

4. Autres théorèmes

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **L'Enseignement Mathématique**

Band (Jahr): **16 (1970)**

Heft 1: **L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE**

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

3.4.2. Si $C = 0$, ceci implique que f possède une valeur moyenne nulle.

On voit donc que, pour établir le résultat annoncé, il ne reste plus qu'à montrer que l'on a

$$\sum_{m,n \geq 1} \frac{g(m, n)}{m^{1+ia_1} n^{1+ia_2}} = 0$$

si, et seulement si,

$$\left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j(1+ia_1)+k(1+ia_2)}} \right) \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(3^j, 3^k)}{3^{j(1+ia_1)+k(1+ia_2)}} \right) = 0.$$

Compte tenu de (14), il suffit de montrer que

$$\prod_{p > 2} \left\{ \left[\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j(1+ia_1)+k(1+ia_2)}} \right] / \left[\sum_{j=0}^{+\infty} \frac{f(p^j, 1)}{p^{j(1+ia_1)}} \right] \left[\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{f(1, p^k)}{p^{k(1+ia_2)}} \right] \right\} = 0$$

si, et seulement si,

$$\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(3^j, 3^k)}{3^{j(1+ia_1)+k(1+ia_2)}} = 0.$$

Ceci résulte immédiatement de ce que tous les facteurs du produit autres que celui qui correspond à $p = 3$ sont non nuls.

En effet, on a pour chaque p

$$\left| \sum_{\substack{j,k \geq 0 \\ j+k > 0}} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j(1+ia_1)+k(1+ia_2)}} \right| \leq \sum_{\substack{j,k \geq 0 \\ j+k > 0}} \frac{1}{p^{j+k}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{p}\right)^2} - 1.$$

Pour $p > 3$, ceci est < 1 et par suite

$$\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j(1+ia_1)+k(1+ia_2)}} = 1 + \sum_{\substack{j,k \geq 0 \\ j+k > 0}} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j(1+ia_1)+k(1+ia_2)}} \neq 0.$$

4. AUTRES THÉORÈMES

Il est entendu une fois pour toutes que, dans tout ce qui suit, f est une fonction de \mathfrak{M}_2 satisfaisant à $|f(m, n)| \leq 1$ quels que soient m et $n \geq 1$.

Le théorème démontré au chapitre précédent fournit immédiatement des conditions nécessaires et suffisantes pour que f possède une valeur moyenne nulle, car il est clair que, lorsque l'on a (6), le module de l'expression

$$\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n)$$

tend vers $|C|$ quand x et y tendent vers $+\infty$.

Nous nous proposons maintenant d'obtenir des conditions nécessaires et suffisantes pour que f possède une valeur moyenne non nulle.

Nous chercherons aussi des conditions nécessaires et suffisantes pour que l'expression

$$\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n)$$

tende vers une limite lorsque x et y tendent vers $+\infty$ avec un rapport fixe quelconque, cette limite étant indépendante de la valeur du rapport.

Compte tenu de la remarque faite plus haut sur le cas où l'on a (6), on voit que ceci a lieu avec une limite nulle si, et seulement si, f possède une valeur moyenne nulle. Il reste à traiter le cas d'une limite non nulle.

4.1. Remarquons d'abord que le produit infini

$$\prod \left(1 - \frac{1}{p}\right)^2 \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}}\right)$$

est convergent si, et seulement si, la série

$$\sum \frac{1}{p} [2 - f(p, 1) - f(1, p)]$$

est convergente ¹⁾.

¹⁾ Rappelons que le produit infini $\prod_1^{+\infty} (1 + u_n)$ est dit convergent si

- 1° il a au plus un nombre fini de facteurs nuls;
- 2° le produit $\prod_{\substack{n \leq x \\ 1 + u_n \neq 0}} (1 + u_n)$ tend vers une limite finie non nulle quand x tend vers $+\infty$.

Quant le produit infini est convergent, sa valeur est par définition la limite de $\prod_{n \leq x} (1 + u_n)$ pour x tendant vers $+\infty$. Elle est nulle si, et seulement si, un au moins des facteurs est nul.

On voit facilement que, si la série $\sum_1^{+\infty} |u_n|^2$ est convergente, le produit infini

$\prod_1^{+\infty} (1 + u_n)$ est convergent ou non en même temps que la série $\sum_1^{+\infty} u_n$.

(Cf, par exemple, KNOPP: Theorie und Anwendung der unendlichen Reihen).

En effet, si l'on pose

$$\left(1 - \frac{1}{p}\right)^2 \sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}} = 1 + u_p,$$

on voit que l'on a quand p tend vers $+\infty$

$$u_p = \frac{1}{p} [f(p, 1) + f(1, p) - 2] + o\left[\frac{1}{p^2}\right].$$

La série $\sum |u_p|^2$ étant convergente, puisque $u_p = o\left[\frac{1}{p}\right]$, le produit infini $\prod (1 + u_p)$ est convergent si, et seulement si, la série $\sum u_p$ est convergente, ce qui donne le résultat annoncé.

Ajoutons que le produit infini

$$\prod \left(1 - \frac{1}{p}\right)^2 \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}}\right),$$

lorsqu'il est convergent, est nul si, et seulement si,

$$\left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j+k}}\right) \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(3^j, 3^k)}{3^{j+k}}\right) = 0,$$

car, pour $p > 3$,

$$\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}} \neq 0 \quad \text{puisque} \quad \left| \sum_{\substack{j,k \geq 0 \\ j+k > 0}} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}} \right| \leq \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{p}\right)^2} - 1 < 1.$$

4.2. Ceci dit, nous allons montrer d'abord que, pour que f possède une valeur moyenne non nulle, il faut et il suffit que

1° Les séries $\sum \frac{1}{p} [1 - f(p, 1)]$ et $\sum \frac{1}{p} [1 - f(1, p)]$ soient convergentes;

2° on ait $\left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j+k}}\right) \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(3^j, 3^k)}{3^{j+k}}\right) \neq 0$.

Plus précisément, nous établirons le théorème suivant.

THÉORÈME 2: I. Si f possède une valeur moyenne non nulle, les séries

$\sum \frac{1}{p} [1 - f(p, 1)]$ et $\sum \frac{1}{p} [1 - f(1, p)]$ sont convergentes et on a

$$\left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j+k}}\right) \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(3^j, 3^k)}{3^{j+k}}\right) \neq 0. \quad (23)$$

II. Si les séries $\sum \frac{1}{p} [1 - f(p, 1)]$ et $\sum \frac{1}{p} [1 - f(1, p)]$ sont convergentes, $M(f)$ existe et est égale à la valeur du produit infini

$$\prod \left(1 - \frac{1}{p}\right)^2 \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}}\right)$$

(qui est convergent d'après ce que l'on a vu au paragraphe 4.1, et est nul si, et seulement si, on a

$$\left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j+k}}\right) \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(3^j, 3^k)}{3^{j+k}}\right) = 0.$$

4.2.1. Supposons d'abord que f possède une valeur moyenne non nulle. Il existe nécessairement a_1 et a_2 réels tels que l'on ait

$$\sum \frac{1}{p} \{1 - \Re e [f(p, 1) p^{-ia_1}]\} < +\infty \tag{24}$$

et

$$\sum \frac{1}{p} \{1 - \Re e [f(1, p) p^{-ia_2}]\} < +\infty, \tag{25}$$

car, dans le cas contraire, f devrait posséder une valeur moyenne nulle. Pour la même raison, on a

$$\left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j(1+ia_1)+k(1+ia_2)}}\right) \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(3^j, 3^k)}{3^{j(1+ia_1)+k(1+ia_2)}}\right) \neq 0. \tag{26}$$

On a donc (6).

Il résulte de (6) que, lorsque x et y tendent vers $+\infty$,

$$Cx^{ia_1} y^{ia_2} L_1(\log x) L_2(\log y)$$

tend vers $M(f)$.

Ceci entraîne que, quels que soient λ et $\mu > 0$,

$$C(\lambda x)^{ia_1} (\mu y)^{ia_2} L_1(\log \lambda x) L_2(\log \mu y)$$

tend aussi vers $M(f)$.

Mais le quotient de la deuxième expression par la première tend vers $\lambda^{ia_1} \mu^{ia_2}$.

On doit donc avoir

$$\lambda^{ia_1} \mu^{ia_2} = 1 \quad \text{quels que soient } \lambda \text{ et } \mu > 0,$$

ce qui nécessite $a_1 = a_2 = 0$.

Alors (26) donne (23), (24) et (25) donnent

$$\sum \frac{1}{p} \{1 - \Re e [f(p, 1)]\} < +\infty \quad (27)$$

et

$$\sum \frac{1}{p} \{1 - \Re e [f(1, p)]\} < +\infty, \quad (28)$$

et on voit que, quand x et y tendent vers $+\infty$ indépendamment l'un de l'autre,

$$L_1(\log x) L_2(\log y) \quad \text{tend vers} \quad \frac{M(f)}{C}$$

(qui est de module 1 puisque $|L_1(\log x) L_2(\log y)| = 1$ pour x et $y \geq 1$).

Alors, à tout $\varepsilon > 0$ et $< 2\pi - \frac{1}{2}$ correspond $X_\varepsilon \geq 2$ tel que, pour x', x'', y' et $y'' \geq X_\varepsilon$,

$$|L_1(\log x'') L_2(\log y'') - L_1(\log x') L_2(\log y')| \leq 2 \sin \frac{\varepsilon}{4}.$$

En prenant $y' = y'' = X_\varepsilon$, on voit que l'on a

$$|L_1(\log x'') - L_1(\log x')| \leq 2 \sin \frac{\varepsilon}{4} \quad \text{pour } x' \text{ et } x'' \geq X_\varepsilon, \quad (29)$$

et, en prenant $x' = x'' = X_\varepsilon$, on voit que l'on a

$$|L_2(\log y'') - L_2(\log y')| \leq 2 \sin \frac{\varepsilon}{4} \quad \text{pour } y' \text{ et } y'' \geq X_\varepsilon. \quad (30)$$

Si l'on pose, pour x et $y \geq 1$,

$$A_1(x) = \sum_{p \leq x} \frac{1}{p} \text{Im} [f(p, 1)]$$

et

$$A_2(y) = \sum_{p \leq y} \frac{1}{p} \text{Im} [f(1, p)],$$

(29) et (30) s'écrivent

$$|\exp [iA_1(x'')] - \exp [iA_1(x')]| \leq 2 \sin \frac{\varepsilon}{4} \quad \text{pour } x' \text{ et } x'' \geq X_\varepsilon \quad (31)$$

et

$$| \exp [iA_2 (y'')] - \exp [iA_2 (y')] | \leq 2 \sin \frac{\varepsilon}{4} \quad \text{pour } y' \text{ et } y'' \geq X_\varepsilon. \quad (32)$$

En prenant $x' = X_\varepsilon$ et $x'' = x$, on déduit de (31) que, pour $x \geq X_\varepsilon$, $A_1 (x)$ appartient à l'un des intervalles $[A_1 (X_\varepsilon) + 2k\pi - \frac{\varepsilon}{2}, A_1 (X_\varepsilon) + 2k\pi + \frac{\varepsilon}{2}]$, où $k \in \mathbf{Z}$.

La différence de deux nombres appartenant à deux de ces intervalles distincts est au moins égale à $2\pi - \varepsilon > \frac{1}{2}$.

Comme on a évidemment

$$| A_1 (x'') - A_1 (x') | \leq \frac{1}{2} \quad \text{pour } 2 \leq x' < x'' \leq x' + 2,$$

l'intervalle auquel appartient $A_1 (x)$ est le même pour tous les $x > X_\varepsilon$ que pour $x = X_\varepsilon$, c'est-à-dire celui qui correspond à $k = 0$.

On a donc $| A_1 (x) - A_1 (X_\varepsilon) | \leq \frac{\varepsilon}{2}$ pour tout $x \geq X_\varepsilon$, et par suite

$$| A_1 (x'') - A_1 (x') | \leq \varepsilon \quad \text{pour } x' \text{ et } x'' \geq X_\varepsilon.$$

Il résulte de là que $A_1 (x)$ tend vers une limite finie quand x tend vers $+\infty$, c'est-à-dire que la série $\sum \frac{1}{p} \text{Im} [f(p, 1)]$ est convergente.

On déduit de même de (32) que l'on a

$$| A_2 (y'') - A_2 (y') | \leq \varepsilon \quad \text{pour } y' \text{ et } y'' \geq X_\varepsilon,$$

et il en résulte que $A_2 (y)$ tend vers une limite finie quand y tend vers $+\infty$, c'est-à-dire que la série $\sum \frac{1}{p} \text{Im} [f(1, p)]$ est convergente.

Avec (27) et (28), ceci montre que les séries

$$\sum \frac{1}{p} [1 - f(p, 1)] \quad \text{et} \quad \sum \frac{1}{p} [1 - f(1, p)]$$

sont convergentes.

La première partie du théorème 2 est ainsi démontrée.

4.2.2. Supposons maintenant que les séries

$$\sum \frac{1}{p} [1 - f(p, 1)] \quad \text{et} \quad \sum \frac{1}{p} [1 - f(1, p)]$$

soient convergentes.

Ceci entraîne que l'on a (27) et (28). Autrement dit, on a (24) et (25) avec $a_1 = a_2 = 0$.

Si l'on a

$$\left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j+k}} \right) \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(3^j, 3^k)}{3^{j+k}} \right) = 0.$$

f possède une valeur moyenne nulle.

Si au contraire on a (32), on a quand x et y tendent vers $+\infty$ indépendamment l'un de l'autre

$$\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n) = C L_1(\log x) L_2(\log y) + o[1], \quad (33)$$

où C est une constante complexe non nulle,

$$L_1(t) = \exp \left\{ i \sum_{p \leq e^t} \frac{1}{p} \operatorname{Im} [f(p, 1)] \right\}$$

et

$$L_2(t) = \exp \left\{ i \sum_{p \leq e^t} \frac{1}{p} \operatorname{Im} [f(1, p)] \right\}.$$

Les séries

$$\sum \frac{1}{p} \operatorname{Im} [f(p, 1)] \quad \text{et} \quad \sum \frac{1}{p} \operatorname{Im} [f(1, p)]$$

étant convergentes, $L_1(t)$ et $L_2(t)$ tendent vers des limites finies, d'ailleurs de module 1, lorsque t tend vers $+\infty$. Alors (33) montre que f possède une valeur moyenne (de module égal à C).

Pour achever la démonstration de la deuxième partie du théorème 2, il reste à montrer que $M(f)$ est égale à la valeur du produit infini

$$\prod \left(1 - \frac{1}{p} \right)^2 \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}} \right).$$

Pour cela, reportons-nous à la démonstration du théorème 1 donnée au chapitre 3.

Puisque l'on a (27) et (28), on est dans le cas considéré au paragraphe 3.4, avec $a_1 = a_2 = 0$.

(19) et (20) donnent dans ce cas

$$\frac{1}{x} H_1(x) = C_1 L_1(\log x) + o[1] \quad (34)$$

et

$$\frac{1}{x} H_2(x) = C_2 L_2(\log x) + o[1]. \quad (35)$$

On sait que la constante C qui figure dans (6), réduit ici à (33), est donnée par

$$C = C_1 C_2 \sum_{m,n \geq 1} \frac{g(m,n)}{m n}.$$

(33) peut donc s'écrire

$$\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m,n) = C_1 C_2 \left(\sum_{m,n \geq 1} \frac{g(m,n)}{m n} \right) L_1(\log x) L_2(\log y) + o[1],$$

et on voit que l'on a pour x tendant vers $+\infty$

$$\frac{1}{x^2} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq x}} f(m,n) = C_1 C_2 \left(\sum_{m,n \geq 1} \frac{g(m,n)}{m n} \right) L_1(\log x) L_2(\log x) + o[1]. \quad (36)$$

Mais, d'après ce qui a été dit au paragraphe 2.1.1, on a quand x tend vers $+\infty$

$$\begin{aligned} \frac{1}{x} H_1(x) &= \prod_{p \leq x} \left(1 - \frac{1}{p} \right) \left[1 + \sum_{r=1}^{+\infty} \frac{h_1(p^r)}{p^r} \right] + o[1] \\ &= \frac{1}{2} \prod_{2 < p \leq x} \left(1 - \frac{1}{p} \right) \left(\sum_{j=0}^{+\infty} \frac{f(p^j, 1)}{p^j} \right) + o[1] \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned} \frac{1}{x} H_2(x) &= \prod_{p \leq x} \left(1 - \frac{1}{p} \right) \left[1 + \sum_{r=1}^{+\infty} \frac{h_2(p^r)}{p^r} \right] + o[1] \\ &= \frac{1}{2} \prod_{2 < p \leq x} \left(1 - \frac{1}{p} \right) \left(\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{f(1, p^k)}{p^k} \right) + o[1]. \end{aligned}$$

En comparant avec (34) et (35), on voit que l'on a

$$C_1 L_1(\log x) = \frac{1}{2} \prod_{2 < p \leq x} \left(1 - \frac{1}{p} \right) \left(\sum_{j=0}^{+\infty} \frac{f(p^j, 1)}{p^j} \right) + o[1] \quad (37)$$

et

$$C_2 L_2(\log x) = \frac{1}{2} \prod_{2 < p \leq x} \left(1 - \frac{1}{p} \right) \left(\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{f(1, p^k)}{p^k} \right) + o[1]. \quad (38)$$

Les produits sont de module au plus égal à 1 car on a pour chaque p

$$\left| \sum_{j=0}^{+\infty} \frac{f(p^j, 1)}{p^j} \right| \leq \sum_{j=0}^{+\infty} \frac{1}{p^j} = \frac{1}{1 - \frac{1}{p}}$$

et

$$\left| \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{f(1, p^k)}{p^k} \right| \leq \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{p^k} = \frac{1}{1 - \frac{1}{p}}.$$

D'autre part, (14) donne

$$\begin{aligned} \sum_{m,n \geq 1} \frac{g(m, n)}{m n} &= \left\{ \sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j+k}} \right\} \prod_{p > 2} \left\{ \left[\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}} \right] / \right. \\ &\quad \left. \left[\sum_{j=0}^{+\infty} \frac{f(p^j, 1)}{p^j} \right] \left[\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{f(1, p^k)}{p^k} \right] \right\} \\ &= \left\{ \sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j+k}} \right\} \prod_{2 < p \leq x} \left\{ \left[\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}} \right] / \right. \\ &\quad \left. \left[\sum_{j=0}^{+\infty} \frac{f(p^j, 1)}{p^j} \right] \left[\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{f(1, p^k)}{p^k} \right] \right\} + o[1]. \end{aligned}$$

Avec (37) et (38), ceci montre que (36) peut s'écrire

$$\frac{1}{x^2} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq x}} f(m, n) = \prod_{p \leq x} \left(1 - \frac{1}{p} \right)^2 \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}} \right) + o[1], \quad (39)$$

ce qui donne le résultat voulu.

Remarquons en passant que la démonstration de (39) a utilisé uniquement le fait que l'on a (27) et (28).

4.3. Convenons maintenant de dire que f possède une « valeur moyenne faible » si l'expression

$$\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n)$$

tend vers une limite quand x et y tendent vers $+\infty$ avec un rapport fixe, cette limite étant indépendante de la valeur du rapport. La valeur moyenne faible de f sera la limite en question.

Il est clair que, si f possède une valeur moyenne, elle possède aussi une valeur moyenne faible égale à sa valeur moyenne ordinaire.

Comme on l'a vu au début de ce chapitre, f possède une valeur moyenne faible nulle si, et seulement si, elle possède une valeur moyenne nulle.

Nous allons montrer maintenant que, pour que f possède une valeur moyenne faible non nulle, il faut et il suffit que

1° la série $\sum \frac{1}{p} [2 - f(p, 1) - f(1, p)]$ soit convergente;

2° on ait $\left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j+k}} \right) \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(3^j, 3^k)}{3^{j+k}} \right) \neq 0$ ¹⁾

Plus précisément, nous établirons le théorème suivant.

THÉORÈME 3: I. *S'il existe trois nombres strictement positifs distincts ρ_1 , ρ_2 et ρ_3 tels que le rapport $\left(\log \frac{\rho_3}{\rho_1} \right) / \left(\log \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)$ soit irrationnel et tels que, pour $j = 1, j = 2$ et $j = 3$, l'expression*

$$\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n)$$

tende vers une même limite non nulle quand x et y tendent vers $+\infty$ avec

$\frac{y}{x} = \rho_j$ ²⁾ la série

$$\sum \frac{1}{p} [2 - f(p, 1) - f(1, p)]$$

est convergente et on a (23).

¹⁾ On pourrait dire aussi qu'il faut et il suffit que le produit infini

$$\prod \left(1 - \frac{1}{p} \right)^2 \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}} \right)$$

soit convergent et non nul.

²⁾ Cette hypothèse pourrait aussi se formuler de la façon suivante:

Il existe trois couples de nombres strictement positifs (α_1, β_1) , (α_2, β_2) , (α_3, β_3) tels que le déterminant

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ \log \alpha_1 & \log \beta_1 & 1 & r_1 \\ \log \alpha_2 & \log \beta_2 & 1 & r_2 \\ \log \alpha_3 & \log \beta_3 & 1 & r_3 \end{vmatrix}$$

soit non nul quels que soient r_1, r_2 et $r_3 \in \mathbf{Z}$ et ne satisfaisant pas à $r_1 = r_2 = r_3$, et tels que, pour $j = 1, j = 2$ et $j = 3$, l'expression

$$\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n)$$

tende vers une même limite non nulle quand x et y tendent vers $+\infty$ avec $\frac{x}{\alpha_j} = \frac{y}{\beta_j}$.

La manière dont le résultat se généralise pour les fonctions de \mathcal{M}_q , où $q > 2$, est visible sous cette forme.

II. Si la série $\sum \frac{1}{p} [2 - f(p, 1) - f(1, p)]$ est convergente, l'expression

$$\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n)$$

tend vers la valeur du produit infini

$$\prod \left(1 - \frac{1}{p}\right)^2 \left(\sum_{j, k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}}\right)$$

quand x et y tendent vers $+\infty$ de façon que les rapports $\frac{\log y}{\log x}$ et $\frac{\log x}{\log y}$ restent bornés¹⁾.

4.3.1. Supposons d'abord que $\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n)$ tende vers une limite l non

nulle²⁾ quand x et y tendent vers $+\infty$ avec $\frac{y}{x} = \rho$.

Tout d'abord, comme au paragraphe 4.2.1, on est nécessairement dans le cas où il existe a_1 et a_2 réels tels que l'on ait (24) et (25), puisque, dans le cas contraire, $\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n)$ devrait tendre vers zéro quand x et y

tendent vers $+\infty$.

Pour la même raison, on a (26).

On a donc (6).

Compte tenu de (6), il résulte de notre hypothèse que, lorsque x tend vers $+\infty$,

$$Cx^{ia_1} (\rho x)^{ia_2} L_1(\log x) L_2(\log \rho x) \text{ tend vers } l.$$

Ceci entraîne que, quel que soit $\lambda > 0$,

$$C(\lambda x)^{ia_1} (\rho \lambda x)^{ia_2} L_1(\log \lambda x) L_2(\log \rho \lambda x) \text{ tend aussi vers } l.$$

Mais le quotient de la deuxième expression par la première tend vers $\lambda^{i(a_1 + a_2)}$.

On doit donc avoir $\lambda^{i(a_1 + a_2)} = 1$ pour tout $\lambda > 0$, ce qui nécessite $a_1 + a_2 = 0$.

Alors on voit que, quand x tend vers $+\infty$,

¹⁾ Il convient de se rappeler ce qui a été dit à la fin du paragraphe 4.1.

²⁾ l est nécessairement finie, et même de module ≤ 1 , puisque c'est la limite d'une quantité qui est visiblement de module ≤ 1 .

$$C\rho^{ia_2} L_1(\log x) L_2(\log \rho x) \text{ tend vers } l.$$

4.3.2. Supposons maintenant qu'il existe trois nombres strictement positifs

distincts ρ_1, ρ_2 et ρ_3 tels que le rapport $\left(\log \frac{\rho_3}{\rho_1}\right) / \left(\log \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)$ soit irrationnel

et tels que, pour $j = 1, j = 2$ et $j = 3$, $\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n)$ tende vers $l \neq 0$

quand x et y tendent vers $+\infty$ avec $\frac{y}{x} = \rho_j$.

Alors, d'après ce qui précède, on est dans le cas où il existe a_1 et a_2 réels tels que l'on ait (24) et (25) et on a (26), de sorte que l'on a (6), et en outre on a $a_1 + a_2 = 0$ et, quand x tend vers $+\infty$,

$$C\rho_j^{ia_2} L_1(\log x) L_2(\log \rho_j x) \text{ tend vers } l \text{ pour } j = 1, 2, 3.$$

En considérant des quotients, on voit que

$$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{ia_2} = \left(\frac{\rho_3}{\rho_1}\right)^{ia_2} = 1.$$

Autrement dit, il existe k_2 et $k_3 \in \mathbf{Z}$ tels que

$$a_2 \log \frac{\rho_2}{\rho_1} = 2k_2\pi \quad \text{et} \quad a_2 \log \frac{\rho_3}{\rho_1} = 2k_3\pi.$$

Si a_2 n'était pas nul, k_1 et k_2 ne le seraient pas et on aurait $\left(\log \frac{\rho_3}{\rho_1}\right) / \left(\log \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) = \frac{k_3}{k_2}$, contrairement à l'hypothèse que ce rapport est irrationnel.

On a donc $a_2 = 0$, et par suite aussi $a_1 = 0$.

Alors (26) donne (23); (24) et (25) donnent (27) et (28); (6) se réduit à (33). De plus, on voit que, quand x tend vers $+\infty$,

$$C L_1(\log x) L_2(\log \rho_j x) \text{ tend vers } l,$$

et par suite

$$C L_1(\log x) L_2(\log x) \text{ tend vers } l.$$

(33) montre que, quand x tend vers $+\infty$,

$$\frac{1}{x^2} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq x}} f(m, n) = C L_1(\log x) L_2(\log x) + o[1].$$

Donc $\frac{1}{x^2} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq x}} f(m, n)$ tend vers l .

Mais, d'après la remarque de la fin du paragraphe 4.2.2, on a (39) puisque l'on a (27) et (28).

On voit ainsi que, quand x tend vers $+\infty$,

$$\prod_{p \leq x} \left(1 - \frac{1}{p}\right)^2 \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}}\right) \text{ tend vers } l.$$

Le produit infini $\prod \left(1 - \frac{1}{p}\right)^2 \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}}\right)$ est donc convergent, et par conséquent la série $\sum \frac{1}{p} [2 - f(p, 1) - f(1, p)]$ est convergente d'après ce qui a été dit au paragraphe 4.1.

La première partie du théorème 3 est ainsi complètement démontrée.

4.3.3. Supposons maintenant que la série

$$\sum \frac{1}{p} [2 - f(p, 1) - f(1, p)]$$

soit convergente.

D'après ce qui a été dit au paragraphe 4.1, ceci entraîne que le produit infini

$$\prod \left(1 - \frac{1}{p}\right)^2 \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}}\right)$$

est convergent.

De plus, on a $\sum \frac{1}{p} \{2 - \Re e [f(p, 1)] - \Re e [f(1, p)]\} < +\infty$, ce qui entraîne évidemment (27) et (28).

Autrement dit, on a (24) et (25) avec $a_1 = a_2 = 0$.

Si l'on a

$$\left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j+k}}\right) \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(3^j, 3^k)}{3^{j+k}}\right) = 0,$$

f possède une valeur moyenne nulle et le produit infini

$$\prod \left(1 - \frac{1}{p}\right)^2 \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}}\right)$$

est nul, et l'on a bien le résultat voulu.

Si, au contraire, on a (23), quand x et y tendent vers $+\infty$, on a (33), où C est une constante complexe non nulle et les fonctions L_1 et L_2 sont données par les formules indiquées au paragraphe 4.2.2.

D'après les propriétés de L_1 et L_2 , si x et y tendent vers $+\infty$ de façon que les rapports $\frac{\log y}{\log x}$ et $\frac{\log x}{\log y}$ restent bornés, on a

$$L_2(\log y) = L_2(\log x) + o[1]$$

et (33) donne

$$\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n) = C L_1(\log x) L_2(\log x) + o[1].$$

Mais on a pour $x \geq 1$

$$L_1(\log x) L_2(\log x) = \exp \left\{ i \sum_{p \leq x} \frac{1}{p} (Im [f(p, 1)] + Im [f(1, p)]) \right\}$$

et la série

$$\sum \frac{1}{p} \{ Im [f(p, 1)] + Im [f(1, p)] \}$$

est évidemment convergente.

Si S est la somme de cette série, $L_1(\log x) L_2(\log x)$ tend vers e^{iS} quand x tend vers $+\infty$.

On voit alors que $\frac{1}{xy} \sum_{\substack{m \leq x \\ n \leq y}} f(m, n)$ tend vers Ce^{iS} quand x et y tendent

vers $+\infty$ de façon que les rapports $\frac{\log y}{\log x}$ et $\frac{\log x}{\log y}$ restent bornés.

Pour achever de démontrer la deuxième partie du théorème 3, il ne reste plus qu'à montrer que cette limite Ce^{iS} est égale à la valeur du produit infini

$$\prod \left(1 - \frac{1}{p} \right)^2 \left(\sum_{j, k \geq 0} \frac{f(p^j, p^k)}{p^{j+k}} \right).$$

Ceci résulte de ce que, d'après la remarque de la fin du paragraphe, on a (39) puisque l'on a (27) et (28).

4.4. Pour terminer, indiquons deux résultats particuliers qui nous paraissent intéressants.

THÉORÈME 4: *S'il existe $K > 0$ tel que l'on ait pour tout p*

$$| \operatorname{Im} f(p, 1) | \leq K [1 - \operatorname{Re} f(p, 1)] \quad \text{et} \quad | \operatorname{Im} f(1, p) | \leq K [1 - \operatorname{Re} f(1, p)],$$

f possède une valeur moyenne.

$M(f)$ est nulle si, et seulement si, on a

$$\sum \frac{1}{p} [2 - \operatorname{Re} f(p, 1) - \operatorname{Re} f(1, p)] = +\infty$$

ou

$$\left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(2^j, 2^k)}{2^{j+k}} \right) \left(\sum_{j,k \geq 0} \frac{f(3^j, 3^k)}{3^{j+k}} \right) = 0.$$

THÉORÈME 5: *Si l'on a, quand x tend vers $+\infty$, l'une ou l'autre des relations*

$$\sum_{p \leq x} f(p, 1) \log p = \rho x + o[x] \tag{40}$$

et

$$\sum_{p \leq x} f(1, p) \log p = \rho x + o[x], \tag{41}$$

avec $\rho \neq 1$, f possède une valeur moyenne nulle.

Le résultat subsiste avec $\rho = 1$ à condition d'ajouter la condition

$$\sum \frac{1}{p} [1 - \operatorname{Re} f(p, 1)] = +\infty$$

dans le cas ou l'on a (40), et la condition

$$\sum \frac{1}{p} [1 - \operatorname{Re} f(1, p)] = +\infty$$

dans le cas ou l'on a (41).

Ces deux théorèmes peuvent être déduits de la première partie du théorème 1, tel qu'il est énoncé au paragraphe 3 pour $q = 2$, et de la deuxième partie du théorème 2.

On peut aussi les démontrer en reprenant ce qui a été dit aux paragraphes 3.1 et 3.2 et utilisant des théorèmes analogues relatifs au cas d'une fonction de \mathcal{M}_1 ¹⁾.

(Reçu le 6 octobre 1970)

H. Delange

Faculté des Sciences
91 - Orsay (France)

¹⁾ Théorème B (dû à Wirsing) énoncé à la page 275 de notre article cité au paragraphe 2.3 et théorème principal de notre mémoire « Un théorème sur les fonctions arithmétiques multiplicatives et ses applications » (Ann. Sci. Ecole Norm. Sup. (3), 78 (1961), p. 1-29).