

Zeitschrift:	L'Enseignement Mathématique
Herausgeber:	Commission Internationale de l'Enseignement Mathématique
Band:	24 (1924-1925)
Heft:	1: L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE
Artikel:	LE DÉVELOPPEMENT DE LA THÉORIE DES SÉRIES TRIGONOMÉTRIQUES DANS LE DERNIER QUART DE SIÈCLE
Autor:	Plancherel, Michel
Kapitel:	§ 4. La sommation des séries de Fourier par les moyennes de Cesàro.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-515749

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: 03.02.2026

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

intégrable, de carré non intégrable, dont la série de Fourier diverge presque partout. Il a montré que si $f(x)$ est de carré intégrable, les suites partielles $s_{n_p}(x)$ de la série de Fourier convergent presque partout vers $f(x)$ lorsque $p \rightarrow \infty$ si

$$\frac{n_{p+1}}{n_p} > k > 1$$

k étant une constante¹.

Après que MM. FATOU², JEROSCH et WEYL³, WEYL⁴ eurent démontré certains résultats moins généraux, M. W. H. YOUNG⁵ établit que si $\sum A_n$ est une série de Fourier, $\sum \frac{A_n}{n^\varepsilon}$ ($\varepsilon > 0$) est une série de Fourier convergeant presque partout. M. HARDY⁶ a réussi à faire voir que dans ce résultat n^ε peut être remplacé par $\log n$. Dans le cas spécial des fonctions de carré intégrable, MM. KOLMOGOROFF et SELIVERSTOFF⁷ ont montré que la convergence de $\sum (a_n^2 + b_n^2) (\log n)^{1+\delta}$ ($\delta > 0$) entraîne la convergence « presque partout » de la série de Fourier $\sum A_n$ et M. MENCHOFF⁸ a montré que le même résultat a lieu si $\sum (|a_n|^{2-\varepsilon} + |b_n|^{2-\varepsilon})$, ($\varepsilon > 0$), converge.

10. On ne sait pas grand chose sur les propriétés que doit avoir $f(x)$ pour que sa série de Fourier soit absolument convergente. M. S. BERNSTEIN⁹ a cependant démontré que si $f(x)$ est à variation bornée et satisfait uniformément dans tout l'intervalle $(0, 2\pi)$ à une condition de Lipschitz d'ordre $\alpha < \frac{1}{2}$, sa série de Fourier est absolument convergente; si $\alpha > \frac{1}{2}$, il y a des fonctions dont la série de Fourier n'est pas absolument convergente.

§ 4. LA SOMMATION DES SÉRIES DE FOURIER PAR LES MOYENNES DE CESÀRO.

1. On peut toujours remonter d'une série de Fourier — c'est-à-dire de la suite des constantes de Fourier — à la génératrice

¹ Kolmogoroff 2. — ² Fatou 1. — ³ Jerosch et Weyl. — ⁴ Weyl. — ⁵ W. H. Young 11. — ⁶ Hardy 1. — ⁷ A. Kolmogoroff et G. Seliverstoff. — ⁸ Menchoff 3. — ⁹ S. Bernstein.

en intégrant terme à terme la série et prenant ensuite la dérivée de la fonction somme. Mais ces opérations constituent un double passage à la limite. FEJÉR¹ a montré que l'on peut remonter plus simplement de la suite des constantes de Fourier à la génératrice à l'aide des moyennes arithmétiques $s_n^{(1)}(x)$ des sommes partielles $s_n(x)$

$$s_n(x) = \sum_0^n A_v \quad (15)$$

$$s_n^{(1)}(x) = \frac{s_0 + s_1 + \dots + s_n}{n+1} = A_0 + \sum_{v=1}^n \left(1 - \frac{v}{n+1}\right) A_v. \quad (16)$$

Il a fait voir que $s_n^{(1)}(x)$ converge vers $\frac{f(x+0) + f(x-0)}{2}$ en tout point où cette expression existe, en particulier donc en tout point de continuité de $f(x)$ et que la convergence est uniforme dans tout intervalle entièrement intérieur à un intervalle de continuité de $f(x)$. Plus généralement, $s_n^{(1)}(x)$ converge encore vers $f(x)$ si²

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} \int_0^t |f(x+2u) + f(x-2u) - 2f(x)| du = 0.$$

Or, cette limite est nulle presque partout. Les moyennes arithmétiques $s_n^{(1)}(x)$ convergent donc presque partout vers $f(x)$.

L'important résultat de FEJÉR a été le point de départ de toute une série de recherches dont le caractère général est l'introduction de la théorie de la sommabilité des séries divergentes dans l'étude des séries de Fourier. Série trigonométrique et série de puissances étant en étroite relation, puisque la première est la partie réelle ou imaginaire d'une série de puissances sur un cercle, il est naturel d'appliquer aux séries trigonométriques les procédés de sommation employés dans l'étude des séries de puissances.

2. La méthode de sommation qui s'est montrée la plus féconde est la *méthode des moyennes arithmétiques de Cesàro*³. Soit

$$u_0 + u_1 + \dots + u_n + \dots$$

¹ Fejér 1. — ² Lebesgue 2, 6. — ³ Cesàro 1.

une série quelconque, convergente ou non. Formons la série de puissances

$$f(t) = u_0 + u_1 t + \dots + u_n t^n + \dots$$

et supposons son rayon de convergence égal à 1. On sait, depuis Abel, que si $\sum u_n$ converge et a pour somme s , $\lim_{t \rightarrow 1^-} f(t) = s$.

Mais on connaît de nombreux exemples où la limite considérée de $f(t)$ existe et où $\sum u_n$ diverge. Il est alors naturel de convenir de regarder cette limite comme somme de la série divergente: c'est le principe du *procédé de sommation de Poisson* sur lequel nous reviendrons plus loin (§ 6). Notons simplement que la formation de $\lim_{t \rightarrow 1^-} f(t)$ exige en réalité un double passage à la

limite à partir de la suite u_n , car la formation de $f(t)$ en inclut déjà un. CESÀRO a montré comment, très souvent, on peut se restreindre à un seul passage à la limite, et celà à l'aide du théorème suivant¹:

Soient $a_0, a_1, \dots, a_n, \dots; p_0, p_1, \dots, p_n, \dots$ deux suites illimitées. Soit $p_n > 0, n = 0, 1, 2, \dots$

Supposons que la série $\sum_{n=0}^{\infty} p_n t^n$ converge pour $|t| < 1$ et diverge pour $t = 1$. Si $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{p_n} = s$ existe, alors $\sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n$ converge pour $|t| < 1$ et

$$\lim_{t \rightarrow 1^-} \frac{\sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n}{\sum_{n=0}^{\infty} p_n t^n} = s.$$

Nous appliquerons ce théorème au cas où

$$p_0 + p_1 t + \dots + p_n t^n + \dots = (1 - t)^{-(1+\delta)}, \quad (\delta > -1)$$

$$a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n + \dots = (1 - t)^{-(1+\delta)} \sum_{n=0}^{\infty} u_n t^n.$$

¹ Cesàro 2.

Par conséquent,

$$p_n = \frac{\Gamma(n + \delta + 1)}{\Gamma(n + 1)\Gamma(\delta + 1)} \equiv C_n^{(\delta)} \quad (17)$$

et

$$a_n = \sum_{\nu=0}^n C_{n-\nu}^{(\delta)} u_\nu \equiv S_n^{(\delta)} . \quad (18)$$

Le théorème de Cesàro montre donc: si

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n^{(\delta)}}{C_n^{(\delta)}} = s$$

existe, alors

$$\lim_{t \rightarrow 1-0} \sum_0^\infty u_n t^n = s .$$

Ce résultat conduit à la *définition suivante de la sommation de Cesàro d'ordre δ , ($\delta > -1$)*.

La série $\sum_0^\infty u_n$ est dite *sommable (C, δ)*, et a pour somme s si

$$\begin{aligned} s_n^{(\delta)} &= \frac{S_n^{(\delta)}}{C_n^{(\delta)}} = \sum_{\nu=0}^n \frac{C_{n-\nu}^{(\delta)}}{C_n^{(\delta)}} u_\nu = \sum_{\nu=0}^n \frac{\Gamma(n - \nu + \delta + 1)}{\Gamma(n - \nu + 1)\Gamma(n + \delta + 1)} u_\nu \\ &= \sum_{\nu=0}^n \left(1 - \frac{\delta}{n + \delta}\right) \left(1 - \frac{\delta}{n + \delta - 1}\right) \dots \left(1 - \frac{\delta}{n + \delta - \nu + 1}\right) u_\nu \end{aligned} \quad (19)$$

converge vers s lorsque $n \rightarrow \infty$.

La convergence ordinaire est identique à la sommabilité (C, 0). Essentiel est le fait qu'une série sommable (C, δ_0) est sommable (C, δ) vers la même somme lorsque $\delta > \delta_0$. La somme formelle de deux séries sommables (C, δ) est encore sommable (C, δ) vers la somme des sommes (C, δ) des deux séries. Le produit formel, d'après la règle de Cauchy, de deux séries dont l'une est sommable (C, δ) et l'autre (C, δ') est sommable (C, $\delta + \delta' + 1$) vers le produit des deux sommes¹.

La suite continue des ordres de sommation de Cesàro a l'avantage de constituer une échelle de convergence. Car, pour toute

¹ Cesàro 1, 2; Chapman 1, 2.

série, il existe un ordre δ_0 (éventuellement $\delta_0 = -1$ ou $\delta_0 = \infty$) tel que (si $\delta_0 \neq \infty$) la série soit sommable (C, δ) pour $\delta > \delta_0$ et (si $\delta_0 \neq -1$) ne soit pas sommable (C, δ) pour $\delta < \delta_0$.

3. L'étude systématique de la sommation (C, δ) des séries de Fourier a conduit aux résultats suivants¹.

La série de Fourier d'une fonction intégrable converge (C, δ) ($\delta > 0$) vers $\frac{1}{2} [f(x+0) + f(x-0)]$ en tout point où cette expression existe². Si $f(x)$ est continue en chaque point x d'un intervalle $a \leq x \leq b$, la convergence est uniforme dans cet intervalle. Ceci n'a plus lieu, en général, si $\delta \leq 0$. Le résultat primitif de Fejér est contenu dans le précédent ($\delta = 1$).

Si

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} \int_0^t |f(x+2u) + f(x-2u) - 2f(x)| du = 0$$

la série converge (C, δ) , ($\delta > 0$)³. C'est pour $\delta = 1$ le résultat de Lebesgue énoncé plus haut. M. HAHN⁴ a fait voir que ce résultat ne subsiste plus, en général, si l'on remplace la condition précédente par la même débarrassée du signe de valeur absolue sous l'intégrale ; il subsiste, par contre, si l'on remplace la sommation (C, δ) par la sommation $(C, 1 + \delta)$ ⁵.

Si q est un entier positif et si $\delta > q$, la série de Fourier converge (C, δ) vers la q -ième dérivée généralisée de la q -ième intégrale $\int_x^x \int_x^x \dots \int_x^x f dx \dots dx$ ⁶.

La lumière que ces théorèmes jettent sur la nature de la convergence des séries de Fourier est encore plus grande lorsqu'on introduit pour les sommes $s_n^{(\delta)}$ des constantes $\rho_n^{(\delta)}$ analogues aux constantes de Lebesgue $\rho_n = \rho_n^{(0)}$, définies comme borne supérieure de $|s_n^{(\delta)}(x)|$ dans le champ des fonctions f telles que $|f(x)| \leq 1$. $\rho_n^{(\delta)}$ est une fonction bornée de n pour $\delta > 0$ et pour $\delta \geq 1$ on a $\rho_n^{(\delta)} = 1$. Les sommes partielles $s_n^{(\delta)}$ de la série de Fourier d'une fonction bornée $f(x)$ sont donc bornées pour $\delta > 0$ et lorsque $\delta \geq 1$ elles sont toujours comprises entre la borne inférieure et la borne supérieure de $f(x)$. On peut se demander

¹ Chapman 1, 2; Gronwall 4; Hardy 1; M. Riesz 1, 7; W. H. Young 3; Kogbetliantz 2. — ² M. Riesz 1, 7; Chapman 2; Gronwall 4; W. H. Young 3. — ³ Hardy 1. — ⁴ Hahn 2. — ⁵ W. H. Young 2. — ⁶ W. H. Young 3.

ce qu'il advient du phénomène de Gibbs pour une sommation d'ordre $\delta < 1$; la question a été traitée par H. CRAMÉR¹ qui établit l'existence d'une valeur positive k inférieure à 1, telle que lorsque $\delta < k$ le phénomène de Gibbs a lieu et que lorsque $\delta > k$ il n'a pas lieu.

4. La convergence ordinaire et *a fortiori* la convergence (C, δ) ($\delta > 0$) d'une série de Fourier est une propriété locale. Ce n'est plus le cas, en général, lorsque $\delta < 0$. La convergence en un point dépend alors non seulement du comportement de la fonction dans le voisinage de ce point, mais de son comportement dans tout l'intervalle $(0, 2\pi)$. C'est une propriété non plus locale, mais globale.

L'influence des points singuliers de la fonction sur les propriétés de convergence de sa série de Fourier est mise en évidence dans le résultat de Kogbetliantz²: Si $f(x)$ est à variation bornée dans les intervalles $(0, \xi - \varepsilon)$ et $(\xi + \varepsilon, 2\pi)$ et si dans l'intervalle $(\xi - \varepsilon, \xi + \varepsilon)$ elle peut se mettre sous la forme

$$c_0 |x - \xi|^{-\alpha} + \varphi(x)$$

$\varphi(x)$ étant à variation bornée dans $(\xi - \varepsilon, \xi + \varepsilon)$, c_0 une constante et $0 < \alpha < 1$, la série de Fourier est sommable (C, δ), $\delta > \alpha - 1$ en tout point $x \neq \xi$ vers $\frac{1}{2} [f(x + 0) + f(x - 0)]$. Par contre, elle n'est plus sommable (C, δ) en ce point si $\delta \leq \alpha - 1$. Les moyennes $s_n^{(\delta)}$ d'ordre $\delta < \alpha - 1$ ne sont pas bornées en n ; par contre, celles d'ordre $\delta = \alpha - 1$ sont bornées en n , mais ne convergent pas pour $n \rightarrow \infty$. Il est d'autant plus remarquable que si la fonction est à variation bornée dans tout l'intervalle $(0, 2\pi)$ la série converge (C, δ) partout vers $\frac{1}{2} [f(x + 0) + f(x - 0)]$ lorsque $\delta > -1$ ³.

5. HARDY et LITTLEWOOD⁴ se sont posé la question de trouver les conditions nécessaires et suffisantes pour qu'une série de Fourier soit sommable au point x par une sommation de Cesàro d'ordre suffisamment élevé. Ils sont arrivés au résultat suivant:

La condition nécessaire et suffisante pour que la série de Fourier d'une fonction intégrable $f(x)$ soit sommable par une moyenne

¹ Cramer. — ² Kogbetliantz. — ³ W. H. Young 15. — ⁴ Hardy and Littlewood 3.

de Cesàro en un point x est qu'il existe un entier k tel que si l'on pose

$$\varphi(t) = f(x+t) + f(x-t) - 2f(x)$$

$$\varphi_1(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \varphi(t) dt, \quad \varphi_2(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \varphi_1(t) dt, \dots$$

on ait

$$\lim_{t \rightarrow 0} \varphi_k(t) = 0.$$

Ils ont montré en particulier que si f est bornée dans un intervalle contenant le point x , la série de Fourier est ou bien sommable au point x pour toute moyenne de Cesàro d'ordre $\delta > 0$ ou bien n'est sommable par aucune. La condition nécessaire et suffisante de sommabilité est dans ce cas: $\lim_{t \rightarrow 0} \varphi_1(t) = 0$ ¹.

§ 5. LES SÉRIES DE FOURIER RESTREINTES.

1. En général la série obtenue par dérivation terme à terme d'une série de Fourier diverge partout. Mais M. FEJÉR² a déjà établi que l'on peut encore, à l'aide des moyennes arithmétiques, remonter de la série dérivée à la dérivée de la génératrice. M. W. H. YOUNG³ a montré que la série dérivée terme à terme de la série de Fourier d'une fonction à variation bornée converge presque partout (G, δ), $\delta > 0$, vers la dérivée de la fonction. Plus généralement, il a établi que⁴:

a) la convergence ($C, 1$) de la première dérivée (formelle) d'une série de Fourier (c'est-à-dire la série obtenue par dérivation terme à terme) en un point est une propriété locale;

b) qu'il en est de même de la convergence (C, p) de la p -ième dérivée.

Il résulte de ces propositions que si, par exemple, $\frac{d^p f(x)}{dx^p}$ est continue et à variation bornée dans le voisinage d'un point, la p -ième dérivée de la série de Fourier de f converge (C, p) vers $\frac{d^p f}{dx^p}$ au point considéré.

¹ Hardy and Littlewood 3; M. Riesz 7. — ² Fejér 1. — ³ W. H. Young 20. — ⁴ W. H. Young 31.