

L'usage du calcul à la production : le cas des nomogrammes pour machines-outils au xx^e siècle

Aristotle TYMPAS

Maître de Conférences, Université d'Athènes

Foteini TSAGLIOTI

Doctorante, Université d'Athènes

APRÈS LA DEUXIÈME GUERRE MONDIALE, alors que les nomogrammes ont fait leurs preuves depuis le début du siècle et qu'ils sont disponibles à très bas coût, voire même gratuitement, *American Machinist* recommande à la communauté de la machine-outil de prendre le risque d'investir dans des machines de calcul électronique onéreuses mais susceptibles de donner un coup d'accélérateur à une automatisation recherchée de longue date¹. Parallèlement à cet engouement pour la CN/CNC², les pages jaunes de l'*American Machinist Reference Sheet* continuent de proposer des nomogrammes très utiles aux calculs quotidiens dans l'industrie des machines-outils. De nombreux traités de nomographie ont fait l'objet de plusieurs éditions depuis l'entre-deux-guerres : un livret sur les nomogrammes, édité en 1936 sous forme de circulaire de l'Engineering Experiment Station (EES) dans les *Ohio State University Studies*, est notamment repris en l'état dans l'édition de 1947. Comme le remarque

1. Anderson ASHBURN, « Will the computer really? », *American Machinist*, 10 août 1970.

2. David F. NOBLE, *Forces of Production: A Social History of Industrial Automation*, Oxford, Oxford University Press, 1984 ; Philip SCRANTON, « The Shows and Flows: Materials, Markets, and Innovations in the US Machine Tool Industry, 1945-1965 », dans *History and Technology*, 25, septembre 2009, 1, p. 257-304.

le sous-directeur de la EES : « *Le développement de l'utilisation du graphique d'alignement dans l'industrie était souligné par la demande continue et croissante pour ce livret. Il a été réimprimé plusieurs fois sans la moindre révision.* »³

LA PERSISTANCE DE L'UTILISATION D'ARTEFACTS DE CALCUL NON MÉCANIQUES

Les multiples nomogrammes pour machines-outils publiés dans *American Machinist* ne représentent qu'une fraction d'un corpus considérable de graphiques publiés dans ce périodique ou dans d'autres revues de référence du secteur. À la différence des graphiques de type cartésien, les nomogrammes ou « graphiques d'alignement » se composent d'axes qui ne se croisent pas. Alors que pour les courbes classiques l'œil est attiré par la ligne décrivant la relation, les nomogrammes sont élaborés de façon à orienter l'utilisateur vers l'alignement de nombres et de chiffres placés sur des lignes séparées : ils visent à attirer l'attention sur l'aspect chiffré et gradué du processus de calcul. Comme le résume un ouvrage de 1958, si les tableaux ou les graphes condensent un ensemble de données sous forme tabulaire, montrent clairement la relation pertinente et facilitent les interpolations, « *les nomogrammes sont encore mieux, pour la bonne raison qu'une ligne ou une courbe sur le graphe est réduite à un simple point sur le nomogramme* »⁴.

3. Paul L. LEHOCZKY, *Alignment Charts: Their Construction and Use*, 1936 révisé par J. R. SHANK, Ohio State University Studies, Engineering Series, circulaire no. 34, 1947.

4. Om Prakash KHARBANDA, *Nomograms for Chemical Engineers*, New York Academic Press, 1958, p. 1. L'auteur propose une compilation des nomogrammes techniques chimiques.

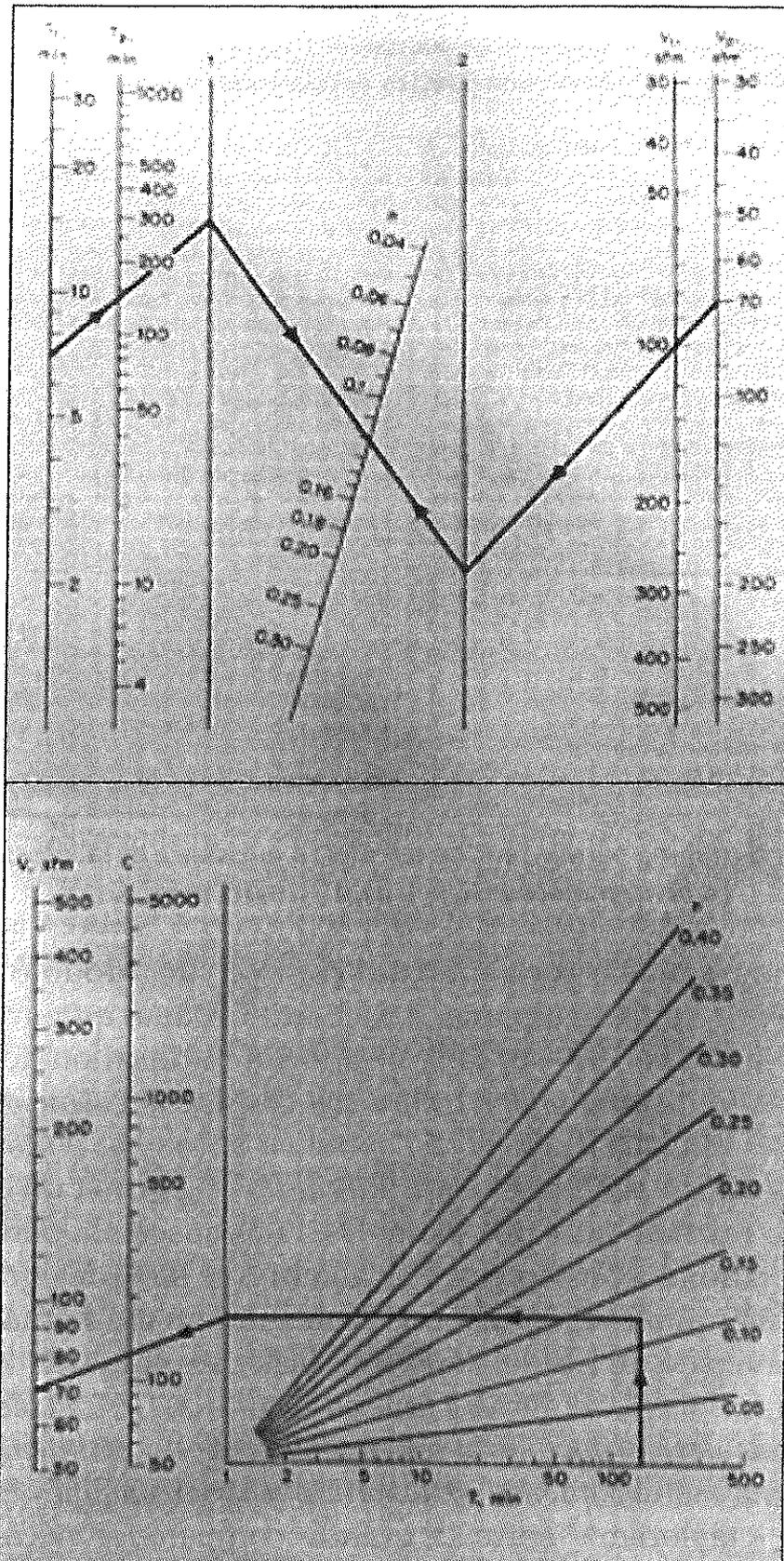


Figure 1. Nomogramme permettant de calculer la durée de vie d'un outil
(*American Machinist*, 1975, vol. 119, n° 20, novembre 1975, p. 119).

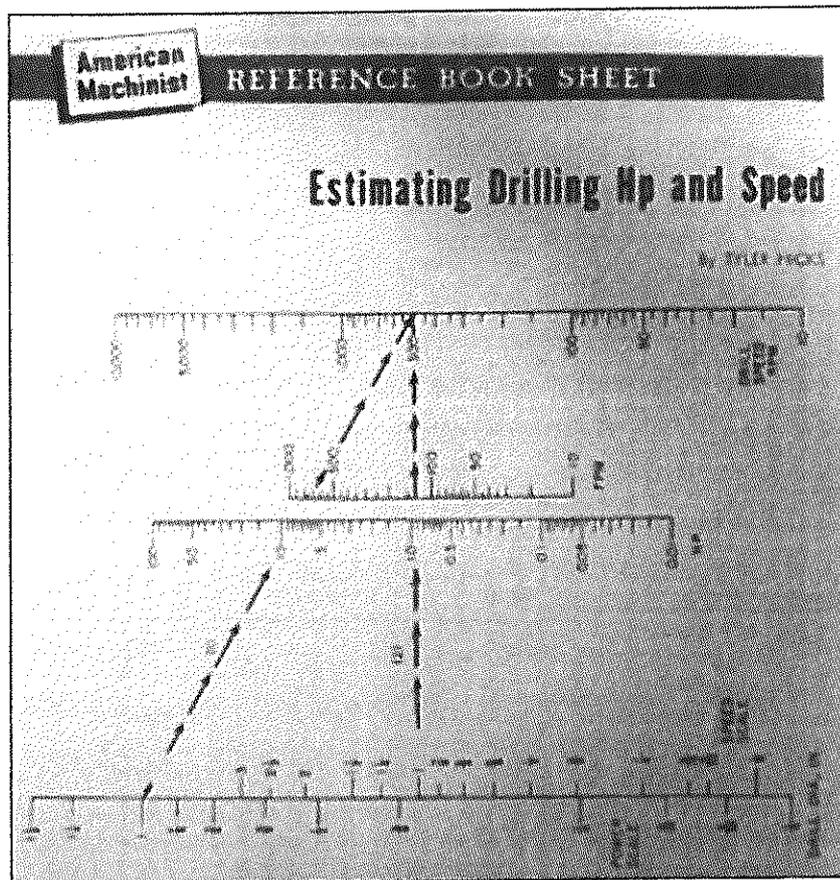


Figure 2. Nomogramme permettant de calculer la puissance et la vitesse de perçage (American Machinist, vol. 97, n° 5, mars 1963, p. 137).

Les nomogrammes sont perçus comme un double compromis graphique. Pour l'ingénieur conseil Richard T. Dana, auteur d'une introduction à un traité de 1919 sur la réalisation et l'utilisation de graphiques, « l'inconvénient du nomogramme tient à son absence de valeur picturale, mais pour obtenir ses résultats il dépend de l'opération mécanique plutôt que de l'opération visuelle réalisée par la personne l'utilisant »⁵. Il permet un bien meilleur aperçu d'une relation entre des variables, mais suscite la perte de visualisation des relations représentées. Par ailleurs, ce sont des graphes faciles à utiliser, mais complexes à élaborer. Professeur en mathématiques appliquées à l'université de Leeds, Selig Brodetsky explique en 1920 que « les nomographes sont simples et fiables à utiliser, de sorte que les calculs confiés auparavant à des calculateurs qualifiés et responsables peuvent maintenant être laissés en toute sécurité à un subordonné comparativement non qualifié »⁶. Ils illustrent le contraste « taylorien » entre la grande compétence nécessaire à leur élaboration et la compétence relativement faible nécessaire à leur utilisation. Une formation technique au lycée, comprenant des cours spécialisés

5. Allan C. HASKELL, *How to Make and Use Graphic Charts*, New York, Construction Service Company, 1919, p. 4-5.
 6. Selig BRODETSKY, *A First Course in Nomography*, Londres, Bell, 1920.

plus coûteuse et la plus aboutie d'un point de vue technique alors que le nomogramme est, au contraire, aussi simple mécaniquement qu'il est peu onéreux, voire même gratuit pour les lecteurs de *American Machinist*⁹.

Ce faible coût ne signifie pas pour autant précision inadéquate. Si la précision du nomogramme est inférieure à celle obtenue dans le cadre de la recherche en CN/CNC, elle reste adéquate pour le contexte de leur utilisation concrète. Dans leur traité de 1924, deux enseignants de l'université de Liverpool insistent sur cet aspect pragmatique : « *Il ne fait aucun doute que le graphique d'alignement permet d'obtenir aisément et avec une précision suffisante la résultante d'une tentative de choix de valeurs pour la variable en présence, permettant ainsi d'effectuer rapidement ce travail intermédiaire qui est un élément banal de la conception pratique.* »¹⁰

De plus, pour un coût donné, la précision de calcul ne saurait être isolée d'autres paramètres comme ceux de la compacité et de la portabilité d'un calculateur qui ont toujours de l'importance. Or, le nomogramme se comporte bien eu regard à ces deux paramètres : conçues pour être détachables, les pages de nomogrammes pour machine-outil peuvent être utilisées de manière souple, à la convenance de chacun¹¹.

OUTILS DE CALCULS GRAPHIQUES VERSUS OUTILS DE CALCULS MÉCANIQUES

Graphes de calcul abstraits, les nomographes sont considérés aujourd'hui par la plupart des historiens comme relevant du « calcul analogique » par opposition aux formes de calculs « numériques » de l'après-guerre¹². Mais cette opposition est anachronique. Pour les auteurs ayant rédigé des traités sur le calcul technique avant l'arrivée du calculateur électronique, la seule différence digne de ce nom était celle séparant le calcul « graphique » du calcul « mécanique ». Cette démarcation était si forte qu'elle fut reprise à la fin du XIX^e siècle comme titre de l'influent

9. Aujourd'hui, des calculateurs sont disponibles gratuitement sur la page web de *American Machinist* sur www.americanmachinist.com.

10. William J. KEARTON, George WOOD, *Alignment Charts for Engineers and Students*, Londres, Charles Griffin and Company, 1924, p. v-vi. Om P. Kharbanda va dans le même sens en 1995 : « On a souvent dit que les nomogrammes manquaient de précision. C'est sans doute vrai dans certains cas, mais cette opinion, à ce titre, n'a aucun sens dans la mesure où l'on ne dispose d'aucun point de comparaison. » Om P. KHARBANDA, *Nomograms for Chemical Engineers*, op. cit., p. 1.

11. On ne peut évaluer le nombre exact de nomogrammes publiés par *American Machinist* faute d'avoir trouvé une série complète de *American Machinist Reference Sheet*.

12. Sur la façon dont l'histoire d'une multitude de pratiques et d'artefacts de calcul a été obscurcie et faussée par la projection injustifiée de cette démarcation, voir Aristotle TYMPAS, « Calculation and Computation » dans M. C. HOROWITZ (dir.), *New Dictionary of the History of Ideas*, vol. I, Charles Scribner's Sons, New York, 2004, p. 255-259, et Aristotle TYMPAS, « Computers: Analog » dans Colin HEMPSTEAD (dir.), *Routledge Encyclopedia of 20th-Century Technology*, Londres, 2005, p. 195-199.

en nomographie, et une expérience pratique dans le dessin industriel et la construction sont indispensables aux « nomographistes », en particulier ceux qui conçoivent les nomogrammes du début du xx^e siècle. Deux enseignants du MIT soulignent qu'au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, la gamme de formations requises pour devenir nomographe reste large : « *La théorie du nomographe ne peut pas être rejetée comme n'importe quelle autre. Les mathématiciens qui le font n'ont pas conscience qu'un traitement complet du sujet s'appuie sur tous les aspects des géométries analytique, descriptive et projective, les différents domaines de l'algèbre et d'autres domaines mathématiques. Il est également vrai, toutefois, qu'un petit nombre de types de graphiques tout simples, avec une théorie élémentaire correspondante, peuvent apporter et apportent effectivement à ce stade la contribution majeure dans le monde de l'ingénierie, l'industrie, le commerce et d'autres activités. Ces types sont les seuls que nous allons considérer.* »⁷

Les nomogrammes sont une forme de représentation technique de la séparation opérée entre le processus de conception et le processus de fabrication. Comme l'indique Steven Lubar, « *le machiniste est pris dans les filets des images de l'ingénieur* » : « *Les représentations graphiques constituent des communications asymétriques en ce sens qu'elles s'écoulent pour la plupart dans une seule direction. Elles sont empruntées de la puissance de leur organisation de distribution ; elles constituent non seulement une solution technique mais également une solution organisationnelle. Elles documentent non seulement la connaissance et la technique, mais également la puissance.* »⁸

Comparativement à d'autres graphes, les nomogrammes illustrent l'orientation vers la partie numérique d'un procédé technique parce qu'ils reposent sur l'accent mis sur le travail accumulé durant leur construction (travail mort) plutôt que sur le travail exigé pendant leur utilisation (travail vivant). Si, pendant l'entre-deux-guerres, le rapport entre le travail de calcul mort et le travail de calcul vivant, lorsque l'on travaille avec un nomogramme, semble très faible au regard de celui obtenu avec une machine de calcul, il semble encore plus petit, au point de quasiment disparaître, comparé à l'utilisation d'un calculateur électronique d'après-guerre. En ce sens, un nomogramme papier de *American Machinist* et les machines de calcul à commande numérique (CN) des années 1940 à 1970 s'opposent : ces dernières représentent la technologie de calcul la

7. Raymond D. DOUGLASS et Douglas P. ADAMS, *Elements of Nomograph*, New York, McGraw-Hill, 1947, p. v.

8. Steven LUBAR, « Representation and Power », dans *Technology and Culture*, 36, 1995, 2 (supplément), p. S68.

traité sur le calcul de Maurice d'Ocagne, professeur à la prestigieuse École polytechnique, auteur de l'expression « nomographie » et ayant joué un rôle dans le développement et la promotion du calcul nomographique¹³. Encore au début des années 1950, on trouvait des traités sur le calcul se référant au calcul graphique et au calcul mécanique comme les deux principales solutions de rechange pour effectuer des calculs.

« Les assistances graphiques et mécaniques dans les calculs techniques en viennent à occuper un champ d'application toujours plus vaste. En particulier, la règle à calcul, à la fois de type standard et de type spécial, et le nomogramme sont venus sur le devant de la scène. »¹⁴

La règle à calcul est l'équivalent mécanique le plus proche d'un nomogramme papier¹⁵. Elle se caractérise par des graduations gravées sur un matériau dur (bois, métal et/ou plastique) et placées sur un cadre fixe, ce qui leur permet de coulisser l'une à côté de l'autre. Le calcul avec la règle à calcul repose sur les relations entre les chiffres obtenus par glissement de ces graduations. Par contraste, les graduations du nomogramme sont fixes, dessinées sur du papier, et le principe est celui d'une connexion (l'alignement) des graduations en utilisant une règle élémentaire, n'importe quel bord droit faisant l'affaire.

Les traités techniques écrits au xx^e siècle présentent les règles à calcul et les nomogrammes comme des systèmes comparables, voire même interchangeables, mais force est de reconnaître que la règle à calcul convient mieux, en raison de sa solidité, à une utilisation sur site, par exemple dans une salle des chaudières ou en plein air. Les deux s'utilisent toutefois beaucoup dans le cadre de l'industrie de la machine-outil, depuis le tout début du xx^e siècle. Si, malgré le vide historiographique, nous avons réussi à trouver quelques références relatives à l'application de certaines

13. Maurice d'OCAGNE, *Le calcul simplifié par les procédés mécaniques et graphiques*, Gauthier-Villars, Paris, 1894. Joseph Lipka, le professeur de mathématiques du MIT qui fut inspiré par d'Ocagne (comme beaucoup d'autres), reprend cette distinction dans son propre grand traité. Joseph LIPKA, *Graphical and Mechanical Computation*, Wiley, New York, 1918.

14. Randolph Philip HOELSCHER, Joseph Norman ARNOLD et Stanley HOLT PIERCE, *Graphic Aids in Engineering Computation*, Indiana, Balt Publishers, West Lafayette, 1952, p. v.

15. Pour H. J. Allcock, (Callended Cable and Construction) et J. Reginald Jones (St. Catharine's College, Cambridge), le nomogramme est l'équivalent stationnaire de la règle à calcul. Harold J. ALLCOCK et John R. JONES, *The Nomogram: The Theory and Construction of Computation Charts*, Londres, Pitman, 1932.

règles à calcul au secteur de la machine-outil¹⁶, nous n'avons en revanche trouvé que peu de sources concernant les monogrammes pour machine-outil, dont l'histoire reste à faire¹⁷.

ÉVOLUTION DES CATÉGORIES DE NOMOGRAMMES SELON LES SECTEURS ET LES UTILISATEURS

Alors que les nomogrammes sont largement employés dans de nombreux domaines, de l'ingénierie à la médecine, les rares ouvrages disponibles se concentrent plutôt sur leur développement dans les mathématiques¹⁸. Pire, notre connaissance des nomogrammes techniques se limite à la période de leur émergence à la fin du XIX^e siècle¹⁹. Ceci dit, les nomogrammes en général et les nomogrammes techniques en particulier étaient affinés grâce à leur utilisation extensive bien après le début du XX^e siècle. Dans certaines disciplines techniques, leur développement et leur utilisation culminent même après l'émergence du calcul électronique. Dans les décennies d'après-guerre, plusieurs ouvrages de nomographie sont consacrés aux calculs requis dans le contexte de l'électronique technique²⁰. Encore utilisés aujourd'hui dans plusieurs secteurs, les nomogrammes sont élaborés et/ou utilisés à l'aide d'un logiciel spécial²¹ et abordés comme artefacts de calcul d'importance cruciale, notamment dans le contexte des calculs du cancer de la prostate²².

16. Sur l'importance des règles à calcul pour machine-outil au moment de l'introduction des méthodes de Taylor, Hugh G.J. AITKEN, *Scientific Management in Action: Taylorism at Watertown Arsenal*, New Jersey, Princeton University Press, Princeton, 1960, p. 33-34, 89-90, 103, 106 ; Robert KANIGEL, *The One Best Way: Frederick Winslow Taylor and the Enigma of Efficiency*, New York, Penguin, 1997, p. 327-331, 388 ; David McFARLAND, « Industrial Slide Rules: Proletarianizing the Skilled Machinist », exposé présenté devant l'American Sociological Association, Canada, Montreal Convention Center, 2006.
17. H.A. EVESHAM, « Origins and Development of Nomography », dans *Annals of the History of Computing*, 8, octobre-décembre 1986, 4, p. 324-333.
18. Thomas L. HANKINS, « Blood, Dirt and Nomograms: A Particular History of Graphs », dans *Isis*, vol. 90, 1999, 1, p. 50-80.
19. Un index de nomogrammes paru dans les principales revues est compilé en 1950 par Douglas P. Adams, professeur associé de graphiques au MIT ; il ne couvre pas la période antérieure à 1923. Douglas P. ADAMS, *An Index of Nomograms*, Londres, Chapman and Hall, 1950.
20. D. W. MOFFAT, *Charts and Nomograms for Electronics Technicians and Engineers*, New York, Gernsback Library, 1965 ; Max H. APPLEBAUM, *Electronic Engineering Nomograms*, Pennsylvanie, Tab Books, Blue Ridge Summit, 1968 ; R. L. PETERS, *Nomograms for Electronics: Instant Calculations for Designers*, Boston, Cahner Books, 1972.
21. Pour un exemple de traité récent : Gaines B. JACKSON, *Applied Nomography For the Water Utility Operator*, Pittsburgh, RoseDog Books, 2005.
22. David A. GRIMES, « The Nomogram Epidemic: Resurgence of a Medical Relic », dans *Annals of Internal Medicine*, 149, août 2008, 4, p. 273-275.

Selon John B. Peddle, la nomographie aurait été présentée pour la première fois en 1908 aux États-Unis à travers une série d'articles publiés dans *American Machinist*²³. L'utilisation des nomogrammes industriels varie d'un secteur à l'autre dans le temps²⁴. Au cours de l'entre-deux-guerres, les secteurs les plus développés de la nomographie technique concernent plutôt les industries mécaniques et électriques. Un traité de 1920 précise que « dans de nombreuses branches de la science, dans la pratique d'ingénierie, dans la technique, dans l'industrie et dans la science militaire, [la nomographie] est un moyen reconnu pour effectuer les calculs graphiques »²⁵. Pendant la période 1940-1970, l'industrie chimique et pétrochimique constitue un utilisateur de pointe de nomogrammes, comme nous le révèle un nombre considérable de publications proposant des compilations de nomogrammes à utiliser²⁶.

Les nomogrammes se composent au minimum de trois graduations parallèles mais un bon nombre se révèlent suffisamment complexes et/ou inhabituels pour ne pouvoir être utilisés que par des connaisseurs des mathématiques techniques. Instruments de la planification du travail des machines-outils, ils sont destinés aux ingénieurs eux-mêmes dirigeants ou en contact étroit avec la direction. À l'autre extrémité, les nomogrammes destinés à des travaux techniques manuels spécifiques n'exigent de leurs utilisateurs aucune qualification technique. L'espace vacant entre les graduations d'un nomogramme sert fréquemment à tracer des dessins explicatifs susceptibles de fournir une aide supplémentaire aux utilisateurs non ingénieurs et confère un aspect encore plus esthétique à l'ensemble ; d'aspect divers, certains sont ainsi singulièrement « fascinants »²⁷.

La place de la nomographie évolue également avec le statut professionnel de ses concepteurs (les nomographistes) et de ses utilisateurs : si des traités de nomographie sont tout à fait explicites quant à l'utilisation

23. John B. PEDDLE, « The construction of graphical charts », in *American Machinist*, 30 mai, 19 septembre et 14 novembre 1908. Professeur de conception de machines à la *Rose Polytechnic University*, il rassemble ses articles dans John B. PEDDLE, *The Construction of Graphical Charts*, Londres, McGraw-Hill, 1919. Pour une première liste de nomogrammes pour machines-outils et d'autres graphes de calcul publiés dans *American Machinist* et autres revues de machine-outil, voir William C. MARSHALL, *Graphical Methods for Schools, Colleges, Statisticians, Engineers and Executives*, New York, McGraw-Hill, 1921, p. 231-232. Ingénieur conseil, l'auteur a occupé la chaire de professeur de conception de machines à la *Sheffield Scientific School of Yale*.
24. Pour une utilisation de l'expression « nomographie industrielle », voir Dale S. DAVIS, *Chemical Engineering Nomographs*, New York, McGraw-Hill, 1944, p. v. Titulaire en 1924 d'un Master of Science en génie chimique du MIT, l'auteur signa en tant que « mathématicien ».
25. Selig BRODESKY, *A First Course in Nomography*, op. cit.
26. Dale S. DAVIS, *Chemical Engineering Nomographs*, op. cit. (1944) et Om P. KHARBANDA, *Nomograms for Chemical Engineers*, op. cit. (1958).
27. Faut de pouvoir être représentées avec précision par une équation, il conviendrait de tracer un nomogramme empiriquement pour reproduire les données. Comme on a pu le lire dans une compilation de nomogrammes techniques chimiques de 1958, le tracé de nomogrammes empiriques était pour certains nomographistes « particulièrement fascinant ».

prospective des nomogrammes par des techniciens peu qualifiés, d'autres auteurs laissent au contraire entendre que les nomogrammes ne sont pas conçus pour remplacer des ingénieurs qualifiés par des calculateurs humains non qualifiés mais pour aider les ingénieurs qui pourraient s'épuiser en calculs requis pour leur travail.

Certains ingénieurs construisent des nomogrammes en périodes creuses pour éviter de perdre du temps en calcul dans des périodes plus mouvementées. C'est ce que laisse entendre en 1928 George W. Swett, professeur associé de conception de machines au MIT : « *Un concepteur ou un ingénieur est rarement capable de produire un graphique qui soit entièrement satisfaisant pour le problème particulier en présence, et c'est la raison pour laquelle la capacité de construire un graphique pour des conditions spéciales peut lui faire gagner du temps et économiser de la main-d'œuvre, et éviter les erreurs coûteuses.* »²⁸

L'élaboration de nomogrammes peut se révéler être un processus exigeant supposant un appareillage spécial²⁹. Tous les nomographistes industriels sont, en général, ingénieurs, comme dans le cas de la machine-outil des années 1940-1970 où les auteurs de nomographes collaborant aux principales revues signent en tant qu'ingénieurs mécaniciens, industriels, de production et en outillage. Tous n'ont toutefois pas le même statut : au milieu du xx^e siècle, celui des nomographistes en génie chimique semble comparable au statut prestigieux des nomographistes en génie mécanique de l'entre-deux-guerres, avant que ce dernier ne s'estompe progressivement. Les ingénieurs qui envoient leurs nomogrammes à *American Machinist* après la Deuxième Guerre mondiale sont des salariés de l'industrie de la machine-outil qui n'ont, en théorie, pas le prestige des pionniers de la nomographie technique de la période d'avant-guerre. Plusieurs de ces pionniers sont bien connus dans la communauté technique nationale, ayant réussi à mettre au point des formations générales de calcul graphique et des formations spéciales en nomographie enseignées dans certaines écoles d'ingénieurs prestigieuses. À la Yale's Sheffield Scientific School, la nomographie est enseignée en complément des mathématiques appliquées jusqu'au traité de référence de Lawrence Hewes, ingénieur général adjoint au US Bureau of Public Roads et d'Herbert Seward,

28. George W. SWETT, *Construction of Alignment Charts*, New York, Wiley, 1928, p. iii.

29. Ce processus est décrit dans des traités en rapport avec des discussions des facteurs affectant la précision de construction des nomogrammes, à distinguer de la précision de l'utilisation des nomogrammes. C. Albert KULMANN, *Nomographic Charts*, New York, McGraw-Hill, 1951, p. vii ; John H. FASAL, *Nomography*, New York, Frederick Ungar Publishing, 1968. Pour un traité concernant la construction et, aussi, la maintenance, Norman H. CROWHURST, *Graphical Calculators and Their Design*, New York, Hayden Book Company, 1965.

professeur associé de génie mécanique à Yale³⁰. Alors qu'il faut, au début du xx^e siècle, une longue série d'articles didactiques et détaillés d'instructions dans *American Machinist* pour présenter les nomogrammes à la communauté technique américaine, par contraste, ceux des décennies d'après-guerre constituent des objets familiers pour les lecteurs, voire accessibles aux non ingénieurs.

Ainsi, l'étude des nomogrammes publiés dans *American Machinist* met en évidence un contraste entre la rhétorique des éditoriaux d'après-guerre sur les calculateurs électroniques pour machine-outil et la présence persistante d'artefacts de calcul tels les nomographes en papier. Ce contraste renvoie à un problème prégnant dans l'histoire des techniques et du calcul³¹ : l'attention privilégiée portée à l'invention de nouveaux artefacts au détriment de l'étude de ceux en usage depuis longtemps. Réécrire une histoire du calcul au cours de cette période qui prendrait en compte la multitude d'artefacts – du nomogramme papier au calculateur électronique le plus abouti – est un défi tout particulier pour le secteur de la machine-outil. Comme l'a montré David Noble, ce dernier est marqué, dans l'après-guerre, par le contraste entre l'orientation technique analogique et l'orientation technique numérique dans la CN/CNC, qui renvoie au contraste social entre des modes de production concurrents. Notre étude confirme que ce contraste est essentiel : il s'agit d'un contraste au sein même des calculateurs électroniques pour machine-outil (CN/CNC) de même que d'un contraste entre les calculateurs électroniques et les artefacts de calcul pour machine-outil qui n'exigeaient pas de gros capitaux.

30. Laurence HEWES et Herbert SEWARD, *The Design of Diagrams for Engineering Formulas and the Theory of Nomography*, New York, McGraw-Hill, 1923. Des cours ont été dispensés tout au long de l'entre-deux-guerres dans le pays par F. T. Mavis, chef du département de mécanique à l'université d'État de l'Iowa (Frederick T. MAVIS, *The Construction of Nomographic Charts*, Scranton, Pennsylvanie, International Textbook Company, 1939, p. v-vi), Charles O. Mackey, maître-assistant en génie thermique à l'université Cornell (Charles O. MACKAY, *Graphical Solutions*, New York, Wiley, 1936, p. ii-iv), Alexander S. Levens, professeur de génie mécanique à Berkeley (Alexander S. LEVENS, *Nomography*, New York, Wiley, 1937, p. v).

31. À propos de la suggestion historiographique d'étudier une technique dans le cadre de son utilisation de longue haleine, voir David EDGERTON, *The Shock of the Old: Technology and Global History since 1900*, Londres, Profile Books, 2008.