

FONCTIONS ENTIÈRES D'ORDRE FINI ET D'ORDRE NUL

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **L'Enseignement Mathématique**

Band (Jahr): **4 (1958)**

Heft 1: **L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE**

PDF erstellt am: **20.09.2024**

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.

FONCTIONS ENTIÈRES D'ORDRE FINI ET FONCTIONS MÉROMORPHES *

par Georges VALIRON †

FONCTIONS ENTIÈRES D'ORDRE FINI ET D'ORDRE NUL

I. L'ORDRE DE LA FONCTION ET L'ORDRE DE SA DÉRIVÉE.

1. Rappel du théorème de Cauchy sur le module maximum.

On suppose connu le théorème de Cauchy: si $f(z)$ est holomorphe dans un domaine D et si C est une courbe simple fermée de D , rectifiable, dont l'intérieur appartient à D , on a

$$f(z) = \frac{1}{2i\pi} \int_C \frac{f(u)}{u-z} du.$$

On sait qu'on en déduit le développement de Taylor: si z_0 est un point de D , on a

$$f(z) = \sum_0^{\infty} a_n (z - z_0)^n, \quad a_n = \frac{1}{2i\pi} \int_C \frac{f(u)}{(u - z_0)^{n+1}} du$$

C étant une courbe entourant z_0 et dont l'intérieur appartient à D . La série converge uniformément et absolument à l'intérieur du cercle de centre z_0 tangent à la frontière de D .

En particulier, si $f(z)$ est holomorphe pour $|z| \leq r$, c'est-à-dire dans un cercle $|z| < r'$ avec $r' > r$, on a

$$f(z) = \sum_0^{\infty} a_n z^n$$

*) Série de cours et de conférences sur la théorie des fonctions entières, faits en 1948 au Caire et à Alexandrie, d'après le manuscrit revu et mis au point par le professeur Henri MILLOUX.

avec

$$a_n = \frac{1}{2i\pi} \int_{|u|=r} \frac{f(u) du}{u^{n+1}},$$

et, en mettant en évidence les modules et arguments:

$$a_n = A_n e^{i\theta_n}, \quad u = re^{i\theta}, \quad f(u) = B(r, \theta) e^{iC(r, \theta)}$$

on peut écrire

$$r^n A_n = \frac{1}{2i\pi} \int_0^{2\pi} B(r, \theta) e^{i[C(r, \theta) - \theta_n - n\theta]} i d\theta$$

ou, puisque A_n est réel:

$$r^n A_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} B(r, \theta) \cos [C(r, \theta) - \theta_n - n\theta] d\theta. \quad (1)$$

Les fonctions $B(r, \theta)$ et $C(r, \theta)$ sont fonctions continues de θ . Si $M(r)$ désigne le maximum de $B(r, \theta)$ lorsque θ varie de 0 à 2π , on déduit de (1)

$$A_n r^n \leq M(r). \quad (2)$$

Peut-on avoir l'égalité? Pour qu'il en soit ainsi, il faut et il suffit, eu égard à la continuité, que, quel que soit θ ,

$$B(r, \theta) = M(r), \quad C(r, \theta) - \theta_n - n\theta = 2ik\pi, \quad k \text{ entier.}$$

S'il en est ainsi, on aura pour $p \neq n$,

$$A_p r^p = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M(r) \cos (\theta_n - \theta_p + (n - p)\theta) d\theta = 0.$$

Par suite, l'inégalité (2) est effectivement une inégalité sauf si $f(z)$ est un monôme: $f(z) = a_p z^p$.

En particulier, si $f(z)$ ne se réduit pas à une constante pour $|z| \leq r$, on a $|f(o)| < M(r)$. Le maximum de $|f(z)|$ est atteint sur le contour $|z| = r$. On déduit de là le théorème de Cauchy sur le module maximum:

THÉORÈME. — Si $f(z)$ est holomorphe dans un domaine borné D , est continue dans D et sur sa frontière F et n'est pas une constante, le maximum de $|f(z)|$ est atteint sur la frontière.

Car $|f(z)|$ est continue dans $D + F$, donc a un maximum M qui est atteint en un point au moins de $D + F$. Si en un point z_0 de D on avait $|f(z_0)| = M$, $f(z)$ serait constant dans le cercle C de centre z_0 tangent à la frontière F et $|f(z)| = M$. En un point z_1 de C on aurait encore $|f(z_1)| = M$, donc $f(z)$ serait encore constant dans le cercle de centre z_1 tangent à F , cette constante étant la même que dans C , et ainsi de suite.

COROLLAIRE. — Si $f(z)$ est une fonction entière, donc

$$f(z) = \sum_0^{\infty} a_n z^n$$

la série étant convergente quel que soit z et si $M(r) = \max |f(re^{i\theta})|$, $M(r)$ est une fonction continue et croissante de r .

En outre, si $f(z)$ n'est pas un polynôme, ce que nous supposons toujours lorsque nous parlerons de fonction entière, l'inégalité (2) montre que $\frac{\log M(r)}{\log r}$ n'est pas borné et dépasse tout nombre donné dès que r est assez grand.

2. Théorème d'Hadamard sur la convexité de $\log M(r)$.

Si l'on pose

$$X = \log r, \quad V(X) = \log M(r).$$

la fonction $V(X)$ est continue et croissante. Hadamard a montré que c'est une fonction convexe. Pour le montrer, il suffit de prouver que X_1, X, X_2 étant trois valeurs telles que $X_1 < X < X_2$, on a

$$V(X) - hX < V(X_1) - hX_1 \tag{3}$$

si h est défini par

$$V(X_1) - hX_1 = V(X_2) - hX_2. \tag{4}$$

Or, h étant ainsi défini, considérons la fonction

$$f(z) z^{-h}$$

qui, en général, n'est pas holomorphe dans la couronne $e^{x_1} \leq |z| \leq e^{x_2}$, mais qui est analytique et de module uniforme. Cette fonction n'est pas constante sans quoi $f(z)$ serait un monôme, le maximum de son module est donc atteint sur la frontière. Donc, comme le module a la même valeur sur les deux cercles frontières :

$$\exp (V (X_1) - hX_1) = \exp (V (X_2 - hX_2) ,$$

le module en un point intérieur est inférieur au module sur la frontière, ce qui donne l'inégalité (3), moyennant (4).

Conséquence. — D'après les propriétés des fonctions convexes, $V(X)$ a une dérivée à gauche et une dérivée à droite en chaque point X , ces dérivées étant croissantes. Prenons, par exemple, la dérivée à gauche de $V(X)$, soit $\omega(X)$, fonction qui peut avoir des discontinuités. On a

$$V(X) = \log |f(0)| + \int_{-\infty}^X \omega(u) du$$

(en supposant $f(0) \neq 0$). En revenant à la fonction $\log M(r)$, ce qui se fait dans l'intégrale en posant $u = \log t$, on obtient

$$\log M(r) = \log |f(0)| + \int_0^r \varphi(t) \frac{dt}{t}, \quad f(0) \neq 0, \quad (5)$$

la fonction $\varphi(t) = \omega(u)$ étant croissante. Si $f(0) = 0$, on peut prendre

$$\log M(r) = \log M(1) + \int_1^r \varphi(t) \frac{dt}{t}. \quad (6)$$

Remarques. — I. Ces égalités impliquent la convexité, puisque $\varphi(t)$ est supposée croissante. Elles valent pourvu que $f(z)$ soit holomorphe pour $|z| \leq r$.

II. La fonction $\varphi(t)$ est indéfiniment croissante lorsque $f(z)$ est une fonction entière.

III. Blumenthal a montré que $\log M(r)$ est analytique par intervalles.

3. *Définition de l'ordre.*

Si $f(z)$ est une fonction entière, on définit son *ordre* (qui est un ordre de croissance) par

$$\rho = \overline{\lim}_{r=\infty} \frac{\log_2 M(r)}{\log r} \quad (\log_2 U = \log(\log U)).$$

ρ est un nombre non négatif, qui peut être nul, fini positif ou infini. Par exemple, l'ordre de $e^{P(z)}$ où $P(z)$ est un polynôme est égal au degré de ce polynôme, l'ordre de $\exp(e^z)$ est infini.

On voit aisément que les fonctions

$$f(z), \quad f(z)z, \quad f(z) + P(z)$$

où $f(z)$ est donnée et où $P(z)$ est un polynôme arbitraire donné, ont le même ordre.

4. *Comparaison de l'ordre d'une fonction et de l'ordre de sa dérivée.*

Si $f(z)$ est donnée, si $M(r)$ est le maximum de son module, et $M^1(r)$ le maximum du module de sa dérivée $f'(z)$, nous allons comparer les fonctions $M(r)$ et $M^1(r)$.

Soit z_0 un point du cercle $|z| = R$ en lequel $|f(z_0)| = M(R)$, et soit z_1 un point pris sur le rayon joignant l'origine au point z_0 . On a, en intégrant le long du rayon,

$$f(z_0) = f(z_1) + \int_{z_0}^{z_1} f'(u) du$$

donc, si $r = |z_1|$,

$$M(R) < M(r) + (R - r) M^1(R),$$

car $M^1(r)$ est croissant. Par suite

$$M^1(R) > \frac{M(R) - M(r)}{R - r}.$$

Si r tend vers R , on obtient

$$M^1(R) \geq \frac{dM(R)}{dR},$$

la dérivée étant la dérivée à gauche. D'ailleurs $M^1(R)$ étant continue, on peut aussi prendre la dérivée à droite. On a,

d'après (6),

$$\frac{1}{M(R)} \frac{d}{dR} M(R) = \frac{\nu(R)}{R},$$

et, puisque $\nu(R)$ croît,

$$\log M(R) - \log M(1) < \nu(R) \log R,$$

ce qui conduit aux inégalités

$$M^1(r) \geq \frac{M(r)}{r} \nu(r), \quad (7)$$

et

$$M^1(r) > \frac{M(r) \log M(r) - \log M(1)}{r \log r}. \quad (8)$$

Pour obtenir une inégalité de sens contraire, nous utilisons l'intégrale de Cauchy. On a

$$f'(z) = \frac{1}{2i\pi} \int_C \frac{f(u)}{(u-z)^2} du.$$

Prenons z , de module r , tel que $|f'(z)| = M^1(r)$, et pour C un cercle de centre z et rayon $R - r$, ($R > r$), donc $|u - z| = R - r$. Nous obtenons l'inégalité

$$M^1(r) < \frac{M(R)}{R - r} \quad (9)$$

qui n'est pas très précise puisque nous remplaçons sur tout C , $|f(u)|$ par $M(R)$. D'après (6), on a

$$\log M(R) = \log M(r) + \int_r^R \nu(t) \frac{dt}{t}$$

donc

$$\log M^1(r) < \log M(r) + \log \frac{1}{R - r} + \int_r^R \nu(t) \frac{dt}{t}, \quad R > r. \quad (10)$$

Le second membre est une fonction de R dont le minimum correspond à

$$\frac{\nu(R)}{R} = \frac{1}{R - r}$$

ou

$$R = \frac{r}{1 - \frac{1}{\rho(R)}}. \quad (11)$$

Le second membre de l'inégalité (11) est d'ailleurs inférieur à

$$\frac{r}{1 - \frac{1}{\rho(r)}} = r(1 + o(1)).$$

De (10) on déduit

$$\log M^1(r) < \log M(r) + \log \frac{\rho(R)}{R} + \rho(R) \log \frac{R}{r},$$

donc, comme d'après (11)

$$\rho(R) \log \frac{R}{r} = -\rho(R) \log \left(1 - \frac{1}{\rho(R)}\right) = 1 + o(1),$$

on arrive finalement à l'inégalité

$$M^1(r) < M(r) \frac{e \rho(R')}{r} (1 + o(1)), \quad R' = \frac{r \rho(r)}{\rho(r) - 1} = r(1 + o(1)). \quad (12)$$

La présence du nombre e dans cette inégalité semble être imputable à la méthode, c'est-à-dire à l'emploi de l'inégalité (9) qui est trop grossière.

Les inégalités (7) et (9) fournissent ce premier résultat :

THÉORÈME. — *L'ordre de la dérivée d'une fonction entière est égal à l'ordre de cette fonction.*

Car, puisque $\rho(r)$ est indéfiniment croissant, (7) entraîne

$$M^1(r) > \frac{M(r)}{r}, \quad \text{si } r > r_0,$$

et si l'on prend $R = 2r$ dans (9), on a

$$M^1(r) < \frac{M(2r)}{r}.$$

Ainsi

$$\log M(r) - \log r < \log M^1(r) < \log M(2r) - \log r,$$

et puisque le quotient $\log M(r) : \log r$ finit par dépasser tout

nombre donné, on a

$$(1 - 0(1)) \log M(r) < \log M^1(r) < \log M(2r),$$

$$\overline{\lim}_{r=\infty} \frac{\log_2 M(r)}{\log r} \leq \overline{\lim}_{r=\infty} \frac{\log_2 M^1(r)}{\log r} \leq \overline{\lim}_{r=\infty} \frac{\log_2 M(2r)}{\log 2r}.$$

(puisque $(\log 2r) : \log r$ tend vers un). Ceci démontre le théorème.

5. Cas des fonctions d'ordre fini.

Si $f(z)$ est d'ordre fini ρ , on a, d'après la définition de l'ordre, si petit que soit $\varepsilon > 0$,

$$\log M(r) < r^{\rho+\varepsilon} \quad \text{si } r > r(\varepsilon),$$

et si $\rho > 0$,

$$\log M(r_p) > r_p^{\rho-\varepsilon} \quad \text{pour } r_{p+1} > r_p, \quad \lim r_p = \infty.$$

On déduit de là des inégalités analogues pour la dérivée $\nu(r)$.

En effet, si $R > r$,

$$\nu(r) \log \frac{R}{r} < \int_r^R \nu(t) \frac{dt}{t} < \log M(R) < R^{\rho+\varepsilon}$$

et en prenant $R = 2r$, et r assez grand,

$$\nu(r) < \frac{(2r)^{\rho+\varepsilon}}{\log 2} < r^{\rho+2\varepsilon}$$

et puisque ε est arbitrairement petit, on a encore

$$\nu(r) < r^{\rho+\varepsilon} \quad r > r'(\varepsilon).$$

D'autre part, si $\rho > 0$, il existe une suite de valeurs r'_1, r'_2, r'_q, \dots tendant vers l'infini, pour lesquelles $\nu(r) > r^{\rho-\varepsilon}$. Car si, à partir d'une valeur de r , soit r' , on avait $\nu(r) \leq r^{\rho-\varepsilon}$, on aurait

$$\log M(r) < \log M(r'_0) + \int_{r'_0}^r t^{\rho-1-\varepsilon} dt = \log M(r'_0) + \frac{r^{\rho-\varepsilon} - r'^{\rho-\varepsilon}}{\rho - \varepsilon}.$$

L'ordre serait au plus $\rho - \varepsilon$. Ainsi, si l'ordre est ρ , l'ordre de $\nu(r)$ est aussi ρ , ce qu'on peut écrire

$$\overline{\lim}_{r=\infty} \frac{\log \nu(r)}{\log r} = \rho = \overline{\lim}_{r=\infty} \frac{\log_2 M(r)}{\log r}.$$

Inversement, on voit de suite que, si $\nu(r)$ est d'ordre ρ , $f(z)$ est aussi d'ordre ρ , et le résultat vaut aussi pour ρ infini.

Utilisons alors les inégalités (7) et (12). Si petit que soit ε positif, on aura pour $r = r'_\rho$

$$M^1(r) > M(r) r^{\rho-\varepsilon-1}$$

et pour $r > r'(\varepsilon)$,

$$M^1(r) < M(r) r^{\rho+\varepsilon-1} e(1 + o(1)) < M(r) r^{\rho+2\varepsilon-1} \quad (13)$$

si r est assez grand. On déduit de ces deux inégalités que

$$\overline{\lim}_{r=\infty} \frac{\log M_1(r) - \log M(r)}{\log r} = \rho - 1. \quad (14)$$

D'autre part, (7) et (13) donnent *a fortiori*,

$$\frac{M(r)}{r} < M^1(r) < M(r) r^{\rho+\varepsilon-1}$$

dès que r est assez grand. Par suite, puisque $\frac{\log r}{\log M(r)}$ tend vers zéro,

$$\lim_{r=\infty} \frac{\log M^1(r)}{\log M(r)} = 1. \quad (15)$$

Pour toute fonction entière d'ordre fini, $\log M(r)$ et $\log M^1(r)$ sont asymptotiquement équivalents.

Ordre inférieur. — L'ordre inférieur λ d'une fonction entière est défini par

$$\lambda = \lim_{r=\infty} \frac{\log_2 M(r)}{\log r}.$$

D'après (15), l'ordre inférieur d'une fonction d'ordre fini est le même que celui de sa dérivée. D'après (7), et (9) où l'on prend $R = 2r$, il en est encore de même si l'ordre est infini.

L'inégalité (13) montre que, si $f(z)$ est d'ordre ρ inférieur à 1, on a, à partir d'une valeur de r , $M^1(r) < M(r)$ puisque $\rho + 2\varepsilon - 1$ est négatif si ε est pris assez petit. Donc, puisque l'ordre se conserve dans la dérivation, on a, si m est donné et si $M^m(r)$ désigne le maximum de $|f^{(m)}(z)|$ pour $|z| = r$,

$$M(r) > M^1(r) > \dots > M^m(r) \quad \text{si } \rho < 1 \quad \text{et } r > r_0(m, f).$$

De même, l'inégalité (8) et la conservation de l'ordre inférieur dans la dérivation, montrent que, pour une fonction d'ordre inférieur λ supérieur à 1, on a

$$M(r) < M^1(r) < \dots < M^m(r) \quad \text{si } r > r_0(m, f) \text{ . } ^2)$$

6. Notion d'ordre précisé L.

On a cherché à préciser la notion d'ordre afin d'obtenir des résultats plus serrés. Lindelöf a employé comme fonctions de comparaison de $\log M(r)$ les fonctions r^ρ , $r^\rho (\log r)^{\rho_1}$, $r^\rho (\log r)^{\rho_1} (\log_2 r)^{\rho_2}$, etc., où ρ est positif. Mais ces fonctions ne permettent pas d'approcher de façon également précise de toute fonction jouissant des propriétés de croissance de $\log M(r)$. Pour obtenir dans tous les cas d'ordre fini des résultats comparables, on peut introduire la notion d'ordre précisé L.

Si $f(z)$ est une fonction entière d'ordre fini positif ρ , $M(r)$ son module maximum, on peut définir une fonction $\rho(r)$ jouissant des propriétés suivantes: $\rho(r)$ définie pour $r > 0$ est continue, dérivable à droite et à gauche de chaque point et l'on a

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \rho(r) = \rho, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \rho'(r) r \log r = 0,$$

$$\overline{\lim}_{r \rightarrow \infty} \frac{\log M(r)}{U(r)} = 1 \quad \text{avec} \quad U(r) = r^{\rho(r)}.$$

$\rho(r)$ sera un ordre précisé L.

Les deux premières propriétés permettent de calculer asymptotiquement les intégrales portant sur $U(r)$ et ses puissances comme si $\rho(r)$ était constant et égal à ρ . C'est une conséquence du fait que

$$\frac{r U'(r)}{U(r)} = \rho(r) + \rho'(r) r \log r \rightarrow \rho \quad (16)$$

donc, si $k > 1$ est donné

$$\log U(kr) - \log U(r) = \int_r^{kr} \frac{U'(x)}{U(x)} dx = \int_r^{kr} (\rho + o(1)) \frac{dx}{x} = (\rho + o(1)) \log k,$$

ou

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{U(kr)}{U(r)} = k^\rho.$$

Il suffit de montrer qu'on peut construire $\rho(r)$. A cet effet, définissons une suite de nombres r_p tels que $r_1 > 25$, puis

$$\log M(r_p) = \log M(r_{p-1}) \left(1 + \frac{1}{p}\right), \quad p = 2, 3, \dots \quad (17)$$

On a $\lim_{p \rightarrow \infty} r_p = \infty$. Soit β un nombre compris entre 0 et ρ . Pour $r \leq r_1$ nous prenons $\rho(r) = \rho(r_1)$. Pour $r \geq r_1$ nous prenons pour $\rho(r)$ le plus grand des nombres β et

$$y_p(r) = \begin{cases} \frac{\log_2 M(r_p)}{\log r_p} + \log_3 r - \log_3 r_p & \text{si } r_p \geq r, \\ \frac{\log_2 M(r_p)}{\log r_p} - \log_3 r + \log_3 r_p & \text{si } r_p \leq r. \end{cases}$$

Les seconds de ces nombres sont en nombre fini; il y a une infinité de nombres de la première ligne, mais puisque $[\log_2 M(r_p)] : \log r_p$ a pour limite supérieure ρ et puisque $-\log_3 r_p$ tend vers $-\infty$, il n'y a qu'un nombre fini de ces nombres qui sont supérieurs ou égaux à β . Le maximum existe donc. En outre, si $\rho(r) = y(r_p)$ avec $r_p \geq r$, on a encore $\rho(r) = y_p(r)$ entre r et r_p ; si $\rho(r) = y(r_p)$ avec $r_p < r$, on a encore $\rho(r) = y_p(r)$ entre r_{p-1} et r . Par suite $\rho(r)$ coïncide successivement avec des $y_p(r)$ ou avec β , et $\rho(r_p) = y_p(r_p)$ pour une suite infinie de valeurs r_p . Ces considérations peuvent être rendues intuitives si l'on représente géométriquement les fonctions $y_p(r)$.

On a donc

$$\rho'(r) = \pm \frac{1}{r \log r \log_2 r} \quad \text{ou} = 0,$$

donc $r\rho'(r) \log r$ tend bien vers 0. En outre, d'après (16), il suffit de prendre r_1 tel que

$$\beta - \frac{1}{\log_2 r_1} > 0$$

pour que $U'(r)$ soit toujours positif, donc $U(r)$ croissant. Pour tout r_p on a

$$\rho(r_p) \geq \frac{\log_2 M(r_p)}{\log r_p}$$

ou

$$U(r_p) \geq \log M(r_p),$$

l'égalité valant pour une suite infinie de valeurs p . Pour $r_p < r < r_{p+1}$, on a, puisque $U(r)$ croît

$$U(r) > U(r_p) \geq \log M(r_p) = \frac{\log M(r_{p+1})}{1 + \frac{1}{p}} > \frac{\log M(r)}{1 + \frac{1}{p}};$$

il s'ensuit bien que

$$\overline{\lim}_{r=\infty} \frac{\log M(r)}{U(r)} = 1.$$

Toutes les conditions imposées à $\rho(r)$ sont ainsi vérifiées sauf une seule. La fonction $\rho(r)$ ainsi construite ne tend pas nécessairement vers ρ . Si $\rho(r)$ ne tend pas vers ρ , on la remplace pour chaque r par la plus grande des valeurs de $\rho(r)$ et d'une fonction croissante constante par intervalles tendant vers ρ (par valeurs inférieures à ρ) et assez lentement pour que $\rho(r)$ reste égal à $\frac{\log_2 M(r)}{\log r}$ pour une suite infinie de valeurs r_p . Ceci montre aussi, en utilisant aussi une fonction décroissante constante par intervalles et tendant vers ρ , lorsque $\rho(r)$ primitivement construite reste supérieure à ρ dans une infinité d'intervalles, que l'on peut obtenir *un ordre précisé* $\rho(r)$ qui soit monotone (au sens large) à partir d'une valeur de r .

7. *Emploi de l'ordre précisé dans l'étude de la relation entre $M(r)$ et $M^1(r)$.*

Si $\rho(r)$ est un ordre précisé L pour $f(z)$, c'est aussi un ordre précisé L pour $f'(z)$ et inversement. C'est une conséquence immédiate de l'équivalence asymptotique

$$\log M_1(r) \sim \log M(r).$$

Si $\rho(r)$ est ordre précisé L de $f(z)$ et $\nu(r)$ la dérivée définie par la formule (6), si petit que soit ε positif, il existe une suite de valeurs r_p tendant vers l'infini telles que

$$\nu(r) > (1 - \varepsilon) \rho r^{\rho(r)}, \quad r = r_p. \quad (18)$$

Sinon, on aurait à partir d'une valeur r_0 de r ,

$$\nu(r) \leq (1 - \varepsilon) \rho r^{\rho(r)},$$

donc, pour $r > r_0$

$$\log M(r) < \log M(r_0) + \int_{r_0}^r (1 - \varepsilon) \rho t^{\rho(t)-1} dt .$$

Or

$$U'(t) \sim U(t) \frac{\rho}{t} ,$$

donc, si r_0 est assez grand, on a

$$\rho t^{\rho(t)-1} = (1 + \eta) U'(t) , \quad |\eta| < \frac{\varepsilon}{2} ,$$

et par suite

$$\int_{r_0}^r \rho t^{\rho(t)-1} dt < [U(r) - U(r_0)] \left(1 + \frac{\varepsilon}{2}\right) ,$$

ce qui donnerait

$$\log M(r) < \log M(r_0) - (1 - \varepsilon) \left(1 + \frac{\varepsilon}{2}\right) U(r_0) + (1 - \varepsilon) \left(1 + \frac{\varepsilon}{2}\right) U(r)$$

et entraînerait

$$\overline{\lim}_{r=\infty} \frac{\log M(r)}{U(r)} \leq (1 - \varepsilon) \left(1 + \frac{\varepsilon}{2}\right) < 1 .$$

Ainsi (18) est vérifiée et l'inégalité (7) montre que, pour une suite infinie de valeurs tendant vers l'infini, on a,

$$M^1(r) > M(r) (1 - \varepsilon) \rho r^{\rho(r)-1} .$$

Autrement dit,

$$\overline{\lim}_{r=\infty} \frac{M^1(r)}{M(r) \rho r^{\rho(r)-1}} \geq 1 . \quad (19)$$

La limitation obtenue dans l'autre sens est moins bonne. Tout d'abord, on a

$$\varrho(r) \log k < \int_r^{kr} \varrho(t) \frac{dt}{t} < \log M(kr) < (1 + \varepsilon) r^{\rho(r)} k^\rho$$

d'après les propriétés de $\rho(r)$. Donc

$$\varrho(r) < (1 + \varepsilon) \frac{k^\rho}{\log k} r^{\rho(r)} .$$

Comme le minimum de k^ρ : $\log k$ est ρe , on voit que

$$\nu(r) < (1 + \varepsilon) \rho e U(r), \quad U(r) = r^{\rho(r)}. \quad (20)$$

Cette inégalité, où ε est arbitrairement petit, vaut à partir d'une valeur de r . On a d'ailleurs aussi pour une suite de valeurs r_q tendant vers l'infini

$$\nu(r) < (1 + \varepsilon) \rho U(r).$$

Car, si l'on avait $\nu(r) > (1 + \varepsilon) \rho U(r) \sim (1 + \varepsilon) r U'(r)$ à partir d'une valeur de r , l'intégration immédiate de (6) montrerait que $\rho(r)$ n'est pas un ordre précisé L.

Portant la valeur (20) dans l'inégalité (12) et utilisant la propriété de $U(kr)$, on voit que

$$M^1(r) < M(r) e^2 \rho r^{\rho(r)} (1 + o(1)). \quad (21)$$

La présence du facteur e^2 introduit par la méthode ne semble pas s'imposer.

8. Cas des fonctions à croissance régulière de Borel.

Les fonctions d'ordre fini ρ positif, régulières au sens de Borel, sont les fonctions pour lesquelles l'ordre inférieur λ est égal à l'ordre ρ . On a donc

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\log_2 M(r)}{\log r} = \rho.$$

L'inégalité (8) donne alors, si petit que soit $\varepsilon > 0$, si r est assez grand,

$$M^1(r) > \frac{M(r)}{r} \frac{r^{\rho-\varepsilon}}{\log r} > M(r) r^{\rho-2\varepsilon-1}.$$

En rapprochant ce résultat de l'inégalité (13), on voit que, pour ces fonctions,

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\log M^1(r) - \log M(r)}{\log r} = \rho - 1. \quad (22)$$

On peut observer que, dans ce cas, la fonction $\nu(r)$ est aussi à croissance régulière. Car on a

$$\log M(r) - \log M(1) < \nu(r) \log r,$$

donc, pour r assez grand,

$$\nu(r) > \frac{r^{\rho-\varepsilon}}{\log r} > r^{\rho-2\varepsilon}.$$

En rapprochant du résultat du n° 5, on obtient

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\log \nu(r)}{\log r} = \rho.$$

9. *Fonctions à croissance parfaitement régulière par rapport à un ordre précisé L.*

On dira que la fonction $f(z)$ est à croissance parfaitement régulière par rapport à un ordre précisé $\rho(r)$ lorsque

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\log M(r)}{U(r)} = 1, \quad U(r) = r^{\rho(r)}. \quad (23)$$

Dans ces conditions, on a l'égalité asymptotique

$$\int_0^r \nu(t) \frac{dt}{t} \sim r^{\rho(r)}.$$

Cette égalité peut être dérivée comme si $\rho(r)$ était constant et \sim remplacé par $=$. C'est-à-dire que l'on a

$$\nu(r) \sim \rho r^{\rho(r)}. \quad (24)$$

En effet, en prenant k fini, on a

$$\nu(r) \log k < \int_r^{kr} \nu(t) \frac{dt}{t} = \log M(kr) - \log M(r) < \nu(kr) \log k$$

et le membre intermédiaire est égal à

$$(1 + \eta) r^{\rho(r)} k^\rho - (1 + \eta') r^{\rho(r)},$$

$|\eta|$ et $|\eta'|$ étant moindres que ε arbitrairement petit positif si r est assez grand. Cette différence peut s'écrire

$$(1 + \eta) r^{\rho(r)} (k^\rho - 1) + \eta'' r^{\rho(r)}, \quad |\eta''| < 2\varepsilon.$$

On obtient ainsi

$$\nu(r) < (1 + \eta) r^{\rho(r)} \frac{k^\rho - 1}{\log k} + \frac{\eta''}{\log k} r^{\rho(r)} < \nu(kr).$$

Si $k = 1 + \delta$ et si δ tend vers zéro

$$\frac{k^\rho - 1}{\log k} = \frac{(1 + \delta)^\rho - 1}{\log(1 + \delta)} = \rho + O(1)\delta$$

tend vers ρ . Prenons donc cette valeur $1 + \delta$ pour k , δ étant très petit, puis r tel que $\varepsilon < \delta^2$. Nous aurons

$$\nu(r) < \rho r^{\rho(r)} (1 + o(1)) < \nu(r(1 + o(1))),$$

ce qui démontre (24).

L'inégalité (7) donne alors

$$M^1(r) > M(r) \rho r^{\rho(r)-1} (1 - o(1)) \quad (25)$$

tandis que l'inégalité (12) conduit seulement à

$$M^1(r) < M(r) \rho e r^{\rho(r)-1} (1 + o(1)). \quad (26)$$

On peut tenter d'améliorer ce dernier résultat en remplaçant (9) par une inégalité plus précise. La formule de Cauchy du n° 4 donne en réalité

$$M^1(r) < \frac{1}{2\pi(R-r)} \int_0^{2\pi} M(r + (R-r)\cos\theta) d\theta$$

et l'on a

$$\log M(r + (R-r)\cos\theta) = \log M(r) + \int_r^{r+(R-r)\cos\theta} \frac{\nu(t) dt}{t}.$$

En prenant

$$R - r = \frac{r}{\rho U(r)}$$

et utilisant (24) et les propriétés de $U(r)$, on trouverait que dans (26) on peut remplacer e par

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{\cos\theta} d\theta$$

ce qui est encore insuffisant. En réalité, la méthode basée sur l'étude de $f(z)$ et $f'(z)$ dans le voisinage des points de module maximum (voir *Lectures on the general theory of integral functions*,

chapter IV) montre que

$$M^1(r) \sim M(r) \rho^{r^{\rho(r)}-1}$$

sauf sur une suite de segments exceptionnels dans lesquels la variation totale de $\log r$ est finie. On peut présumer que cette égalité asymptotique vaut sans restrictions.

10. *Le cas des fonctions d'ordre nul.*

La comparaison de $\log M(r)$ à une fonction croissant moins vite que r^ε , si petit que soit ε , conduit à distinguer une infinité de classes de fonctions d'ordre nul si l'on veut obtenir la même approximation que pour les fonctions d'ordre fini d'ordre précisé $\rho(r)$ donné. Mais on pourrait se borner à chercher des fonctions de comparaison, soient $r^{\rho(r)}$, avec $\lim \rho(r) = 0$ qui permettraient de résoudre à un facteur fini près et non plus à un facteur près tendant vers un les égalités asymptotiques

$$\int_0^r \rho(t) \frac{dt}{t} \sim r^{\rho(r)} .$$

On pourra se reporter pour ce sujet à mon article « Sur les directions de Borel des fonctions entières d'ordre nul » (*Bull. sciences math.*, 1935).

Nous nous bornerons à considérer ici la classe des fonctions entières pour lesquelles

$$\overline{\lim}_{r=\infty} \frac{\log_2 M(r)}{\log_2 r} = k , \quad 1 < k < \infty . \quad (27)$$

On peut comparer ici la fonction $\log M(r)$ à $(\log r)^k$, ou en posant $\log r = X$, $\log M(r) = V(X)$, comparer $V(X)$ à X^k . On pourra définir un ordre précisé. Comme la convexité de $V(X)$ n'a pas été utilisée, on peut transposer ce qui a été fait au n° 6. On peut trouver $k(X)$ telle que

$$\overline{\lim}_{X=\infty} k(X) = k , \quad \lim_{X=\infty} k'(X) X \log X = 0 ,$$

$$\overline{\lim}_{X=\infty} \frac{V(X)}{X^{k(X)}} = 1 .$$

On a

$$V(X) = \log M(r) = C + \int_1^x \omega(u) du$$

C étant une constante et $\omega(u) = \nu(t)$ si $u = \log t$. L'intégrale peut s'écrire

$$\int_1^x u \omega(u) \frac{du}{u}$$

et $u\omega(u)$ sera croissante. On aura

$$X \omega(X) < [1 + o(1)] k e X^{k(x)}$$

donc

$$\omega(X) = \nu(r) < [1 + o(1)] k e X^{k(x)-1}.$$

Il existe d'ailleurs une suite de valeurs indéfiniment croissantes de X pour lesquelles

$$\omega(X) > [1 - o(1)] k X^{k(x)-1}.$$

Sil y a croissance parfaitement régulière, donc si

$$V(X) \sim X^{k(x)},$$

on a

$$\omega(X) \sim k X^{k(x)-1}.$$

On déduira de là des inégalités entre $M(r)$ et $M^1(r)$ analogues à celles relatives à l'ordre positif.

NOTES

1) Voir VIJAYARAGHAVAN, T., On derivatives of integral functions. *J. London Math. Soc.*, **10**, pp. 116-117 (1935).

2) Voir BOSE, S. K., On the derivatives of integral functions. *Indian math. Soc.*, **10**, nouvelle série, pp. 77-80 (1946), et VALIRON, G., Sur le théorème de M. Picard. *L'Enseignement mathématique*, **28**, pp. 55-59 (1929).