

Sur l'intégrale $\int_0^h \frac{h^n e^{-hx}}{1-h} dx$

Autor(en): **Vaney, Félix / Paschoud, Maurice**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **L'Enseignement Mathématique**

Band (Jahr): **20 (1918)**

Heft 1: **L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE**

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-18041>

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.

SUR L'INTÉGRALE $n! \int_0^h \frac{h^n e^{-\frac{hx}{1-h}}}{1-h} dh$,

PAR

FÉLIX VANEY et MAURICE PASCHOUD (Lausanne).

I. — Dans un mémoire inséré au *Bulletin de la Société mathématique de France*, LAGUERRE (*Œuvres*, t. I, p. 415) considère l'intégrale

$$\int_0^z z^n e^{-\frac{z^2}{2} + zx} dz$$

et il en déduit les propriétés fondamentales des polynômes $U(x)$ d'HERMITE.

En partant de l'intégrale

$$n! \int_0^h \frac{h^n e^{-\frac{hx}{1-h}}}{1-h} dh,$$

on peut, par un calcul analogue à celui de LAGUERRE, établir les propriétés essentielles des polynômes P_n qu'il a obtenus dans un autre mémoire du même *Bulletin* (*Œuvres*, t. I, p. 434), et qu'il définit (*Œuvres*, t. I, p. 436) par la relation :

$$\frac{e^{\frac{hx}{1-h}}}{1-h} = P_0 + P_1 \frac{h}{1!} + P_2 \frac{h^2}{2!} + \dots + P_n \frac{h^n}{n!} + \dots \quad (1)$$

où P_n a comme expression générale :

$$P_n(x) = n! \left[1 + nx + \frac{n(n-1)}{1^2 \cdot 2^2} x^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{1^2 \cdot 2^2 \cdot 3^2} x^3 + \dots \right]. \quad (2)$$

LAGUERRE indique les propriétés suivantes des polynômes P_n .

$$\int_{-\infty}^0 e^x P_m(x) P_n(x) dx = 0 \text{ pour } m \neq n ,$$

$$\int_{-\infty}^0 e^x P_n^2(x) dx = [n!]^2 ,$$

ainsi que les relations

$$P_{n+1} = (x + 2n + 1) P_n - n^2 P_{n-1} ,$$

$$x P'_n = n P_n - n^2 P_{n-1} ,$$

$$x P''_n + (x + 1) P'_n - n P_n = 0 .$$

On voit de plus que

$$P_n = e^{-x} \frac{d^n}{dx^n} [x^n e^x] .$$

II. — Posons pour abrégier $\frac{e^{-\frac{hx}{1-h}}}{1-h} = T$.

On a

$$\frac{d}{dh} [h^p (1-h)^2 T] = p h^{p-1} T - (x + 2p + 1) h^p T + (p + 1) h^{p+1} T .$$

En multipliant les 2 membres par dh et intégrant de 0 à h , il vient :

$$(p + 1) \int_0^h h^{p+1} T dh = h^p (1-h)^2 T + (x + 2p + 1) \int_0^h h^p T dh - p \int_0^h h^{p-1} T dh .$$

Si l'on pose

$$\frac{I_n}{n!} = \int_0^h h^n T dh ,$$

il vient entre 3 intégrales définies consécutives la formule de récurrence

$$I_{p+1} = p! h^p (1-h)^2 T + (x + 2p + 1) I_p - p^2 I_{p-1} . \quad (3)$$

On voit de suite que

$$I_1 = (1-h)^2 T + (x + 1) I_0 - 1 ,$$

et, en tenant compte de cette dernière relation, (3) donne successivement :

$$\text{pour } p = 1 : I_2 = (h + x + 3)(1 - h)^2 T + (x^2 + 4x + 2)I_0 - (x + 3),$$

$$\text{pour } p = 2 : I_3 = [2h^2 + (x + 5)h + x^2 + 8x + 11](1 - h)^2 T \\ + (x^3 + 9x^2 + 18x + 6)I_0 - (x^2 + 8x + 11).$$

D'une façon générale

$$I_n = [\theta_n(h, x)](1 - h)^2 T + P_n I_0 - V_n(x), \quad (4)$$

où $\theta_n(h, x)$ est un polynôme de degré $(n - 1)$ en h et en x , $P_n(x)$ est un polynôme de degré n en x et $V_n(x)$ un polynôme de degré $(n - 1)$ en x .

On a en outre $V_n(x) = \theta_n(0, x)$.

D'après les calculs précédents :

$$\theta_1(h, x) = 1 ; \quad \theta_2(h, x) = h + x + 3 ;$$

$$\theta_3(h, x) = 2h^2 + (x + 5)h + x^2 + 8x + 11 .$$

$$V_1(x) = 1 ; \quad V_2(x) = x + 3 ; \quad V_3(x) = x^2 + 8x + 11 .$$

$$P_1(x) = x + 1 ; \quad P_2(x) = x^2 + 4x + 2 ; \quad P_3(x) = x^3 + 9x^2 + 18x + 6 .$$

De plus

$$P_0 = 1 .$$

En dérivant chaque membre de l'identité

$$p! \int_0^h h^p e^{-\frac{hx}{1-h}} dh = I_p - \frac{1}{p+1} I_{p+1}$$

par rapport à x , on trouve

$$I_{p+1} = \frac{dI_{p+1}}{dx} - (p + 1) \frac{dI_p}{dx} . \quad (5)$$

Cette relation donne pour $p = 0$

$$I_1 = \frac{dI_1}{dx} - \frac{dI_0}{dx}$$

et, en tenant compte de $I_1 = (1 - h)^2 T + (x + 1)I_0 - 1$, on obtient

$$\frac{dI_0}{dx} = \frac{1}{x} (1 - h) T + I_0 - \frac{1}{x}, \quad (6)$$

expression qui sera utilisée dans la suite.

III. — Il existe des relations de récurrence pour les polynômes θ , V , P . Partons de la relation (3) en y remplaçant I_n par son expression (4), il vient :

$$[\theta_{n+1} \cdot (1-h)^2 T + P_{n+1} I_0 - V_{n+1}] - (x+2n+1) [\theta_n \cdot (1-h)^2 T + P_n I_0 - V_n] + n^2 [\theta_{n-1} (1-h)^2 T + P_{n-1} I_0 - V_{n-1}] = n! h^n (1-h)^2 T ,$$

d'où les relations cherchées

$$\theta_{n+1} - (x+2n+1)\theta_n + n^2\theta_{n-1} = n! h^n , \quad (7)$$

$$V_{n+1} - (x+2n+1)V_n + n^2V_{n-1} = 0 , \quad (8)$$

$$P_{n+1} - (x+2n+1)P_n + n^2P_{n-1} = 0 . \quad (9)$$

La formule (9) montre que les P_n sont bien les polynômes de Laguerre, car $P_1 = x + 1$ et $P_2 = x^2 + 4x + 2$.

La formule (8) se déduit de (7) en y faisant $h = 0$; elle est identique à (9), mais les polynômes V_n sont différents des polynômes P_n , car $V_1 = 1$ et $V_2 = x + 3$.

IV. — Dérivons les deux membres de (4) par rapport à x ; il vient, en remplaçant $\frac{dI_0}{dx}$ par sa valeur (6) et en tenant compte de (5) :

$$(1-h) \left[\theta_{n+1} - \frac{d\theta_{n+1}}{dx} + (n+1) \frac{d\theta_n}{dx} \right] + h [\theta_{n+1} - (n+1)\theta_n] = \frac{P_{n+1} - (n+1)P_n}{x} , \quad (10)$$

$$V_{n+1} = \frac{dV_{n+1}}{dx} - (n+1) \frac{dV_n}{dx} + \frac{P_{n+1} - (n+1)P_n}{x} , \quad (11)$$

$$\frac{dP_{n+1}}{dx} = (n+1) \left(\frac{dP_n}{dx} + P_n \right) . \quad (12)$$

La relation (11) s'obtiendrait de (10) en y faisant $h = 0$. De (12) on déduit le développement suivant de P'_n :

$$P'_n = nP_{n-1} + n(n-1)P_{n-2} + \dots + n! P_0 . \quad (13)$$

De (9) et (12) on tire sans peine la relation indiquée par LAGUERRE

$$xP'_n = nP_n - n^2P_{n-1} \quad (14)$$

et l'équation différentielle

$$xP''_n + (x + 1)P'_n - nP_n = 0. \quad (15)$$

V. — Posons $\theta_n = e^{\frac{x}{1-h}} \cdot H_n$.

En utilisant la relation (14) et en substituant cette valeur de θ_n dans la relation (10), on obtient :

$$(n + 1) \left(H_n + \frac{dH_n}{dx} \right) - \frac{dH_{n+1}}{dx} = \frac{e^{-\frac{x}{1-h}}}{1-h} \frac{P'_{n+1}}{n+1}. \quad (16)$$

La relation de récurrence entre les H_n est

$$H_{n+1} - (x + 2n + 1)H_n + n^2H_{n-1} = n! h^n e^{-\frac{x}{1-h}}. \quad (17)$$

De (16) et (17) on déduit finalement l'équation différentielle :

$$\begin{aligned} x \frac{d^2H_n}{dx^2} + (x + 1) \frac{dH_n}{dx} - nH_n \\ = \frac{e^{-x}}{1-h} T[hP_n - 2(1-h)P'_n - n!h^{n+1}], \end{aligned} \quad (18)$$

qui ne diffère de celle des polynômes de LAGUERRE que par la présence du second membre.

Pour $h = 0$, $H_n(0, x) = e^{-x} V_n$ et (18) donne l'équation différentielle à laquelle satisfont les polynômes V_n

$$x \frac{d^2V_n}{dx^2} + (1 - x) \frac{dV_n}{dx} - (n + 1)V_n = -2P'_n. \quad (19)$$

VI. — La fonction $\frac{e^{-\frac{hx}{1-h}}}{1-h}$, considérée par ABEL¹ (*Œuvres*, t. II, p. 284), donne naissance à des polynômes Q_n si on la développe suivant les puissances croissantes de h

$$\frac{e^{-\frac{hx}{1-h}}}{1-h} = Q_0 + Q_1 \frac{h}{1!} + Q_2 \frac{h^2}{2!} + \dots + Q_n \frac{h^n}{n!} + \dots \quad (20)$$

¹ Voir aussi NIJLAND, *Over een bijzondere soort van geheele functiën*. Utrecht, 1896. (Thèse).

où Q_n a comme expression générale :

$$Q_n(x) = n! \left[1 - nx + \frac{n(n-1)}{1^2 \cdot 2^2} x^2 - \frac{n(n-1)(n-2)}{1^2 \cdot 2^2 \cdot 3^2} x^3 + \dots \right]. \quad (21)$$

ABEL indique en outre les propriétés suivantes de ces polynômes

$$\int_0^\infty e^{-x} Q_n(x) Q_m(x) dx = 0, \quad \text{pour } m \neq n$$

$$\int_0^\infty e^{-x} Q_n^2(x) dx = [n!]^2.$$

En partant de la fonction génératrice, il est facile d'obtenir la relation de récurrence des polynômes Q_n

$$Q_{n+1} - (2n + 1 - x)Q_n + n^2 Q_{n-1} = 0,$$

ainsi que l'équation différentielle

$$xQ_n'' + (1 - x)Q_n' + nQ_n = 0.$$

Q_n s'exprime encore sous forme de dérivée n^{me}

$$Q_n = e^x \frac{d^n}{dx^n} [x^n e^{-x}].$$

VII. — Le développement des Q_n en fonction des P_n peut s'obtenir au moyen de l'équation différentielle :

$$Q_n = (-1)^n \left[P_n - \frac{n^2}{1} 2P_{n-1} + \frac{n^2(n-1)^2}{1 \cdot 2} 2^2 P_{n-2} - \dots \right. \\ \left. (-1)^r \frac{n^2(n-1)^2 \dots (n-r+1)^2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots r} 2^r P_{n-r} - \dots (-1)^n n! 2^n P_0 \right].$$

Comme les polynômes Q_n se déduisent des P_n en y remplaçant x par $-x$ et réciproquement, il est possible d'écrire

$$P_n = (-1)^n \left[Q_n - \frac{n^2}{1!} 2Q_{n-1} + \frac{n^2(n-1)^2}{1 \cdot 2} 2^2 Q_{n-2} - \dots \right. \\ \left. (-1)^r \frac{n^2(n-1)^2 \dots (n-r+1)^2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots r} 2^r Q_{n-r} - \dots (-1)^n n! 2^n Q_0 \right].$$

Ces développements sont, à l'alternance des signes près et aux puissances de 2 près dans les coefficients, analogues à l'expression générale (21) de Q_n ou à celle (2) de P_n .

Remplaçons maintenant dans le développement (20) h par $\frac{1}{h}$ et multiplions chaque membre par e^{-x} on obtient

$$e^{-x} \left[\frac{Q_0}{h} + \frac{Q_1}{1!} \frac{1}{h^2} + \frac{Q_2}{2!} \frac{1}{h^3} + \dots + \frac{Q_{n-1}}{(n-1)!} \frac{1}{h^n} + \frac{Q_n}{n!} \frac{1}{h^{n+1}} + \dots \right] = \frac{e^{-\frac{hx}{1-h}}}{1-h} \quad (22)$$

Ce second membre représente le développement suivant les puissances décroissantes de h de la fonction génératrice des polynômes de LAGUERRE.

De la même manière, on tire de (1) le développement suivant les puissances décroissantes de h de la fonction $\frac{e^{-\frac{hx}{1-h}}}{1-h}$.

$$e^x \left[\frac{P_0}{h} + \frac{P_1}{1!} \frac{1}{h^2} + \frac{P_2}{2!} \frac{1}{h^2} + \dots + \frac{P_{n-1}}{(n-1)!} \frac{1}{h^n} + \frac{P_n}{n!} \frac{1}{h^{n+1}} + \dots \right] = \frac{e^{-\frac{hx}{1-h}}}{1-h}$$

Multiplions chaque membre de cette dernière relation par $n! h^n dh$ et intégrons de 0 à h , il vient :

$$-I_n = - \int_0^h \frac{n! h^n}{1-h} e^{-\frac{hx}{1-h}} dh = n! e^x \left[\frac{P_0}{n} \frac{h^n}{1!} + \frac{P_1}{n-1} \frac{h^{n-1}}{2!} + \frac{P_2}{n-2} \frac{h^{n-2}}{3!} + \frac{P_3}{n-3} \frac{h^{n-3}}{4!} + \dots + \frac{P_{n-1}}{1} \frac{h}{(n-1)!} + \dots \right] \quad (23)$$

VIII. — En utilisant une méthode indiquée par Hermite à propos de l'intégrale $\int_0^h \frac{h^n dh}{\sqrt{1-2hx+h^2}}$ (*Œuvres*, t. IV, p. 169), on voit que les polynômes θ_n et V_n peuvent s'exprimer au moyen des P_n et des Q_n .

Si l'on écrit (4) de la manière suivante :

$$\frac{e^{\frac{hx}{1-h}}}{1-h} I_n = \theta_n(h, x) + \frac{e^{\frac{hx}{1-h}}}{1-h} P_n I_0 - \frac{e^{\frac{hx}{1-h}}}{1-h} V_n$$

on remarque que $\theta_n(h, x)$ forme la partie entière du produit

$$\frac{e^{\frac{hx}{1-h}}}{1-h} \int_0^h \frac{n! h^n}{1-h} e^{-\frac{hx}{1-h}} dh .$$

développé suivant les puissances décroissantes de h .

Si l'on remplace les deux facteurs par leur développement respectif (22) et (23) et si l'on multiplie membre à membre, on obtient le développement de $\theta_n(h, x)$ suivant les puissances décroissantes de h

$$\begin{aligned} \theta_n(h, x) = n! & \left[\frac{P_0 Q_0}{n} h^{n-1} + \left(\frac{P_0 Q_1}{n} + \frac{P_1 Q_0}{n-1} \right) h^{n-2} \right. \\ & + \left(\frac{P_0 Q_2}{n \cdot 2!} + \frac{P_1 Q_1}{(n-1) \cdot 1! \cdot 1!} + \frac{P_2 Q_0}{(n-2) \cdot 2! \cdot 1} \right) h^{n-3} \\ & + \left(\frac{P_0 Q_3}{n \cdot 3!} + \frac{P_1 Q_2}{(n-1) \cdot 1! \cdot 2!} + \frac{P_2 Q_1}{(n-2) \cdot 2! \cdot 1!} + \frac{P_3 Q_0}{(n-3) \cdot 3!} \right) h^{n-4} + \dots \\ & + \left(\frac{P_0 Q_i}{n \cdot i!} + \frac{P_1 Q_{i-1}}{(n-1) \cdot 1! \cdot (i-1)!} \right. \\ & \left. + \frac{P_2 Q_{i-2}}{(n-2) \cdot 2! \cdot (i-2)!} + \dots + \frac{P_i Q_0}{(n-i) \cdot i!} \right) h^{n-i-1} + \dots \left. \right] . \end{aligned} \tag{24}$$

Le développement de V_n est formé de tous les termes ne contenant pas h

$$\begin{aligned} V_n = P_0 Q_{n-1} + \frac{n}{1!} P_1 Q_{n-2} + \frac{n(n-1)}{2!} P_2 Q_{n-3} \\ + \dots + \frac{n(n-1)}{1!} P_{n-2} Q_1 + \frac{n}{1} P_{n-1} Q_0 . \end{aligned} \tag{25}$$

Un autre développement de V_n , ayant la forme :

$$V_n = a_1 P_{n-1} + \dots + a_r P_{n-r} + \dots + a_n P_0 ,$$

s'obtient au moyen de l'équation différentielle (19) et du développement (13)

$$\begin{aligned} V_n = P_{n-1} + 2(n-1) P_{n-2} + (n-2)(3n-4) P_{n-3} \\ + 2^2(n-2)^2(n-3) P_{n-4} + (n-3)(n-4)(5n^2 - 25n + 32) P_{n-5} + \dots \end{aligned}$$

chaque coefficient s'obtenant au moyen du précédent par la formule de récurrence

$$a_r = \frac{2}{2n - r + 1} \left[(n - r + 1)^2 a_{r-1} + \frac{n!}{(n - r)!} \right].$$

IX. — En prenant $h = 1$, comme limite supérieure dans l'intégrale I_n et son expression (4), il vient :

$$\int_0^1 \frac{n! h^n}{1 - h} e^{-\frac{hx}{1-h}} dh = -V_n + P_n \int_0^1 \frac{e^{-\frac{hx}{1-h}}}{1 - h} dh,$$

ou encore

$$\int_0^1 \frac{n! h^n}{1 - h} e^{-\frac{x}{1-h}} dh = -e^{-x} V_n + P_n \int_0^1 \frac{e^{-\frac{x}{1-h}}}{1 - h} dh.$$

Posons $z = \frac{x}{1 - h}$; on a, après substitution,

$$\int_x^\infty n! (z - x)^n \frac{e^{-z}}{z^{n+1}} dz = -e^{-x} V_n + P_n \int_0^\infty \frac{e^{-z}}{z} dz. \quad (26)$$

Le premier membre peut se mettre sous forme d'intégrale multiple d'ordre n de la fonction $\frac{e^{-x}}{x^{n+1}}$; ces intégrales multiples donnent donc naissance aux polynômes P_n .

La formule (26) est celle obtenue par LAGUERRE (*Œuvres*, t. I, p. 432), qui en déduit que P_n est le dénominateur de la réduite d'ordre n du développement en fraction continue de la fonction $e^x \int_x^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx$, le polynôme V_n étant le numérateur de cette réduite.

Enfin on remarque que l'intégrale I_n se transforme par le changement de x en $-x$, en une nouvelle intégrale J_n qui donne naissance aux polynômes Q_n d'ABEL

$$J_n = \int_0^h \frac{n! h^n}{1 - h} e^{\frac{hx}{1-h}} dh = [\Omega_n(h, x)] (1 - h)^2 \frac{e^{\frac{hx}{1-h}}}{1 - h} + Q_n J_0 - W_n(x),$$

où

$$\Omega_n(h, x) = \theta_n(h, -x),$$

$$Q_n(x) = P_n(-x),$$

$$W_n(x) = V_n(-x).$$