LES RÈGLES ET CERCLES A CALCUL

DE FRED. W. TAYLOR ET CARL G. BARTH

POUR L'APPLICATION DU SYSTÈME TAYLOR DANS L'ATELIER DE MÉCANIQUE

PAR

L. DESCROIX

A la suite de la publication des trois importants mémoires de Fred. W. Taylor sur « l'Organisation du Travail dans les usines » (1), la Direction de la *Revue de Métallurgie* a reçu un grand nombre de questions relatives à l'application des méthodes préconisées. L'emploi des règles à calcul a particulièrement retenu l'attention des ingénieurs et constructeurs français, mais les explications complémentaires qu'ils sollicitaient durent rester momentanément sans réponse, faute des documents nécessaires. Aujourd'hui, grâce à l'obligeance de MM. Taylor et Barth, nous sommes en mesure de donner satisfaction à la légitime curiosité de nos lecteurs et de leur exposer en détail le mode d'emploi des différents instruments à calcul imaginés par les deux éminents ingénieurs.

C'est en décembre 1901, au Congrès de New-York de la Société Américaine des Ingénieurs Mécaniciens, que se trouve signalé pour la première fois l'emploi de ces règles dans un mémoire de M. H. L. Gant « Un Système de primes pour la rémunération du travail ». L'auteur de ce mémoire déclarait alors que les règles en question étaient en usage avec succès dans le grand atelier de mécanique de la Bethlehem Steel Company.

On en retrouve une seconde mention dans le mémoire sur « L'Organisation des Ateliers », lu à Saratoga en juin de l'année suivante, par M. Fred. W. Taylor. Mais ce n'est qu'en décembre 1903, au Congrès de New-York de la même Société, que M. Carl G. Barth en exposa le principe et le mode d'emploi.

« M. Taylor, dit-il (2), s'occupa, dès le début de sa carrière, de faire des expériences en vue de se documenter sur les résistances éprouvées dans la taille de l'acier avec des outils tranchants, ainsi que sur les relations existant entre la profondeur de coupe et l'avance, d'une part, la vitesse de coupe et la durée possible de l'outil, d'autre part. Dans sa situation initiale d'ingénieur de la Midvale Steel Company, il poussa assez loin ses recherches pour pouvoir faire un emploi heureux et systématique des résultats obtenus. Toutefois, ceux-ci se rapportaient uniquement aux outils en acier au carbone et n'étaient naturellement pas applicables à l'acier moderne à grande vitesse, en sorte que l'invention et l'introduction de cet acier nécessitèrent de nouvelles expériences. »

Celles-ci furent commencées à Bethlehem, d'après les instructions de

(1) Voir la *Revue de Métallurgie*, nos 1 à 7, IV, 1907.

(2) Slide rules for machine Shop and Taylor system, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, XXV.

M. Taylor et au point de vue de l'acier seulement ; elles furent reprises ultérieurement dans les ateliers de MM. William Sellers and Co, de Philadelphie, où M. Barth consacra quinze mois à opérer sur l'acier et sur la fonte avec des outils de formes et de dimensions variées. On dépensa alors, dans ces recherches, environ 25 t. de métal.

Dans son mémoire sur la « Taille des Métaux », M. F. W. Taylor a donné l'expression mathématique des différentes lois qui régissent ce travail. Leur application la plus importante se trouve indubitablement dans l'usinage dégrossisseur au tour à grande vitesse et c'est pour ce type de machines qu'ont été établies les premières règles à calcul permettant l'application mécanique des lois mathématiques trouvées.

Considérons, par exemple, le cas d'un tour de type ancien, à commande par courroie, cône de poulies et harnais d'engrenage.

Pour déterminer la manière la plus économique d'enlever d'une pièce une quantité donnée de métal, il faut tenir compte de douze variables. Bien qu'elles se trouvent déjà énumérées dans le mémoire de M. Taylor, nous les reproduisons ici dans l'ordre où les a présentées M. Barth :

- I. Calibre et forme des outils à employer ;
- II. Emploi (ou non emploi) d'un réfrigérant sur l'outil ;
- III. Nombre d'outils à faire travailler en même temps ;
- IV. Temps pendant lequel les outils doivent pouvoir travailler (durée de l'outil) ;
- V. Dureté du métal à tourner (Numéro de classe) ;
- VI. Diamètre de la pièce ;
- VII. Profondeur de coupe à prendre ;
- VIII. Avance à employer ;
- IX. Vitesse de coupe ;
- X. Pression de coupe, produite par l'outil en prise ;
- XI. Combinaison de vitesses à employer pour obtenir à la fois la vitesse convenable de coupe et la pression de coupe requise ;
- XII. Rigidité de la pièce.

A l'exception de la dernière, toutes ces variables figurent dans la règle à calcul, en sorte que si la pièce possède une rigidité suffisante pour permettre de prendre n'importe quelle passe, dans les limites de puissance du tour et de force de l'outil, on pourra confier le maniement de la règle à une personne qui n'aura rien à déterminer de sa propre initiative dans la résolution du problème. Si, au contraire, la pièce ne possède pas une rigidité suffisante, cette personne devra être douée de jugement et d'une certaine expérience pratique.

Les promoteurs du système espèrent cependant avoir un jour assez de données quant au rapport entre la rigidité de la pièce, d'une part, et, d'autre part, les profondeurs de coupe et les avances ne produisant pas un broutement préjudiciable, pour pouvoir éliminer tout coefficient personnel de la résolution du problème.

Il reste donc onze variables qui toutes, sauf la troisième et la dixième,

dépendent uniquement des qualités tranchantes de l'outil ; d'autre part, toutes, à l'exception des deuxième, quatrième et neuvième, entrent dans une autre série de relations dépendant de la puissance du tour. Le problème que résoud la règle à calcul initiale est la détermination de la combinaison de vitesses qui permettra d'utiliser aussi complètement que possible *toute la puissance du tour et la pleine capacité de coupe des outils* employés, en supposant que, dans chaque cas particulier, on aura assigné certaines valeurs aux neuf autres variables.

Si le tour était capable de faire un nombre quelconque de révolutions par minute entre certaines limites et si l'on pouvait exprimer algébriquement, en fonction du nombre de révolutions, le couple moteur disponible au point d'attaque de l'outil, le problème se réduirait à la résolution, par les méthodes algébriques, de deux équations simultanées à deux inconnues. Pour l'instant, on n'a inventé aucun mécanisme moteur ayant ces propriétés et il ne semble pas qu'on doive jamais le réaliser ; aussi, bien que le problème consiste toujours dans la résolution de deux équations simultanées ou de deux séries de relations entre un certain nombre de variables, sa solution devient forcément approximative ; par les méthodes mathématiques ordinaires, elle exigerait un travail infini alors qu'elle est d'une remarquable simplicité au moyen de la règle à calcul.

Pour mieux faire comprendre le principe sur lequel repose la règle multiple dont nous allons parler, nous emprunterons au mémoire de M. Barth l'exposé général qu'il en fait :

« La méthode de résolution par la règle à calcul, dit-il, peut aussi être employée à la résolution de nombreux problèmes similaires susceptibles d'une solution algébrique, rigoureuse et directe. »

Après avoir rappelé comment on peut résoudre graphiquement deux équations à deux variables de l'une des formes $y + x = a$, $y - x = b$, $xy = c$, $\frac{y}{x} = d$, il passe à l'exposé de leur résolution par la règle.

La figure 1 représente une règle à calcul au moyen de laquelle on peut résoudre tout problème de la forme générale : « La somme et la différence de deux nombres étant données, quels sont ces nombres ? »

« La règle est disposée pour la résolution du cas dans lequel la somme des deux nombres est 12 et leur différence, 3, en sorte que nous pouvons écrire :

$$y + x = 12 \quad \text{et} \quad y - x = 3.$$

« Dans la règle, la graduation supérieure fixe représente les valeurs possibles de la somme des deux nombres à trouver. Dans l'exemple choisi, la somme étant égale à 12, on a placé en regard de ce nombre la flèche correspondant au zéro de la réglette supérieure.

« La graduation de cette réglette représente les valeurs possibles du plus petit x des deux nombres et la graduation centrale fixe représente les valeurs possibles du plus grand y ; ici, ces deux dernières échelles sont disposées l'une par rapport à l'autre de telle façon que l'addition de deux nombres quel-

conques de leurs graduations placés en regard l'un de l'autre reproduise le nombre correspondant à la flèche, soit douze.

« La graduation inférieure fixe représente les valeurs possibles de la diffé-

Fig. 1. — Type de règle à calcul pour la résolution des deux équations $y + x = a$ $y - x = b$.

Fig. 2. — Tour n° 12 admettant un diamètre de 4.600 mm., construit par la Bement Steel Co., pour lequel la règle de la figure 3 a été établie.

rence des deux nombres; celle-ci étant égale à trois dans le cas présent, on a placé en regard de ce chiffre la flèche de la réglette inférieure dont la graduation donne également les valeurs possibles du plus petit des deux nombres x . Comme la graduation du milieu correspond aux valeurs de y , il s'en suit qu'entre deux nombres quelconques en regard l'un de l'autre de cette graduation et de la réglette inférieure x , il existe une différence constante égale à 3 ».

Les réglettes étant ainsi disposées, il suffit de chercher sur la règle fixe

médiane la valeur de y pour laquelle sont égales les deux valeurs de x correspondantes sur les réglottes. On trouve ainsi la solution :

$$y = 7,5 \quad \text{et} \quad x = 4,5$$

« De la même manière, on peut établir une règle pour la solution du problème général : « Le produit et le quotient de deux nombres étant donnés, quels sont ces nombres ? »

« Une telle règle ne différencierait de la précédente que par la substitution d'échelles logarithmiques aux échelles arithmétiques.

« Par la combinaison des deux systèmes d'échelles, on peut même construire des règles pour la résolution des problèmes généraux suivants : « La « somme et le produit ou la somme et le quotient, ou la différence et le produit, « ou bien encore la différence et le quotient de deux nombres étant donnés, quels « sont ces nombres ? ».

Une multiplicité d'autres problèmes peuvent être résolus de la même façon (M. Barth pense que des règles de ce genre, ou même plus simples, seraient d'un excellent usage dans l'enseignement des premiers éléments d'algèbre ; il estime qu'elles fourniraient un excellent moyen d'inculquer aux jeunes gens la notion, généralement assez difficile à comprendre, des opérations sur les valeurs négatives).

Ceci posé, nous avons une idée suffisante des principes mis en jeu pour la parfaite compréhension du fonctionnement de la règle à calcul, objet principal de la présente note.

Cette règle, représentée par la figure 3, a été établie pour le tour n° 12 dont nous donnons ici une photographie (fig. 2). Ce tour est destiné à l'usinage dégrossisseur de l'acier, au moyen d'un outil type (de Taylor) à bec rond, de 22×47 mm. La règle a quatre réglottes numérotées 2, 3, 5, 6, groupées par paire de chaque côté d'une règle fixe, numérotée 4, portant les diverses avances réalisables sur le tour pour lequel a été spécialement établi l'instrument.

La graduation inférieure de la règle médiane 4, avec les réglottes inférieures 2 et 3 et les deux graduations fixes 1, situées plus en dessous, constitue la partie dite SECTION VITESSE de la règle. La graduation supérieure de la règle médiane 4, ainsi que les graduations supérieures 5 et 6 et la graduation fixe 7, situées au-dessus, constituent de même la partie dite SECTION PUISSANCE.

Les graduations de la SECTION VITESSE interprètent les lois qui régissent la vitesse de coupe (IX) en fonction de la durée de l'outil (IV), de la profondeur de coupe (VII) de la dureté du métal (V) et de l'avance (VIII), bien qu'il n'y ait, en fait, aucune échelle correspondant directement aux vitesses de coupe. Celles-ci sont représentées par les échelles indiquant les diamètres de la pièce et les nombres de tours de l'arbre de la poupée et, partant, de la pièce.

Une règle établie pour un outil de dimensions différentes aurait une SECTION VITESSE s'écartant légèrement de celle représentée ici, puisque les formules établies par F. W. Taylor et donnant les relations entre les vitesses de coupe, la profondeur de coupe et l'avance, varient avec le calibre de l'outil.

Les graduations de la SECTION PUISSANCE interprètent la loi régissant la

Fig. 3. — Règle de MM. Taylor et Barth, établie pour le tour n° 12 de la figure 2 travaillant avec un outil-type à bec rond de 22×47 mm. Cette règle sert à déterminer l'avance et la combinaison de vitesses à employer pour dégrossir les pièces dans le minimum de temps, en utilisant toute la puissance de l'outil et de la machine.

Dimensions de la règle : 185×485 mm.

LÉGENDE :

Lathe n° 42 = Tour n° 12. — *Steel* = Acier. — $7/18" \times 1\ 3/8"$ *Standard Round nose roughing tool* = Outil-type dégrossisseur à bec arrondi de 22×47 mm. — *Life of tool without water* = Durée de l'outil sans injection d'eau. — *Life of tool with water* = Durée de l'outil avec injection d'eau. — *Depth of cut without water* = Profondeur de coupe sans injection d'eau. — *Depth of cut with water* = Profondeur de coupe avec injection d'eau. — *Class number of material* = Numéro de classe (dureté) du métal. — *Diameter of work* = Diamètre de la pièce. — *Speed combinations* = Combinaisons de vitesses. — *Back gear in* = Engrenage intermédiaire en prise. — *Back gear out* = Engrenage intermédiaire débrayé (prise directe). — *Spindle rev. per min.* = Tours de l'arbre de poupée par minute. — *Longitudinal feed* = Avance longitudinale. — *Number of tools* = Nombre d'outils.

pression de coupe (X) en fonction de la profondeur de coupe (VII) et de l'avance (VIII). Toutefois, il n'y a aucune graduation représentant directement la pression de coupe, celle-ci étant implicitement définie par l'avance que nous déterminons possible avec une profondeur de coupe et un diamètre de pièce donnés, eu égard aux combinaisons de vitesses du tour pour lequel la règle est établie. En effet, chaque combinaison de vitesses de la machine représente un certain couple disponible pour le travail, couple qui, divisé par le diamètre de la pièce, donne la pression (ou effort) de coupe possible.

La SECTION PUISSANCE est la même pour tous les calibres d'outils, M. Taylor ayant établi une formule unique convenant approximativement à toutes les pressions de coupe et à tous les calibres d'outils dégrossisseurs. Cependant, dans la SECTION PUISSANCE d'une règle pour le travail de la fonte, la flèche-repère unique de la règle 6 est remplacée par une échelle de dureté car, pour ce métal, la pression verticale sur l'outil varie considérablement avec la dureté, tandis que pour l'acier, elle reste à peu près indépendante de cet élément.

Il est bon de signaler en passant que la première règle établie sur le principe général de celle-ci indiquait directement les vitesses de coupe (en pieds par minute) et les pressions (en livres). On se rendit compte néanmoins que la construction de la règle gagnerait beaucoup en simplicité en supprimant les échelles représentant ces deux variables.

La règle représentée est établie pour un tour unique n° 12, mais, dans un atelier, on établit ces règles de manière à ce qu'elles puissent servir pour tous les tours, horizontaux et verticaux. Les données spéciales à chaque machine sont alors portées sur des réglottes amovibles en bois mince qu'on insère dans la partie médiane 4 et dans les réglottes adjacentes 3 et 5. La façon dont ces parties amovibles sont disposées dans les logements correspondants est indiquée par des traits ponctués sur le modèle reproduit ici.

Le tour spécial n° 12, correspondant à la règle et représenté (fig. 2), est une puissante machine à commande par courroie, admettant un diamètre de 1.600 mm. construite par la Bement Niles Co de Philadelphie. C'est une modification indiquée par M. Barth, du tour sur lequel la Bethlehem Steel Co présenta les premiers outils Taylor-White à grande vitesse à l'Exposition de 1900, à Paris, et du tour semblable d'expérience reproduit dans le mémoire sur la « Taille des Métaux » (1). Ce tour n'a que deux séries possibles de vitesses, dont l'une produite par un engrenage intermédiaire entre le cône de poulies et l'arbre de poupée. Sur la règle, ces changements de vitesse sont indiqués par les mots « Back gear in » (engrenage en prise) (série A) et « Back gear out » (commande directe sans engrenage, série B). Le rapport de réduction entre ces deux vitesses est de 9 : 1.

Le cône de poulies a cinq étages désignées par les chiffres 1, 2, 3, 4, 5, en allant du plus fort au plus petit.

Le cône du renvoi est monté sur un arbre pouvant prendre deux vitesses dans le rapport de 3 : 1; celles-ci sont désignées sur la règle par les lettres F (Fast = vite) et S (Slow = lent).

(1) *Revue de Métallurgie*, page 137, n° 2 (1907), tome IV.

Cette disposition procure à l'arbre de poupée un total de vingt vitesses différentes en progression géométrique parfaite dont la raison est $\sqrt[5]{3} : 1$, soit 1,246 : 1.

Prenons, par exemple, la combinaison de vitesses désignée par le symbole 3-B-F sur la réglette n° 3. Cette indication correspond à la courroie placée sur l'étage n° 3 du cône, à la réduction la plus faible, par suite la plus rapide, sans engrenage (B) et à la plus grande vitesse de l'arbre du renvoi (F). Cette combinaison donne à l'arbre de poupée une vitesse de 66,6 tours, indiquée sur la réglette.

Dans la SECTION PUISSANCE, sur la réglette n° 5, en raison du groupement plus serré des deux séries de combinaisons de vitesses, celles-ci sont marquées 1-2-3-4-5-A-F au lieu de 1-A-F, 2-A-F, etc.

Le problème général à résoudre au moyen de cette règle consiste à déterminer l'avance et la combinaison de vitesses du tour qu'on doit employer pour dégrossir une pièce dans le minimum de temps possible, sous certaines réserves. Comme nous l'avons dit plus haut, cela revient à déterminer la combinaison de vitesses et d'avance qui permettra d'utiliser simultanément *toute la puissance du tour* et la *pleine capacité de coupe de l'outil*. Si, dans un cas donné, la règle indique deux combinaisons d'avance et de vitesse, on prendra la solution qui donnera l'avance la plus forte et la vitesse la plus faible, parce qu'une *plus forte avance n'implique pas une vitesse proportionnellement plus lente* et parce que *la durée de la coupe est inversement proportionnelle au produit de l'avance par la vitesse*.

Cependant, comme ce tour, de même que la majorité des machines-outils, ne possède qu'un nombre limité de combinaisons d'avances et de vitesses, il est rare que la règle donne deux solutions simultanées permettant d'utiliser à la fois toute la puissance disponible sur la courroie et toute la capacité de l'outil. Par suite, le choix de la combinaison convenable d'avances et de vitesses n'exige ordinairement, dans chaque cas, qu'un court examen et un peu d'attention. Quoiqu'il en soit, M. Taylor déclare n'avoir jamais eu aucune difficulté à enseigner rapidement avec succès la manœuvre de ses règles à des ouvriers mécaniciens n'ayant aucune notion mathématique.

EXEMPLE D'EMPLOI DE LA RÈGLE. — Supposons qu'il s'agisse de dégrossir un lingot d'acier pour l'amener d'un diamètre de 30" (765 mm.) au diamètre de 29" (737 mm.), la longueur de cette pièce étant de 6' 6" (environ 2 m.) et la dureté du métal étant estimée de la classe 13 (1). Quelle avance et quelle combinaison de vitesses doit-on employer pour faire ce travail dans le minimum de temps possible, l'outil étant refroidi par l'eau et devant durer deux heures?

Solution : 1. — Placer la règle 2 de la SECTION VITESSE de telle manière que la graduation correspondant à 1/2 pouce sur l'échelle *profondeur de coupe avec eau* (Depth of cut with water), de la réglette n° 2, coïncide avec la graduation correspondant à une durée de deux heures de la règle n° 1 (Life of tool with

(1) Voir *Revue de Métallurgie*, p. 449, n° 4 (1907), t. IV.

water). Nous ferons ainsi le dégrossissage de 1 pouce (25,4 mm.) en deux passes de chacune 1/2 pouce (12,7 mm.);

2. — Placer la réglette 3 de telle façon que le trait 30" (763 mm.) de l'échelle *diamètre de la pièce* (Diameter of work) vienne en regard du trait 13 de l'échelle de dureté (Class Number of Material) de la réglette 2;

3. — Disposer la réglette 6 de la SECTION PUISSANCE de telle manière que le trait 1 de l'échelle du *nombre d'outils* (Number of Tools) n° 6 soit en regard du trait 1/2 pouce de la règle n° 7, *profondeur de coupe* (Depth of cut);

4. — Pousser la réglette 5 jusqu'à ce que le chiffre 30" de l'échelle des *diamètres de la pièce* (Diameter of work) n° 5, soit en face de la flèche-repère de la réglette 6.

Cela fait, la règle se trouve disposée pour la recherche de la combinaison de vitesses et d'avance à employer. Cette recherche est semblable à celle des valeurs y et x dans l'exemple de la règle à deux coulisses que nous avons donné au début de cet article : y est ici l'avance longitudinale (longitudinal Feed) à rechercher sur la règle médiane 4, pour laquelle les valeurs de x (combinaison de vitesses = Speed combination) des réglettes 3 et 5 sont égales.

L'examen de la règle montre immédiatement qu'à l'avance $k = 5/32'' = 0'' 156$ (3,95 mm.), correspond à peu près exactement sur les deux réglettes la combinaison de vitesses 1-A-F. Cette lecture faite s'interprétera donc de la façon suivante :

- 1) L'avance longitudinale à prendre est de 5/32 de pouce;
- 2) La vitesse qui convient pour l'arbre de la poupée est de 4,77 tours par minute et s'obtient :
 - a) En mettant la courroie sur l'étage le plus large du cône de poulies (1);
 - b) En embrayant l'engrenage intermédiaire de la poupée (A);
 - c) En mettant la courroie commandant l'arbre du renvoi sur la poulie de grande vitesse (F).

Les règles complémentaires. — CERCLE POUR LE CALCUL DU TEMPS. — Au début de son étude sur la « Taille des Métaux », M. Taylor pose comme première base de sa méthode d'« Organisation du travail dans l'atelier de mécanique » le principe suivant :

« Assigner à chaque ouvrier, chaque jour et d'avance, une tâche définie, avec des instructions écrites et détaillées, en lui limitant exactement le temps à consacrer à chaque partie du travail. »

Il importe donc de connaître exactement le temps nécessaire à l'usinage d'une pièce, de même qu'il importe à l'ouvrier de vérifier si la condition de durée imposée à l'outil est réalisable.

Pour répondre à cette double fin, M. Barth a établi le cercle à calcul représenté par la figure 4. Cet instrument se compose essentiellement de deux disques de carton superposés, surmontés d'un secteur ou curseur en celluloïd portant un trait de repère. Le disque supérieur, de plus petit diamètre que le disque inférieur, pivote sur l'axe ainsi que le curseur. En serrant un écrou

moleté se vissant sur le pivot, on peut immobiliser le disque supérieur sans gêner le mouvement du curseur.

L'instrument porte quatre graduations circulaires :

1. — Sur le bord du grand disque inférieur, les *durées* de 0,2 minute jusqu'à 20 heures;

2. — A l'intérieur de la première, une graduation en *tours par minute*, depuis 0,1 jusqu'à 500;

3. — Sur le bord extérieur du disque mobile, les *avances* depuis 0" 0005 (0,0125 mm.) jusqu'à 2" (51 mm.);

4. — Intérieurement à la précédente, une graduation donnant la *longueur de course de l'outil* depuis 1/4" (6,4 mm.) jusqu'à 100' (30,5 m.).

Soit à rechercher exactement la durée du dégrossissage au tour pour lequel nous venons de déterminer les conditions d'avance et de combinaison de vitesses :

La vitesse de révolution de l'arbre de poupée, c'est-à-dire de la pièce, est 4,77 tours par minute et l'avance employée est de 5/32 pouce, soit 0,156 pouce;

Plaçons donc la division 0,156" de la graduation extérieure (3) du petit disque en regard de la division 4,77 de la graduation intérieure (4) du grand disque. La longueur de la pièce étant de 6' 6", amenons le trait de repère du curseur en celluloïd au-dessus de la division correspondante de la graduation intérieure (4) du petit disque. Nous pourrons alors lire la durée du travail sur la graduation extérieure (1) du grand disque, en regard du même trait de repère, soit 1 h. 45'. L'outil satisfera donc aux conditions de travail qui lui sont imposées. On conçoit que cet instrument s'applique au calcul de la durée de l'usinage d'une pièce, non seulement sur le tour, mais sur une perceuse ou tout autre machine analogue.

CERCLE POUR LE CALCUL DE LA VITESSE. — Pour le finissage des pièces, l'effort moteur du tour n'entre plus en ligne de compte et le problème se réduit à une simple question d'avance et de vitesse que l'on peut résoudre au moyen du cercle établi par M. Barth et représenté par la figure 5.

Ce cercle à calcul se compose, comme le précédent, de deux disques en carton et d'un curseur en celluloïd, le petit disque et le curseur pivotant sur l'axe commun. Le grand disque porte trois graduations qui, en allant de la périphérie vers le centre, donnent les indications suivantes :

1^o Temps en minutes par dix révolutions de l'arbre de poupée et de la pièce;

2^o Tours par minute;

3^o Vitesse de coupe en pieds par minute.

En regard de cette dernière, le petit disque en porte une quatrième donnant le diamètre de la pièce en pieds et pouces. Il porte, en outre, deux flèches correspondant aux deux premières échelles du grand disque. Comme précédemment, le curseur en celluloïd porte un trait de repère.

Étant donné un outil finisseur, nous connaissons la vitesse de coupe à laquelle il peut travailler; il s'agit de trouver la combinaison de vitesses

du tour permettant de la réaliser ou de s'en rapprocher le plus possible.

Reprenons l'exemple précédent : le diamètre de la pièce est de 30'' ; supposons que l'outil finisseur employé nous permette une vitesse de coupe de

Fig 4. — Cercle de Barth pour le calcul de la durée de l'usinage d'une pièce donnée. (Barth's time slide rule).

Time = Temps. — Revolutions per minute = tours par minute. — Feed = Avance. — Length of run = Longueur de course.

90' par minute ; nous placerons le petit disque de manière que le trait 30'' soit en regard du trait 90' de la graduation n° 3, et nous lirons en regard de l'une des flèches que l'arbre de poupée doit faire 11,5 tours par minute, en regard de la deuxième flèche, qu'il fera dix tours en 0,87 minute environ. En se reportant

à la règle du tour n° 12 (fig. 3), nous constatons que la vitesse de 11,5 tours par minute correspond à la combinaison 5-A-F. Nous devons donc mettre la courroie sur la poulie intermédiaire de la poupée (A) et passer la courroie sur la poulie à grande vitesse de l'arbre de renvoi (F).

Fig. 5. — Cercle de Barth pour la détermination de la vitesse à employer pour le finissage d'une pièce à une vitesse de coupe donnée. (*Barth's speed slide rule*).

Time in minutes for 10 rev = Temps en minutes pour 10 tours. — *Revolutions per minute* = Tours par minute. — *Cutting speed in feet per minute* = Vitesse de coupe en pieds par minute. — *Diameter of work* = Diamètre de la pièce.

Pour simplifier les opérations, lorsqu'un cercle de ce genre doit être spécialement affecté à une machine, il existe des cercles semblables où la graduation extérieure du temps par dix révolutions est supprimée; l'espace

correspondant y est laissé en blanc afin qu'on puisse y inscrire les combinaisons de vitesses admissibles pour la machine considérée. La figure 6 donne la reproduction d'un cercle établi pour le tour n° 43, dont il a été question dans les

Fig. 6. — Cercle de Barth appliqué à un tour déterminé.

expériences de M. Taylor. Le maniement se fait de la même façon que pour le cercle ordinaire à calculer la vitesse.

Il est bon de dire ici que le type général de cercle pour le calcul de la vitesse n'a pas été imaginé en vue de l'usage que nous venons d'indiquer : M. Barth l'a créé au cours des expériences sur la taille des métaux, pour s'affranchir du fonctionnement irrégulier des compteurs de tours, dits de poche.

Avec un chronomètre et un compas d'épaisseur ou tout autre instrument de mesure convenable, le cercle à calcul permet de déterminer la vitesse de rotation d'une pièce quelconque avec autant de précision qu'à l'aide d'un excellent

Fig. 7. — Application du cercle de Barth à la détermination d'une vitesse de coupe.

compteur de tours et sans risque d'erreurs par suite d'usure ou de toute autre cause.

Pour cela, ayant tracé un trait à la craie sur la pièce, que nous supposons avoir $9 \frac{1}{2}''$ de diamètre, nous observons au chronomètre que cette pièce fait 30 tours en 1,32 minute. Il s'agit de déterminer le nombre de tours fait par minute et la vitesse de coupe de l'outil. La pièce faisant 30 tours en 1,32 minute, elle accomplit dix révolutions en 0,44 minute. Plaçons la

flèche correspondante en regard de la division 0,44 de la graduation extérieure; la deuxième flèche indiquera la vitesse de 22,7 tours par minute; d'autre part, on lit en regard du diamètre de $9\frac{1}{2}''$ une vitesse de coupe de 56,5' par minute (fig. 7).

Lorsqu'on ne dispose pas d'un chronomètre gradué en centièmes de minute, on peut employer pour les observations, un chronomètre à secondes; une échelle de conversion des secondes en centièmes de minute a été tracée, dans ce but, au verso du cercle.

Autre application du cercle à calcul, faite par M. BARTH.

CERCLE A CALCULER LES ENGRENAGES. — Outre les instruments qu'il a créés pour l'application des méthodes d'organisation rationnelle du travail dans l'atelier de mécanique, M. Carl G. Barth a imaginé un cercle à calcul intéressant à signaler à la suite de cette étude parce qu'il montre la fécondité de cette méthode pour la résolution rapide de problèmes compliqués.

Il s'agit d'un instrument pour calculer l'effort admissible sur les dents d'engrenage de tous les tracés en usage en Amérique.

Il y a 18 ans environ, M. Wilfred Lewis publia sa « Recherche sur la résistance des dents d'engrenage », d'abord dans son mémoire lu, le 15 octobre 1892, au Club des Ingénieurs de Philadelphie, et ultérieurement, dans l'*American Machinist* des 4 mai et 22 juin 1896.

Dans cette « Recherche », dit M. Barth, M. Lewis tint pour la première fois compte de l'influence de la forme de la dent d'engrenage sur sa résistance, alors qu'avant lui les expérimentateurs s'étaient contentés de considérer la dent comme un simple levier d'une épaisseur égale à celle qu'elle mesure sur le cercle primitif, et d'assigner, en conséquence, la même résistance pour un pignon de quelques dents que pour une roue d'un grand nombre de dents ayant même pas et même largeur que ce dernier.

Après avoir examiné les différentes manières suivant lesquelles la charge peut être appliquée à une dent d'engrenage, M. Lewis décida d'admettre que l'effort total transmis par un engrenage pouvait être appliqué à l'extrémité d'une dent unique; toutefois, n'envisageant que le cas de roues d'excellente fabrication, il supposait la charge uniformément répartie sur toute la largeur de la dent.

Sur cette base, il a déterminé une série de facteurs de résistance (strength factors) pour les dents d'engrenages droits, en divers nombres, dans les trois systèmes en usage courant aux États-Unis :

1° Denture cycloïdale avec cercle générateur d'un diamètre égal au rayon du pignon de douze dents;

2° Profils en développante de cercle à 15° ligne d'engrènement à 75° sur le rayon joignant les centres des deux cercles primitifs (système Brown and Sharpe) et à 20° (70°) (système William Sellers et Co);

3^e Denture épicycloïdale ou à flanc droit.

Il a calculé pour chaque système des tableaux des facteurs de résistance ; cependant, en raison de la concordance à peu près complète des chiffres obtenus pour le système cycloïdal et le tracé en développante à 15°, il a fusionné en un seul tableau les résultats relatifs à ces deux systèmes.

En ce qui concerne l'effort admissible sur une dent d'engrenage d'un métal donné, M. Lewis, comme d'autres techniciens avant lui, a admis qu'en raison de la plus grande tendance au choc et de la plus grande usure des engrenages tournant à grande vitesse, il y avait lieu de réduire, à mesure que la vitesse augmente, la charge statique introduite dans la formule pour le calcul de la résistance des dents. Dans l'impossibilité où il était d'établir d'après une base rationnelle la relation convenable entre l'effort et la vitesse, il s'est contenté de donner une table empirique d'origine anglaise, donnant des valeurs de ce rapport pour les engrenages en fonte. Or, en les portant sur un diagramme, les données de cette table montrèrent de grandes irrégularités ; aussi, M. Lewis a-t-il adopté depuis le facteur de vitesse $\frac{600}{600 - v}$ très simple à introduire dans la formule pour le calcul de l'effort admissible pour un engrenage tournant à la vitesse circonférencielle de v pieds par minute.

L'expression de la charge de travail convenant à un engrenage droit devient alors

$$W = \frac{600}{600 - v} s p f y,$$

formule dans laquelle

W est la charge de travail,

v , la vitesse circonférencielle de la roue en pieds par minute,

s , l'effort statique admissible pour le métal considéré,

p , le pas circulaire de l'engrenage,

f , la largeur de la dent,

y , facteur de résistance tiré des tables de Lewis pour une roue du nombre de dents et du tracé considéré.

Depuis que M. Lewis a publié pour la première fois sa « Recherche », diverses tentatives ont été faites pour établir des diagrammes et des tables basés sur son travail afin qu'on puisse trouver plus facilement la résistance d'un engrenage en éliminant du calcul quelques-uns des facteurs de la formule ci-dessus ; aucun de ces diagrammes ou tableaux n'a été assez complet pour être d'un emploi courant. Pendant quelque temps, il a même existé un cercle à calcul pour la résolution de la formule au moyen des tables originales de Lewis, qui donnent les facteurs de résistance et de vitesse. Quoi qu'il en soit, M. Barth paraît avoir été le premier à construire un instrument de calcul dans lequel il est tenu compte de toutes les variables de la formule.

Quand il essaya d'utiliser les facteurs originaux de résistance de Lewis en les portant sur un diagramme à divisions logarithmiques, il constata quelques

légères irrégularités qu'il fut possible de corriger, les corrections n'atteignant à 2 0/0 que dans quelques rares cas et à 4 0/0 dans un seul cas.

Fig. 8. — Cercle de Barth pour calculer les roues d'engrenage.

GRAND DISQUE : *Number of teeth in gear* = Nombre de dents de la roue. — *Cycloidal and 15° involute systems* = Denture cycloïdale et tracé en développante à 15°. — *Radial flank system* = Denture à flanc droit. — *20° Involute system* = Tracé en développante à 20°. — *Tangential load on gear in pound* = Effort tangentiel sur la roue en livres.

DISQUE MOYEN : *Number of teeth per inch of diameter* = Nombre de dents par pouce de diamètre. — *Circular pitch* = Pas circulaire. — *Face* = Largeur de la dent.

PETIT DISQUE : *Permissible stress on material at no velocity in pounds per square inch of section* = Charge statique admissible par unité de section pour le métal (livres par pouce carré de section). — *Circumferential velocity of gear, in feet per minute* = Vitesse circonférencielle de la roue en pieds par minute.

Le cercle à calcul établi par M. Barth est représenté par la figure 8. Il com-

porte trois disques : un grand disque inférieur, un disque moyen et un disque supérieur, ce dernier avec deux graduations sur des secteurs circulaires de diamètre différent ; un curseur en celluloïd, portant un trait de repère, et un bouton moleté complètent l'instrument.

Sur le grand disque se trouvent :

1) Les échelles de facteurs de puissance pour différents nombres de dents avec les différents tracés, et

2) Une échelle des efforts tangentiels convenables de travail, exprimés en livres.

Le disque moyen porte sur sa périphérie :

3) Une échelle donnant le nombre de dents par pouce de diamètre, au-dessous de laquelle se trouve

4) Une graduation correspondant au pas circulaire. Intérieurement à cette dernière, il existe

5) Une graduation donnant en pouces la largeur de la dent.

6) La graduation sur le secteur de plus petit diamètre du petit disque est celle des efforts statiques admissibles en livres par pouce carré de section, tandis que

7) Le secteur de grand diamètre du même disque est gradué en fonction de la vitesse circonférencielle de la roue en pieds par minute.

L'emploi de ce cercle à calcul est des plus simples :

1. — Amener le trait de repère du curseur sur le nombre de dents de la roue dont on veut calculer la résistance ; employer pour cela l'échelle 1) du grand disque, correspondant au tracé adopté ; amener le disque moyen dans une position telle que le pas diamétral 3) ou circulaire 4) coïncide avec le trait de repère, puis serrer le bouton moleté ;

2. — Placer le trait de repère du curseur sur le nombre correspondant à la largeur de la dent (échelle intérieure 5) du disque moyen), desserrer le bouton moleté et placer sous le trait de repère le chiffre donnant sur le petit secteur du petit disque 6) la charge statique admissible pour le métal considéré, et serrer à nouveau le bouton moleté.

3. — Amener le trait de repère du curseur sur le trait donnant la vitesse circonférencielle de la roue (échelle 7) du grand secteur du petit disque) et lire en regard, sur l'échelle des efforts tangentiels du grand disque, l'effort transmissible en livres.

Donnons un exemple numérique :

Quel serait l'effort admissible pour une roue dentée à profil en développante à 20° , ayant 40 dents, $1\frac{1}{2}$ par pouce (1 par 17 mm.), 5" de largeur (127 mm.) et faite en fonte pouvant travailler à 8.000 livres (5,6 kg. par millimètre carré) ; vitesse circonférencielle 600' par minute (183 m.). C'est l'exemple pour lequel est disposé l'instrument représenté sur la figure 8.

On trouve que l'effort possible est de 5.200 livres (2.360 kg. environ).

M. Barth signale un rapport simple qui permet de calculer de même la force d'un pignon conique en fonction du pignon droit ayant même nombre de dents, avec même pas et même largeur.

CONCLUSIONS. — De cette étude on peut dégager les conclusions suivantes :

1) Les règles imaginées par MM. Taylor et Barth pour l'usinage dégrossisseur au tour doivent être *spécialement établies* pour chaque machine et pour chaque outil, ce qui exige un nombre assez considérable d'observations faites pour chaque machine dans des conditions méthodiquement variées. Toutefois, on peut concevoir les règles dans des conditions telles qu'elles soient utilisables pour tout un groupe de tours en y insérant, comme nous l'avons indiqué, des graduations amovibles spéciales à chaque machine. Par conséquent, à ceux de nos lecteurs qui nous demandaient où l'on peut se procurer ces règles, nous devons répondre qu'on ne les trouve nulle part en Europe, à notre connaissance, et qu'elles ne peuvent d'ailleurs être établies que d'après les données expérimentales recueillies par les constructeurs des machines ou les ateliers les utilisant. Nous croyons savoir cependant qu'un constructeur français d'instruments de haute précision a l'intention d'étudier la question ;

2) Le calcul de la vitesse de finissage au tour, de perçage ou d'alésage, s'opère très simplement *pour n'importe quelle machine* à l'aide du cercle spécial de M. Barth ;

3) Quant au cercle pour le calcul du temps, il est également possible d'en faire une application générale ;

4) Enfin, le calcul de l'effort transmissible par engrenage pourrait être effectué très rapidement de façon mécanique en établissant un cercle à calcul dans le système métrique, pour les différents tracés de denture couramment employés en France.