Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 62 (1936)
Heft: 24

Artikel: La théorie des machines comme science physique simplifiée
Autor: Kummer, W.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-47612

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

62e année — 21 novembre 1936 — N° 24

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

ABONNEMENTS :
Suisse : 1 an, 12 francs
Etranger : 14 francs
Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 10 francs
Etranger : 12 francs
Prix du numéro :
75 centimes.
Pour les abonnements s'adresser à la librairie F. Rouge & Cie, à Lausanne.

Paraissant tous les 15 jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale. — Organe de publication de la Commission centrale pour la navigation du Rhin.

COMITÉ DE RÉDACTION. — Président : R. Neeser, ingénieur, à Genève. — Membres : *Fribourg :* MM. L. Hertling, architecte ; A. Rossier, ingénieur ; *Vaud :* MM. C. Butticaz, ingénieur ; E. Elskes, ingénieur ; Epitaux, architecte ; E. Jost, architecte ; A. Paris, ingénieur ; Ch. Thévenaz, architecte ; *Genève :* MM. L. Archinard, ingénieur ; E. Odier, architecte ; Ch. Weibel, architecte ; *Neuchâtel :* MM. J. Béguin, architecte ; R. Guye, ingénieur ; A. Méan, ingénieur cantonal ; *Valais :* MM. J. Couchepin, ingénieur, à Martigny ; Haenny, ingénieur, à Sion.

Rédaction : H. DEMIERRE, ingénieur, 11, Avenue des Mousquetaires, La Tour-de-Peilz.

CONSEIL D'ADMINISTRATION DU BULLETIN TECHNIQUE
A. Dommer, ingénieur, président ; G. Epitaux, architecte ; M. Imer.

ANNONCES
Le millimètre sur 1 colonne, largeur 47 mm. :
20 centimes.
Rabais pour annonces répétées.
Tarif spécial pour fractions de pages.
Régie des annonces :
Annonces Suisses S. A.
8, Rue Centrale (Pl. Pépinet)
Lausanne

SOMMAIRE : *La théorie des machines comme science physique simplifiée*, par le Dr W. Kummer, professeur à l'Ecole polytechnique fédérale. — *Concours d'idées pour l'aménagement du débouché de l'avenue de la Paix sur la place Albert Thomas, de cette place et de l'entrée du B. I. T., à Genève.* — Chronique genevoise. — Divers : *Placement de stagiaires.* — *Places en Allemagne.* — *Société suisse des ingénieurs et des architectes.* — *Association suisse pour l'aménagement des eaux.* — Bibliographie.

La théorie des machines comme science physique simplifiée,

par le Dr W. KUMMER,
professeur à l'Ecole polytechnique fédérale.

L'invention du levier et du plan incliné, comme premiers outils de l'homme, dignes d'être nommés des « machines », a fait naître des règles de manutention qui ont été à la fois le début de la théorie des machines et de la science physique. La théorie des machines a formé ensuite une partie importante de la physique, tant que celle-ci est restée « classique », c'est-à-dire qu'elle a pris les phénomènes comme régis exclusivement par des équations différentielles décrivant des événements objectifs dans l'espace et dans le temps. La physique moderne, ayant reconnu ce point de vue comme trop étroit, se distance de plus en plus de la théorie des machines. Celle-ci, en effet, n'a pas besoin de rigueur absolue. La rigueur dont elle a besoin, peut être des plus relatives ; il en faut tantôt un peu plus, tantôt un peu moins, mais toujours assez pour qu'il soit possible de décrire d'une façon simple, mais suffisamment exacte, le fonctionnement d'une machine.

Dans ce qui suit, nous allons traiter les plus importants spécimens de machines de la grosse mécanique industrielle ; notre théorie, particulièrement simple, est caractérisée par le fait que les formules, décrivant le fonctionnement d'une machine, n'ont, comme constantes, que des grandeurs caractéristiques du régime de la charge « nominale », c'est-à-dire normale, de la machine même. Ainsi, ayant admis ces données, par exemple la puissance et la vitesse de la pleine charge, on est à même de tracer immédiatement les courbes caractéristiques du fonctionnement de la machine.

En premier lieu, nous considérons les *turbo-machines*. La théorie déterminante de celles-ci, notre point de départ, émane du mémoire que L. Euler a présenté, en 1754, à l'Académie de Berlin, intitulé « Théorie plus complète des machines qui sont mises en mouvement par la réaction de l'eau ». Ce mémoire a fondé la théorie dite des « filets liquides » ; il considère le mouvement d'un filet de liquide incompressible et idéal à travers les cavités d'un rotor tournant. Son résultat principal, formulé d'après le besoin de notre étude, réside dans une relation idéale entre des grandeurs de marche : débit Q. (volume liquide coulant par unité de temps), pression p (force par unité de section du liquide), et vitesse angulaire, ω, du rotor. Avec les constantes c_1 et c_2, la relation, obtenue ainsi, a la teneur :

$$p = c_1 \cdot \omega^2 + c_2 \cdot \omega \cdot Q.$$

En tenant compte du frottement du liquide lors de son mouvement turbulent, exigeant une pression équivalant à une perte égale à $c_3 \cdot Q^2$, c_3 étant une nouvelle constante, notre relation est élargie suivant :

$$p = c_1 \cdot \omega^2 + c_2 \cdot \omega \cdot Q + c_3 \cdot Q^2.$$

La signification physique de chacune des deux expressions de p découle de la présence simultanée des deux relations bien simples :

$$Q = C_1 \cdot \omega \qquad \text{et} \qquad p = C_2 \cdot \omega^2,$$

C_1 et C_2 signifiant d'autres constantes. En combinant ces

deux relations avec la formule évidente pour la puissance P en jeu, mesurée d'une part, au liquide, par le produit $Q \cdot p$, et d'autre part, au rotor, par le produit du couple M et de la vitesse angulaire ω :

$$P = Q \cdot p = M \cdot \omega,$$

nous obtenons une formule :

$$M = C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^2.$$

Cette formule établit la caractéristique dite « mécanique » de turbo-machines telles que pompes, machines soufflantes, propulseurs de navires et d'avions ; la base en est le développement libre des grandeurs Q et p. Pour le régime de la charge nominale, avec M_n et ω_n comme grandeurs mécaniques, l'équation prend la forme :

$$M_n = C_1 . C_2 . \omega_n^2.$$

Cette forme spéciale et l'autre, générale, permettent d'éliminer le produit des constantes $C_1 \cdot C_2$. Ainsi, nous obtenons notre formule définitive :

$$\frac{M}{M_n} = \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2.$$

Vu la haute importance pratique de cette formule, nous représentons la courbe parabolique, qu'elle traduit, à la figure 1. Il est intéressant de constater que ce résul-

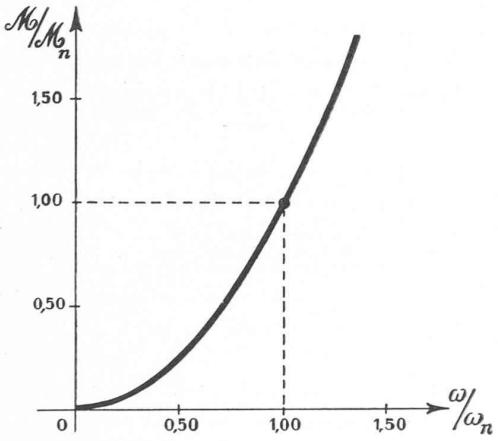

Fig. 1.

tat est obtenu sans ou avec acception du frottement du liquide.

Pour les turbo-moteurs, les suppositions de la théorie restant généralement applicables, c'est-à-dire pour les turbines à eau en général et pour la turbine à vapeur à action pure, on peut, pour une pression p maintenue constante, faire surgir d'autres caractéristiques d'intérêt pratique. Dans la formule :

$$p = c_1 \cdot \omega^2 + c_2 \cdot \omega . Q + c_3 \cdot Q^2$$

la constante c_2 devient égale à zéro pour toutes les turbines à eau et pour des turbines à vapeur à action pure, étant données les conditions géométriques des aubes. Ainsi, l'équation :

$$\left(\frac{\omega}{\sqrt{\frac{p}{c_1}}}\right)^2 + \left(\frac{Q}{\sqrt{\frac{p}{c_3}}}\right)^2 = 1$$

bien connue pour représenter une ellipse, ayant $\sqrt{\frac{p}{c_1}}$ et $\sqrt{\frac{p}{c_3}}$ comme demi-axes, la première racine étant identique à la vitesse d'emballement ω_e, toujours supérieure à la vitesse nominale ω_n, $\sqrt{\frac{p}{c_3}}$ étant identique au débit à l'arrêt qui, à son tour, peut s'exprimer par le débit nominal Q_n, vu que pour $\omega = \omega_n$ et $Q = Q_n$, l'équation doit être satisfaite. Ainsi, pour une vitesse d'emballement ω_e égale à environ $1{,}82 \cdot \omega_n$, on a :

$$0{,}7 \cdot \left(\frac{Q}{Q_n}\right)^2 + 0{,}3 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 = 1$$

pour l'équation de la caractéristique reliant débit et vitesse angulaire, dans le cas de la pression maintenue constante. Cette caractéristique, dont la courbe est représentée à la figure 2, est importante par le fait, qu'elle

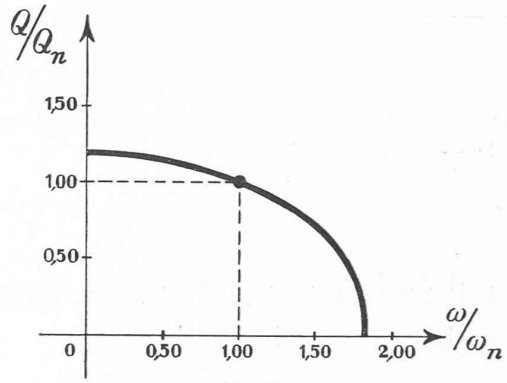

Fig. 2.

explicite le fonctionnement d'une turbine marchant sans régulateur de vitesse.

Pour les turbines à vapeur, utilisées comme moteurs de locomotives à vapeur, nous obtenons la caractéristique mécanique, en partant de la dernière équation ci-dessus, où nous remplaçons Q par $M \cdot \omega$, et Q_n par $M_n \cdot \omega_n$, la pression p étant toujours supposée constante. De l'équation :

$$0{,}7 \cdot \left(\frac{M \cdot \omega}{M_n \cdot \omega_n}\right)^2 + 0{,}3 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 = 1$$

on déduit facilement :

$$\frac{M}{M_n} = \left[1{,}429\left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^2 - 0{,}429\right]^{1/2}$$

comme caractéristique mécanique désirée. La figure 3, représentant la courbe hyperbolique correspondante, fait voir, que pour $\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) > 1$, la courbe devient une droite, dont l'équation peut être écrite :

$$\frac{M}{M_n} = 2{,}21 - 1{,}21 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right).$$

Voilà une approximation souvent bien utile [1] ; en généralisant, on peut l'écrire :

[1] Nous renvoyons le lecteur à la figure 3, page 242 du *Bulletin technique* du 12 octobre 1935. Dans cette figure de notre étude sur la souplesse de fonctionnement des moteurs de traction, la courbe de provenance empirique, diffère en régime de démarrage et pour ce qui concerne le rapport de la vitesse nominale à celle d'emballement.

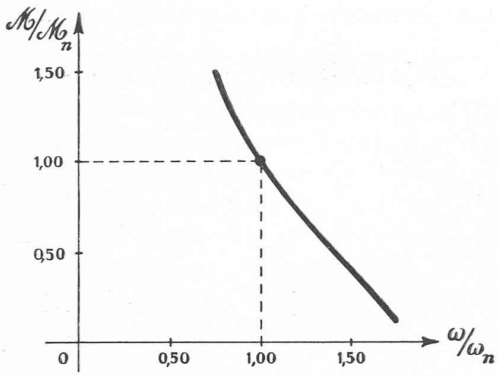

Fig. 3.

$$\frac{M}{M_n} = \frac{\omega_e - \omega}{\omega_e - \omega_n}.$$

Pour certaines turbo-machines, telles que pompes et machines soufflantes, on désire connaître pour $\omega = \omega_n =$ constant, la caractéristique, reliant les grandeurs p et Q, connue sous le nom de « caractéristique hydraulique ». Nous trouvons sa forme la plus pratique, en partant de l'expression pour la pression « utile » p, obtenue, en remplaçant c_3 par $-c_3$. Nous écrivons donc :

$$p = c_1 \cdot \omega_n^2 + c_2 \cdot \omega_n Q - c_3 \cdot Q^2.$$

Pour exprimer les diverses constantes, on a, outre le régime de la charge nominale, besoin du régime de la marche à vide. Pour celle-ci, on a :

$$Q = 0\,; \qquad p = p_0.$$

Pour la charge nominale, on a :

$$Q = Q_n\,; \quad p = p_n\,; \quad \eta_n = \frac{p_n}{p_n + c_3 \cdot Q_n}.$$

Nous posons en outre : $\delta = \frac{p_0}{p_n}$. Le rendement partiel η_n de la charge nominale tient tout de même compte des pertes les plus importantes. Avec les expressions résultant pour les constantes, on obtient la formule suivante :

$$\frac{p}{p_n} = \delta + \left(1 - \delta - \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}\right) \cdot \frac{Q}{Q_n} - \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \cdot \left(\frac{Q}{Q_n}\right)^2.$$

Les grandeurs δ et η_n n'ont pas de valeurs universelles ; ces valeurs diffèrent suivant le type de machine et suivant la puissance du régime de la charge nominale. Sur la figure 4, nous avons tracé la courbe parabolique pour les données :

$$\delta = 3{,}0 \quad ; \qquad \eta_n = 0{,}5$$

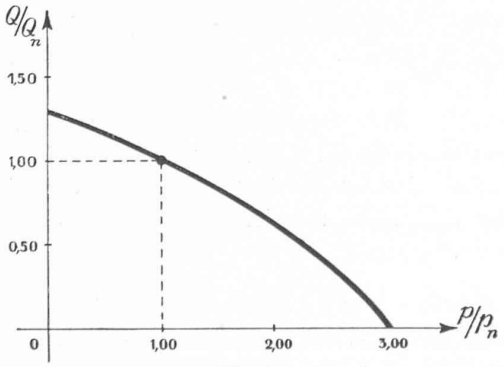

Fig. 4.

ayant trait à une petite pompe ou à un petit ventilateur centrifuge à aubes courbées en arrière.

Au lieu des relations bien simples que nos formules donnent pour les caractéristiques les plus importantes des turbo-machines, le fonctionnement réel de celles-ci présente généralement des relations plus ou moins compliquées. La théorie est à même de décrire le fonctionnement à un degré approchant autant que l'on veut de la réalité ; elle peut tenir compte des pertes purement mécaniques des paliers, du frottement extérieur et d'autres circonstances que nous avons négligées. Quant aux degrés d'approximation, pouvant être réalisés, il y en a plusieurs, dont on a le choix.

Nous passons aux *machines à piston*, traversées aussi par des liquides. Ces liquides, s'ils sont incompressibles, donnent lieu à la relation :

$$Q = C \cdot \omega,$$

C étant une constante. En combinant cette formule avec la relation exprimant la puissance :

$$M \cdot \omega = p \cdot Q$$

on obtient :

$$M = C \cdot p$$

et, p étant maintenu constant, au régime de la charge nominale :

$$M_n = C \cdot p.$$

Il en résulte une caractéristique mécanique :

$$M = M_n$$

par laquelle le fonctionnement peut être décrit pour les moteurs à colonnes d'eau ou d'huile, à savoir pour la presse hydraulique et pour le servomoteur d'un régulateur de vitesse ; cette formule décrit aussi le fonctionnement de la pompe à eau, à piston, à pression constante, le débit étant proportionnel à la vitesse. Quant à la machine à vapeur et au moteur à combustion interne, la formule est utilisable pour des régimes spéciaux ; pour la machine à vapeur, la formule décrit le démarrage à pleine admission de vapeur, tandis qu'elle caractérise pour le moteur à combustion interne la marche au plein effort, telle qu'elle est possible entre la vitesse d'allumage et celle d'une certaine surcharge [1]. Ces mêmes moteurs, travaillant à détente variable, ont des caractéristiques mécaniques variées surtout suivant le fonctionnement des distributeurs des liquides moteurs. Notons, par exemple, que la caractéristique mécanique ainsi obtenue pour la machine à vapeur ressemble, pour les vitesses moyennes, à celle de la turbine à vapeur ; comme on sait, elle satisfait au mieux les exigences d'un service de traction. Un schéma simple et généralement valable pour l'ensemble de pareilles caractéristiques n'est guère possible ; du reste, dans la plupart des applications, cette caractéristique est sans valeur, la vitesse étant automatiquement maintenue constante par un régulateur de vitesse.

[1] Le lecteur voudra bien considérer dans les figures 2 et 4, pages 241 et 242 du *Bulletin technique* du 12 octobre 1935, les lignes fortes, exactement ou presque parallèles à l'axe des vitesses.

Récapitulant les considérations théoriques concernant les machines à piston, il faut avouer qu'elles ne se prêtent pas bien à l'élaboration de caractéristiques généralement utilisables.

Pour les *machines électriques*, dont nous nous occupons maintenant, la formule exprimant la puissance peut être écrite :

$$P = M \cdot \omega = E \cdot J$$

E signifiant la tension et J l'intensité d'un courant continu électrique. Les phénomènes d'excitation électromagnétique et d'induction électro-dynamique, réalisés dans la machine, sont caractérisés d'emblée par la relation :

$$E = f(J_e) \cdot \omega$$

dans laquelle J_e est l'intensité du courant d'excitation provoquant le flux magnétique $f(J_e)$. Si celui-ci peut être considéré comme proportionnel à J_e, et si J_e est identique à J, la machine étant une machine excitée en série, nous avons :

$$E = C \cdot J \cdot \omega,$$

C étant une constante. Nous considérons le fonctionnement à tension E constante, en éliminant J de la dernière équation et de celle relative à la puissance ; le résultat en est :

$$M \cdot \omega^2 = \frac{E^2}{C}.$$

Pour le régime de la charge nominale, on a :

$$M_n \cdot \omega_n^2 = \frac{E^2}{C}.$$

De ces deux relations on obtient, pour les machines à courant continu du type dit « série », l'équation :

$$\frac{M}{M_n} = \left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^2,$$

formulant la caractéristique mécanique de ces machines pouvant fonctionner aussi bien comme moteurs, que comme générateurs de courant électrique. Vu l'importance de cette relation, inverse du reste, de celle des turbomachines suivant la figure 1, nous la représentons par la courbe hyperbolique de la figure 5. Si l'on tient compte des résistances ohmiques des enroulements, qui ont été négligées jusqu'à présent, moyennant un rendement partiel η_n pour le régime de la charge nominale, la formule s'écrit :

$$M \cdot [\omega \cdot \eta_n \pm \omega_n \cdot (1 - \eta_n)]^2 = M_n \cdot \omega_n^2.$$

Dans cette formule, le signe + s'emploie pour le régime d'un moteur, le signe — pour le régime d'un générateur. Pour un courant d'alimentation alternatif monophasé, caractérisé par un décalage de phase φ_n, lors de la marche de la machine avec la charge nominale, la formule prend la forme :

$$M \cdot \{[\omega \cdot \eta_n \pm \omega_n \cdot (1 - \eta_n)]^2 \cdot \cos^2\varphi_n + \omega_n^2 \cdot \sin^2 \varphi_n\} = M_n \cdot \omega_n^2.$$

Les simplifications survenant pour $\eta_n = 1$ et pour $\varphi_n = 0$ sont faciles à juger [1].

De manière analogue, toute espèce de machine électrique pour chacun des systèmes de courant peut toujours être caractérisée, par des formules et des courbes de fonctionnement, aussi simples que celles que nous venons de citer [2]. La rigueur de telles formules devient plus grande, si l'on tient compte aussi des pertes purement mécaniques et des états réels de magnétisation du fer actif ; on est obligé alors de pousser plus loin l'individualisation des machines. On est allé même très loin ; en effet, il n'y a pas de domaine dans la théorie des machines, où la rigueur ait été poursuivie davantage, une abondante littérature spéciale en est la preuve.

Les exemples que nous venons de donner, quant à l'application de notre théorie simplifiée, rendue pratique, pour chaque espèce de machine considérée, surtout par l'emploi des grandeurs caractéristiques du régime de la charge nominale comme constantes uniques des formules, peuvent suffire. Les formules obtenues d'après notre méthode procurent à l'ingénieur une orientation rapide sur le fonctionnement de machines quelconques, dont il projette l'installation ; pour les projets, l'emploi de caractéristiques de fonctionnement de toute rigueur est souvent illusoire, de telles caractéristiques ne possédant que rarement une valeur universelle, vu leur provenance d'exemples isolés sans garantie pour une future reproduction.

Quant à la portée de nos formules et de nos courbes, il faut noter que naturellement leur signification réelle n'est pas identique à leur signification mathématique ; par exemple, il n'y a pas de grandeurs infinies dans le fonctionnement des machines. Mais la portée de notre théorie est généralement celle de la pratique ; en effet, des moments plus grands que $2 \cdot M_n$, et des vitesses supérieures à $2 \cdot \omega_n$, ne sont guère d'importance pratique, et cela pour des raisons bien évidentes ; aussi, pour les hyperboles de nos figures 3 et 5, la réalité du fonctionnement recourbe le tracé vers les axes asympotiques, les courbes calculées semblant se perdre à l'infini. Naturellement, les mêmes observations doivent aussi être formulées au sujet des formules de mainte théorie, prise comme absolument rigoureuse.

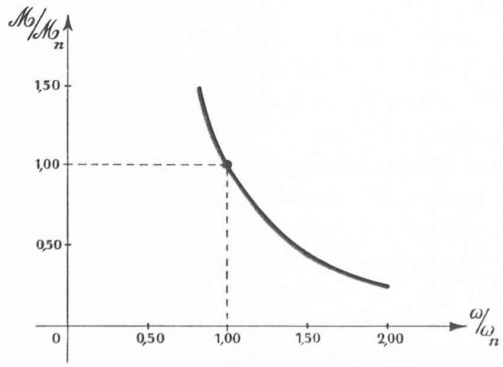

Fig. 5.

[1] Nous renvoyons à la figure 6 et aux formules correspondantes, page 243 du *Bulletin technique* du 12 octobre 1935.

[2] En ce qui concerne les machines pour la traction électrique, nous mentionnons notre livre *Ausrüstung der elektrischen Fahrzeuge*, paru en 1925 en 2e édition, chez Julius Springer, Berlin. Le lecteur y trouvera aussi la dérivation des formules indiquées ci-haut sans le développement complet.