il est naturellement nécessaire de prendre les précautions habituelles en matière de chronométrage.

Le manque de personnel qualifié, certaines difficultés propres à une usine, peuvent conduire à abandonner le chronométrage pour utiliser des temps réels obtenus en divisant, par le nombre de pièces réalisées, le temps total d'exécution d'une série. Ce temps peut d'ailleurs être indiqué par l'exécutant lui-même ou observé par un tiers. Ce système, peut-être moins précis que le précédent, n'entraîne pas, en général, de réactions fâcheuses de la part du personnel. Notons cependant qu'il est souhaitable d'obtenir, pour une même pièce, des temps d'exécution relevés à des dates différentes et par des ouvriers différents. On peut ainsi calculer un temps moyen qui, dans une certaine mesure, n'est pas influencé par l'allure d'exécution.

b) Relevés des caractéristiques.

Les caractéristiques quantitatives, mesurables, doivent être contrôlées soigneusement. Il est désirable qu'elles subissent un examen critique de la part d'un technicien averti qui peut ainsi détecter des anomalies.

En ce qui concerne les caractéristiques qualitatives ou repérables, il est bon qu'elles fassent l'objet d'une détermination par deux personnes différentes et que les résultats obtenus soient confrontés. En cas de divergence, un nouvel examen en commun du problème s'impose. On atténuera ainsi, dans une certaine mesure, l'arbitraire inévitable dû au caractère subjectif de ces jugements.

B. — ÉTUDES CONCRÈTES

B I. APPLICATIONS DES PRINCIPES.

Les divers problèmes qui viennent d'être évoqués ne doivent pas être perdus de vue lors de travaux en usine. L'application des méthodes de calculs ne doit pas être automatique. Elle exige une sérieuse étude préalable des possibilités d'exécution.

B II. — Forme des fonctions :

Il résulte des recherches que nous avons entreprises que les diverses liaisons entre les variables peuvent pratiquement être rendues linéaires par transformation logarithmique. Il semble que nous nous trouvions ici dans un domaine dans lequel joue la loi de l'effet proportionnel.

B I2. — Conditions de validité :

Les conditions de validité d'une analyse de régression paraissent satisfaites ou peuvent être satisfaites dans ces études de temps opérationnels, tout au moins en fonderie. Mais il est indispensable, à chaque étude nouvelle, de le vérifier. Il ne faut pas oublier qu'une négligence dans ce domaine peut conduire à des résultats totalement faux.

Lors de l'utilisation ultérieure des résultats de l'analyse de régression en vue de la prévision, il est bon de s'assurer, de temps à autre, que ces conditions sont toujours vérifiées.

B. — 2. LES TEMPS DE MOULAGE DANS UNE ACIÉRIE (Méthode d'Aitken).

B 21. — Nature de l'étude :

Il s'agit d'une fonderie d'acier moulé sur modèle de la région parisienne. L'opération étudiée est la confection à la main de moules en sable, destinés à réaliser des pièces noyautées ou non dont le poids varie de 0 Kg 300 à 800 Kgs. Notons que le moulage en acier est caractérisé par l'importance de la mise au mille (rapport du poids de métal nécessaire pour faire une pièce au poids net de cette pièce) qui peut atteindre 5.

B 22. — Étude préliminaire :

Une étude graphique assez poussée avait mis en évidence l'influence dominante de trois caractéristiques dominantes :

- x_1) le poids des pièces (voir graphique F donné en exemple) ;
- x_2) le temps de noyautage par kg ;
- x_3) la mise au mille.

sur le temps de moulage par kilo de pièce y .

Les liaisons avaient pu être rendues linéaires par les changements de variable suivants :

$$X_i = \log x_i$$

$$Y = \log y$$

L'équation de régression était donc de la forme :

$$\log y = a + b_1 \log x_1 + b_2 \log x_2 + b_3 \log x_3$$

on disposait de 309 groupes de données de base déjà existantes dans l'usine.

B 23. — Calcul des coefficients de régression :

Désignons par :

- T le log du temps de moulage par kilo Y
- t le log du temps de noyautage par kilo X_2
- P le log du poids des pièces X_1
- M le log de la mise au mille par kilo X_3

1) On a calculé les coefficients de corrélation totale entre ces variables en groupant les observations par classe suivant la méthode classique. On a obtenu les 6 coefficients :

$$r_{PM} = -0.70 \qquad r_{PT} = -0.93$$

$$r_{Pt} = -0.80 \qquad r_{Mt} = 0.50$$

$$r_{Tt} = 0.77 \qquad r_{TM} = 0.71$$

2) On a dressé une matrice de corrélation

	T	t	P	M
T	1	0.77	-0.93	0.71
t	0.77	1	-0.80	0.50
P	-0.93	-0.80	1	-0.70
M	0.71	0.50	-0.70	1

3) On a calculé les coefficients de régression b_1, b_2, b_3 par la méthode de réduction pivotale d'Aitken (voir tableau B).

4) On obtient en définitive, en arrondissant les coefficients de régression calculés, la formule suivante :

$$\hat{T} = 0.10 t + 0.12 M - 0.77 P$$

dans laquelle \hat{T} , t , M et P sont exprimés en écart-types (variables réduites).

L'influence prépondérante du poids sur le temps de moulage est ainsi mise en évidence, ce qui justifiait notre méthode de pondération de la production du moulage pour les mesures de productivité.

B 24. — Précision des résultats :

On a calculé le coefficient de corrélation multiple R , en remplaçant respectivement dans l'équation obtenue t, M et P par r_{Tt}, r_{TM}, r_{TP} et en extrayant le carré du résultat on trouve :

$$R = 0.95$$

caractéristique d'un excellent ajustement entre les temps réalisés et les temps calculés.

B — 3. LES TEMPS DE MOULAGE DANS UNE FONDERIE DE FONTE (Méthode de Doolittle).

B 31. — Nature de l'étude :

Il s'agit d'une étude menée dans une petite fonderie de fonte sur modèle de l'Est de la France. Les pièces, dont le poids varie entre 1 et 2.000 kilos, sont toutes moulées à la main, au sable en châssis.

B 32. — Étude préliminaire :

A la suite d'une étude systématique du moulage, à l'aide de graphiques de déroulement des étapes, réalisée par un technicien averti du Syndicat Général des Fondateurs de France, Centre de Productivité, M. Berlancourt, Ingénieur E. S. F., 5 étapes principales ont été dégagées et 11 caractéristiques retenues, à savoir :

Étapes principales :

- 1) Serrage dessous.
- 2) Serrage dessus.
- 3) Démoulage.
- 4) Taillage coulée, événements, masselottes, attaques.
- 5) Remmoulage et chargement ou crampage.

Caractéristiques :

- 1) Poids de la pièce.
- 2) Dimensions châssis (L. l. Ht).
- 3) Nombre coulées, masselottes.
- 4) Nombre d'attaques.
- 5) Haut. de décrochement du joint (h = 0 = joint plat).
- 6) Nombre de joints.
- 7) Nombre de noyaux.
- 8) Nombre en classe.
Petit une main Posé (PP).
Petit une main Ajusté (PA).
Moyen deux mains un homme Posé (MP).
Moyen deux mains un homme Ajusté (MA).
Gros deux hommes ou au pont Posé.
Gros deux hommes ou au pont Ajusté.
- 9) Nécessité d'une couche (Oui ou Non).
- 10) Nature du modèle :
Métal (M).
Bois neuf avec congés (BNC).
Bois neuf sans congés (BN).
Bois usagé avec congés (BUC).
Bois usagé sans congés (BU).
- 11) Coefficient de difficulté de 1 à 3.

B 33. — Collecte des données :

Un technicien de l'usine fut chargé de recueillir les données sans d'ailleurs utiliser des chronométrages. On établit une fiche de renseignements par pièce et ces fiches furent contrôlées d'abord sur place par M. Berlancourt lors de passages à l'usine puis à Paris au Centre de calcul.

B 34. — Examen préliminaire des données :

- 1) Une analyse graphique très approfondie des données avait abouti aux conclusions suivantes :
- certains regroupements et des transformations logarithmiques des variables ($X_i = \log x_i$ et $Y = \log y$) conduisent à des liaisons linéaires ;
 - il existe des liaisons entre certaines variables dites « indépendantes » ;
 - le nombre de données concernant les pièces à joint multiples est insuffisant. Ces pièces ont été éliminées et l'étude concerne uniquement les pièces à un joint plat ;
 - il semble possible de rechercher directement les régressions entre le temps total et les caractéristiques de pièces.
- 2) Il restait en définitive à mener à bien une étude de régression linéaire entre les variables transformées suivantes : T étant la variable dépendante.

- T = log temps de confection d'un moule par k° de pièce contenue dans ce moule ;
- P = log du poids de la pièce ;
- C = log de (volume du châssis/Poids de la pièce) ;
- M = log de (nombre de coulées de masselottes/Poids de la pièce) ;
- A = log de (nombre d'attaques/Poids de la pièce) ;
- N (I) = log de (indice de remoulage/Poids de la pièce) ;
- B = log de (indice du modèle/Poids de la pièce).

3) Pour choisir l'ensemble de variables donnant la meilleure estimation possible du temps T, nous avons calculé les 63 régressions obtenues en prenant toutes les variables indépendantes de toutes les manières possibles.

B 35. — Calcul des coefficients :

1) On a calculé, en disposant systématiquement les calculs pour obtenir un contrôle automatique de l'exactitude des résultats :

$$\begin{aligned} & - \sum X_i^2 \\ & - \sum Y^2 \\ & - (\sum X_i)^2 \\ & - (\sum Y) \\ & - \sum (X_i - X_j) (X_j - X_j) \quad (i, j) = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \\ & - \sum (X_i - X_j) (Y - Y) \end{aligned}$$

2) On a rempli 63 tableaux de Doolittle en assurant un autocontrôle des résultats. En annexe on trouvera en exemple le tableau C relatif à la régression

T
P.C.M.A.N.B.

chaque tableau donne :

- les b_j ;
- la variance résiduelle.

(I) L'indice de remoulage est obtenu en faisant la somme des produits : (nombre de noyau d'une classe par valeur de la classe).

La valeur de chaque classe de noyau a été établie par une petite étude de régression entre le noyautage et le temps de remoulage.

et ainsi de suite jusqu'à ce que tous les termes de la partie gauche du tableau aient disparus (cadre D de l'exemple). Les coefficients de corrélation partielle apparaissent alors dans la partie centrale.

Contrôle : Les calculs sont contrôlés après avoir servi chaque ligne du tableau en formant :

$$\sum_{i=2}^6 D_{hi}$$

qui doit être égal à D_{h7} .

ANNEXE

La fonderie de seconde fusion entre dans les industries de transformation de matériaux bruts (métaux) en produits finis ou semi-finis (pièces).

La pièce est obtenue à partir d'une empreinte où est coulé le métal.

A) L'empreinte est réalisée dans un matériau réfractaire et plastique (sable argileux), ou métallique (coquille), à l'aide d'un outil (modèle) et d'outillages complémentaires (fouloir, châssis, etc...).

La confection de l'empreinte fait intervenir de nombreuses opérations, telles que :

- la préparation du sable dans une sablerie (ou non) ;
- la confection du moule à l'aide du modèle (donnant les formes extérieures de la pièce) et châssis, fouloirs ;
- le démoulage du modèle ;
- l'étuvage ou élimination de l'humidité du sable ;
- la confection des noyaux en sable pour les parties internes des pièces (si elles existent) ;
- le remmoulage, c'est-à-dire la fermeture du moule après la mise en place des noyaux.

L'empreinte est alors prête à recevoir le métal liquide obtenu à partir de :

B) La fusion et la coulée (remplissage du moule).

Le métal est fondu dans un four (cubilot, four électrique) suivant sa nature, recueilli dans une poche, introduit dans la pièce par des chenaux et coulées.

Le métal se contracte et se refroidit dans le moule.

On extrait la pièce par :

C) Les opérations de finition :

Le décochage sépare la pièce des matériaux ayant servi à sa confection.

Le déburrage enlève les noyaux.

L'ébarbage élimine les appendices de la pièce nécessités par la coulée (attaques, événements, masselottes).

L'opération se fait de préférence après décapage (jet de grenailles).

Ces opérations peuvent se compléter par les traitements thermiques, la soudure, l'usinage, les traitements de protection (émaillage, chromage).

FABRICATION D'UNE PIÈCE DE FONDRIE

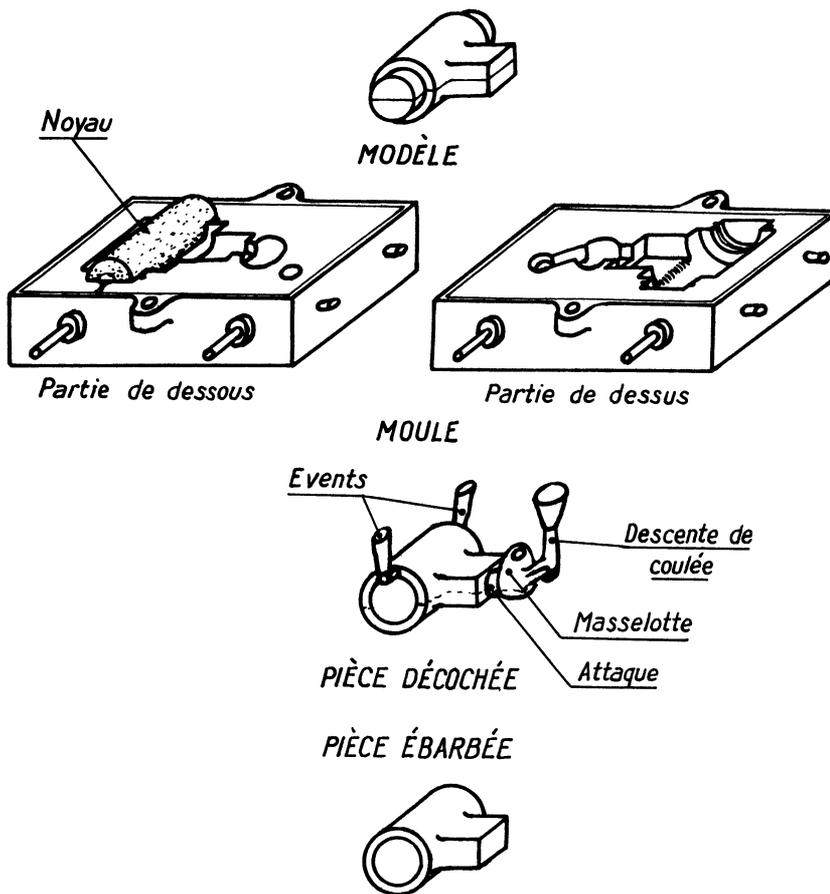


TABLEAU A
Schéma de calcul des coefficients de régression
Méthode d'Aitken modifiée avec pivot converti en unité

	i	1	2	3	4	5	6	7
	h							Contrôle
A	1	1	$r_{x_1x_2}$	$r_{x_1x_3}$	-1	0	0	$S = \sum_{i=1}^6 1i$
	2	$r_{x_2x_1}$	1	$r_{x_2x_3}$	0	-1	0	$S = \sum_{i=1}^6 2i$
	3	$r_{x_3x_1}$	$r_{x_3x_2}$	1	0	0	-1	$S = \sum_{i=1}^6 3i$
	4	r_{yx_1}	r_{yx_2}	r_{yx_3}	0	0	0	$S = \sum_{i=1}^6 4i$
	5		D_{52}	D_{53}	D_{54}	D_{55}	D_{56}	D_{57}
B	6		D_{62}	D_{63}	D_{64}	D_{65}	D_{66}	D_{67}
	7		D_{72}	D_{73}	D_{74}	D_{75}	D_{76}	D_{77}
	8		D_{82}	D_{83}	D_{84}	D_{85}	D_{86}	D_{87}
	9		D_{93}	D_{94}	D_{95}	D_{96}	D_{97}	
C	10		$D_{10.3}$	$D_{10.4}$	$D_{10.5}$	$D_{10.6}$	$D_{10.7}$	
	11		$D_{11.3}$	$D_{11.4}$	$D_{11.5}$	$D_{11.6}$	$D_{11.7}$	
D	12			$D_{12.4}$	$D_{12.5}$	$D_{12.6}$	$D_{12.7}$	
				b_1	b_2	b_3		
				Coefficient de regression				

TABLEAU B

			t	P	M	Contrôle
1	-.8034	.5037	-1	.	.	-.2997
-.8034	1	-.7046	.	-1	.	-1.5080
.5037	-.7046	1	.	.	-1	-.2009
.7747	-.9305	.7107	.	.	.	+.5549
	(.3545)	-.2999	-.8034	-1	.	-1.7488
	1	-.8460	-2.2663	-2.8209	.	-4.9332
	-.2999	.7463	.5037	.	-1	-0.0499
	-.3081	.3205	.7747	.	.	±0.7871
		.4926	-.1760	-.8460	-1	-1.5294
		1	-.3573	-1.7174	-2.0301	-3.1048
		0.0599	0.0765	-0.8692		-0.7328
			0.0979	-0.7663	0.1216	-.5468

ANALYSE DE RÉGRESSION
SOLUTION DES ÉQUATIONS NORMALES
MÉTHODE DE DOOLITTLE

TABLEAU C

Schémas des calculs	P b _i	C b ₂	M b ₃	A b ₄	N b ₅	B b ₆	$\Sigma(x_i - \bar{x})(y - \bar{y})$	Contrôle
1	a ₁ 34,910115	a ₁₂ -5,74113	a ₁₃ -28,487847	a ₁₄ -23,666570	a ₁₅ 5,300291	a ₁₆ -33,387713	a ₁₀ -13,101963	- 64,917796
2		a ₂₂ 5,391991	a ₂₃ 5,101386	a ₂₄ 5,165917	a ₂₅ -3,774582	a ₂₆ 5,894933	a ₂₀ 3,247153	+ 14,432679
3		4,153979	a ₃₃ 94,831676	a ₃₄ 19,400543	a ₃₅ -1,042931	a ₃₆ 27,354292	a ₃₀ 10,778470	+ 57,935589
4				a ₄₄ 18,802900	a ₄₅ -4,679084	a ₄₆ 22,264373	a ₄₀ 8,461850	+ 45,750535
5					a ₅₅ 105,174646	a ₅₆ -2,454214	a ₅₀ 1,447618	+ 100,041744
6						a ₆₆ 36,251771	a ₆₀ 12,342736	+ 68,266844
7								
8								
9 = (1). C ₂₁ + 0,188316		-1,238012	-5,364717	-4,456794	1,015078	-6,287441	-2,467307	- 12,225060
2 = (2) + (9)		5,391991	5,101386	5,165917	-3,794582	5,894933	3,247153	14,432679
10 = (2) + (9)		4,153979	-0,263331	0,709123	-2,779504	-0,392508	0,779846	2,207619
11 = (1). C ₃₁ + 0,816034		-5,364705	-23,247052	-19,312726	4,398661	-27,245509	-10,691639	- 52,975129
12 = (10). C ₂₁ + 0,063392			-0,016693	0,044953	-0,176198	-0,024482	0,049436	0,139945
13 = (3) + (11) + (12)			24,831676	19,400543	-1,042931	27,354292	10,778470	57,935589
			1,567931	0,132770	3,179532	0,083903	0,136267	5,100405
14 = (1). C ₄₁ + 0,677929				-16,044254	3,654235	-22,634499	- 8,882194	- 44,009656
15 = (10). C ₃₁ + 0,170709				-0,121054	0,474486	0,067005	- 0,133127	- 0,376860
16 = (13). C ₂₁ + 0,084678				-0,011243	-0,269236	0,007105	- 0,011539	- 0,431892
4 = (4) + (14) + (15) + (16)				18,802900	-4,673084	22,264979	8,461850	45,750535
17 = (4) + (14) + (15) + (16)				2,626349	-0,813599	-0,309620	- 0,1565010	+ 0,932127
18 = (1). C ₅₁ - 0,154405					-0,832288	+5,155230	+ 2,023907	+ 10,023632
19 = (10). C ₄₁ + 0,669118					-1,859816	-0,262634	+ 0,521809	+ 1,477158
20 = (13). C ₃₁ - 2,027852					-6,447620	-0,170139	- 0,276329	- 10,342866
21 = (17). C ₂₁ + 0,312068					-0,255771	-0,096622	- 0,176321	- 0,290887
5 = (5) + (18) + (19) + (20) + (21)					105,174646	-2,454214	1,447618	100,041744
22 = (5) + (18) + (19) + (20) + (21)					95,779151	+2,171621	3,539784	101,990555
C _{ij} (i ≠ j) est obtenu par le rapport -a _{ij} ... -a _{jj} ...								
23 = 1. C ₆₁ + 0,956391								
24 = 10. C ₅₁ + 0,094490								
25 = 13. C ₄₁ + 0,053511								
26 = 17. C ₃₁ + 0,117890								
27 = 22. C ₂₁ + 0,022673								
6 = (6) + (23) + (24) + (25) + (26) + (27)								
28 = (6) + (23) + (24) + (25) + (26) + (27)								
29 = Solution de (28)								
Substitution dans (22)								
" " (17)								
" " (15)								
" " (10)								
" " (1)								
30 = $\Sigma(y - \bar{y})^2 = 6,493102$		b ₂ = 0,245275	b ₃ = 0,030288	b ₄ = -0,210688	b ₅ = 0,038408	b ₆ = -0,063983	32/f	J. MORICEAU
	b ₁ = -0,514355						v ² = 0,013832	Tableau de calculs N° 201
	31 = Σb_i a ₁₀ = 5,345019	32 = 30 - 31 = 1,148083					f degré de liberté: 83	

Les nombres portés dans la 1ère colonne après les C indiquent la valeur et le signe de ces coefficients.

TABLEAU D

GRAPHIQUE DE DÉROULEMENT DES ÉTAPES DU TRAVAIL
MÉTHODE ACTUELLE — PROPOSÉE

SUJET ÉTUDIÉ Petit moulage main répétitif
 DÉBUT DU GRAPHIQUE Mise en chantier de la plaque-moûle
 FIN DU GRAPHIQUE autre feuille
 ÉTUDIÉ PAR M. DUPONT LE 16 Juillet 1954

GRAPHIQUE N° 3 FEUILLE N° 2 DE 1 P.

OPÉRATIONS <input type="checkbox"/> TRANSPORTS <input type="checkbox"/> CONTRÔLES <input type="checkbox"/> ARRÊTS Δ STUCAGES	MÉTHODE DÉCRITE	ECONOMIES
	NOMBRE	NOMBRE
TOTAL	TEMPS	TEMPS
DISTANCES		

É T A P E S	SYMBOLES	POUR UNE ÉTAPE		POUR TOUT LE CYCLE		NOTES
		TEMPS	DISTANCE	FRÉQUENCE	DISTANCE	
1 Premnent la P.M.	⊙ □ □ □ Δ	0 à 0,07				
2 Place deux cales	⊙ □ □ □ Δ	0,17				
3 Dépose la plaque dessus	⊙ □ □ □ Δ	0,10				
4 Vers châssis placé verticalement sur le côté	⊙ □ □ □ Δ	0,05	1m			
5 Le nettoie au marteau	⊙ □ □ □ Δ	0,50				
6 Vers pot d'eau	⊙ □ □ □ Δ	0,05	1,5m			
7 Mouille le châssis	⊙ □ □ □ Δ	0,1				
8 Vers le tas de sable près mur	⊙ □ □ □ Δ	0,05	2m			
9 Brasse le sable avec une pelle	⊙ □ □ □ Δ	0,8				
10 Vers châssis	⊙ □ □ □ Δ	0,05	2m			
11 Appelle un aide	⊙ □ □ □ Δ	0,05				
12 Mettent le châssis sur plaque	⊙ □ □ □ Δ	1				
13 Met goujons et descentes de coulée	⊙ □ □ □ Δ	0,2				
14 Suspendre gris sur plaque	⊙ □ □ □ Δ	0,2				
15 Vers tamis	⊙ □ □ □ Δ	0,05	1m			
16 Frotte sable sur plaque	⊙ □ □ □ Δ	0,4				
17 Pré-serrage d'approche à la main (suite du graphique sur les autres feuilles)	⊙ □ □ □ Δ	1'				

SGFF-APFPHI

