

BULLETIN DE LA S. M. F.

EDM. MAILLET

Sur la décomposition d'un entier en une somme de puissances huitièmes d'entiers (Problème de Waring)

Bulletin de la S. M. F., tome 36 (1908), p. 69-77.

http://www.numdam.org/item?id=BSMF_1908__36__69_0

© Bulletin de la S. M. F., 1908, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Bulletin de la S. M. F. » (<http://smf.emath.fr/Publications/Bulletin/Presentation.html>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/legal.php>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

SUR LA DÉCOMPOSITION D'UN ENTIER EN UNE SOMME
DE PUISSANCES HUITIÈMES D'ENTRIERS

(Problème de Waring);

PAR M. EDMOND MAILLET.

I.

On peut se demander, avec Waring, si tout nombre entier N n'est pas, quel que soit N , la somme d'un nombre k , limité et indépendant de N , de puissances $n^{\text{ièmes}}$ d'entiers positifs. C'est là *une des énigmes historiques de l'Arithmétique*, qu'on peut appeler *problème de Waring*, et qui n'a encore reçu sa solution que pour les petites valeurs de n . On sait que la réponse est affirmative pour $n=2$ ($k \leq 4$, Fermat, Euler, Lagrange), $n=4$ (J. Liouville), $n=3$ et 5 (E. Maillet), et, comme vient de le montrer ⁽¹⁾ M. Albert Fleck, pour $n=6$. Le joli résultat de M. Fleck m'a donné l'idée d'étendre sa méthode, d'une manière convenable, au cas de $n=8$. Les calculs sont assez compliqués, mais enfin ils me permettent d'établir, grâce à des lemmes de Cauchy et de J. Liouville, l'exactitude de l'hypothèse de Waring pour $n=8$.

En terminant, je démontre que $k \geq n+1$ pour une infinité de valeurs de N : si cette hypothèse est vraie pour une infinité de valeurs de n , k croît indéfiniment avec n .

II.

Soient n quantités x_1, x_2, \dots, x_n , et la somme

$$(1) \quad 2^{p-1} A_{p-1} = \sum_n (x_1 \pm x_2 \pm x_3 \pm \dots \pm x_p)^p \quad (p \leq n),$$

obtenue en prenant dans les parenthèses toutes les combinaisons p à p de ces n quantités et additionnant dans chaque combinaison

⁽¹⁾ *Math. Ann.*, t. LXIV, 1907, p. 561 (où l'on trouve aussi l'historique de la question). J'ai donné un résumé de ma présente Note dans les *Comptes rendus*, 30 décembre 1907.

les p lettres dont $p - 1$ ont été affectées des signes $+$ ou $-$ de toutes les manières possibles. Le nombre des termes obtenus dans le second membre de (1) est ainsi $2^{p-1} C_n^p$.

Je développe le second membre de (1). On a, en posant (1)

$$(2) \quad \begin{cases} A_0 = \sum x_1^2, & L = \sum x_1 x_2^2, & M = \sum x_1 x_2^2, \\ P = \sum x_1 x_2 x_3^2, & Q = \sum x_1 x_2 x_3 x_4^2, \end{cases}$$

$$(3) \quad A_{p-1} = C_{n-1}^{p-1} A_0 + C_{n-2}^{p-2} (\lambda L + \mu M) + C_{n-3}^{p-3} \varpi P + C_{n-4}^{p-4} \chi Q,$$

avec

$$(4) \quad \begin{cases} \lambda = \frac{8 \cdot 7}{2}, & \mu = \frac{8 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 5}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} = \frac{5}{2} \lambda, & \varpi = \frac{8 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 5}{4}, & \chi = \frac{(8!)}{16}, \\ C_j^0 = 1, & C_j^k = 0 \text{ pour } k > 0. \end{cases}$$

(1) La méthode que je suis ici est une extension de la méthode de M. Fleck pour l'exposant 6, laquelle est d'ailleurs elle-même, si l'on veut, une modification et une généralisation des méthodes de Liouville et E. Lucas pour $n = 4$. Si

$$2^{q-1} A'_{q-1} = \sum_n (x_1 \pm x_2 \pm \dots \pm x_q)^q, \quad G' = \left(\sum_n x_i^2 \right)^2 \quad (n \geq q),$$

on a

$$G' = \frac{1}{3} \frac{A'_{q-1}}{C_{n-2}^{q-2}} + A'_0 \left(1 - \frac{1}{3} \frac{n-1}{q-1} \right).$$

Fixant, par exemple, $n \geq 4$ et q de façon que $\left(1 - \frac{1}{3} \frac{n-1}{q-1} \right)$ soit nul ou positif, on en déduit des décompositions variées d'un carré quelconque $G' = f^2$ sous la forme $f^2 = \frac{\sigma}{\varphi}$, où σ est une somme de bicarrés, φ un entier numérique; tout entier N étant une somme de 4 carrés f^2 , on déduit de là une décomposition de φN en une somme de bicarrés, par suite aussi de

$$\varphi N + i \quad (i = 0, 1, 2, \dots, \varphi - 1),$$

c'est-à-dire de tout entier, puisque l'unité est un bicarré. En particulier, pour $n = 4$ et $q = 2$,

$$G' = f^2 = \frac{2A'_1}{6},$$

et l'on retrouve une identité connue (E. LUCAS, *Nouv. Ann.*, 2^e série, t. XVII, 1878, p. 536; FLECK, *Sitzungsberichte der Berl. math. Gesellschaft*, 28 juin 1905, 2 janvier 1906).

D'autre part, quand $n \geq 4$,

$$(5) \quad \begin{cases} G = \left(\sum_n x_i^2 \right)^4 = A_0 + 4L + 6M + 12P + 24Q, \\ H = \left(\sum_n x_i^2 \right)^2 = A_0 + 2M, \end{cases}$$

$$(6) \quad G + 2H = 3A_0 + \frac{4}{\lambda}(\lambda L + \mu M) + 12P + 24Q.$$

Le rapprochement des expressions (3) et (6) montre qu'on peut essayer de mettre $G + 2H$ sous la forme

$$(7) \quad G + 2H = \frac{1}{\lambda\alpha} (\beta_0 A_0 + \beta_1 A_1 + \dots + \beta_q A_q)$$

(α entier, $q \leq n - 1$), où $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_q$ sont des nombres *rationnels et positifs* qui ne dépendent que de n et q . Il suffira

$$(8) \quad \begin{cases} 3\lambda\alpha = \sum_0^q \beta_r C_{n-1}^r, \\ 4\alpha = \sum_1^q \beta_r C_{n-2}^{r-1}, \\ 12\lambda\alpha = \varpi \sum_2^q \beta_r C_{n-3}^{r-2}, \\ 24\lambda\alpha = \chi \sum_3^q \beta_r C_{n-4}^{r-3}; \end{cases}$$

on posera

$$\alpha = (n-1)(n-2)\dots(n-q),$$

$$\beta_r = \gamma_r (n-r-1)(n-r-2)\dots(n-q) \cdot (r!), \quad \beta_q = \gamma_q \cdot (q!),$$

et les conditions (8) deviennent

$$(9) \quad \begin{cases} a_0 = 3\lambda = \sum_0^q \gamma_r, & a_1 = 4(n-1) = \sum_1^q \gamma_r r, \\ a_2 = 12 \frac{\lambda}{\varpi} (n-1)(n-2) = \sum_2^q \gamma_r r(r-1), \\ a_3 = 24 \frac{\lambda}{\chi} (n-1)(n-2)(n-3) = \sum_3^q \gamma_r r(r-1)(r-2), \end{cases}$$

ou encore

$$\begin{aligned} \gamma_0 + \gamma_1 + \dots + \gamma_q &= 3 \cdot 28 = a_0, \\ \gamma_1 + 2\gamma_2 + 3\gamma_3 + \dots + q\gamma_q &= 4(n-1) = a_1, \\ 2\gamma_2 + 3 \cdot 2\gamma_3 + \dots + q(q-1)\gamma_q &= \frac{4}{5}(n-1)(n-2) = a_2, \\ 3 \cdot 2 \cdot 1\gamma_3 + \dots + q(q-1)(q-2)\gamma_q & \\ &= \frac{4}{15}(n-1)(n-2)(n-3) = a_3; \end{aligned}$$

on en tire, si

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= 0, & R_r &= (r-1)(r-2)(r-3)(r-4), \\ 6\gamma_1 &= (24a_0 - 18a_1 + 6a_2 - a_3) + \sum_5^q \frac{\gamma_r R_r}{r-1} = \Gamma_1 + \delta_1, \\ 2\gamma_2 &= (-12a_0 + 12a_1 - 5a_2 + a_3) - \sum_5^q \frac{\gamma_r R_r}{r-2} = \Gamma_2 + \delta_2, \\ 2\gamma_3 &= (8a_0 - 8a_1 + 4a_2 - a_3) + \sum_5^q \frac{\gamma_r R_r}{r-3} = \Gamma_3 + \delta_3, \\ 6\gamma_4 &= (-6a_0 + 6a_1 - 3a_2 + a_3) - \sum_5^q \frac{\gamma_r R_r}{r-4} = \Gamma_4 + \delta_4, \end{aligned}$$

où

$$\delta_i = (-1)^{i-1} \sum_5^q \frac{\gamma_r R_r}{r-i}.$$

Il suffit de disposer de n , q et des $\gamma_5, \dots, \gamma_q$ pris positifs et rationnels pour que $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ soient positifs.

Si l'on prend $n = 51$,

$$\Gamma_1 = -21184, \quad \Gamma_2 = 22952, \quad \Gamma_3 = -24448, \quad \Gamma_4 = 26176.$$

On peut chercher à rendre positives les expressions

$$\begin{aligned} \Gamma_1 + \frac{\omega_1}{r_1-1} + \frac{\omega_2}{r_2-1}, & \quad \Gamma_2 - \frac{\omega_1}{r_1-2} - \frac{\omega_2}{r_2-2}, \\ \Gamma_3 + \frac{\omega_1}{r_1-3} + \frac{\omega_2}{r_2-3}, & \quad \Gamma_4 - \frac{\omega_1}{r_1-4} - \frac{\omega_2}{r_2-4}, \end{aligned}$$

pour des valeurs positives rationnelles de ω_1 et ω_2 , avec r_1 et r_2

différents et > 4 . On y réussit en prenant ⁽¹⁾ $r_1 = 18, r_2 = 50$, $\omega_1 = \gamma_{18} R_{18} = 17.21184$, $\omega_2 = \gamma_{50} R_{50} = 47.440$, tous les autres γ_r , avec $r > 4$, étant nuls. D'après (7), (8) et (9), avec ces valeurs numériques on obtient, q étant égal à 50,

$$(10) \quad G + 2H = \frac{1}{\varepsilon} (\varepsilon_1 A_1 + \varepsilon_2 A_2 + \varepsilon_3 A_3 + \varepsilon_4 A_4 + \varepsilon_{18} A_{18} + \varepsilon_{50} A_{50}),$$

où les $\varepsilon, \varepsilon_i$ ont des valeurs numériques fixes indépendantes des x_i et sont entiers positifs. On trouve ainsi, tous calculs faits,

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 \varepsilon^{-1} &= \frac{47 \cdot 220}{3 \cdot 28 \cdot 50 \cdot 49}, & \varepsilon_2 \varepsilon^{-1} &= \frac{79}{6 \cdot 28 \cdot 50 \cdot 49}, \\ \varepsilon_3 \varepsilon^{-1} &= \frac{8}{5 \cdot 28 \cdot 50 \cdot 49 \cdot 48}, & \varepsilon_4 \varepsilon^{-1} &= \frac{16 \cdot 121}{7 \cdot 23 \cdot 28 \cdot 50 \cdot 49 \cdot 48 \cdot 47}, \\ \varepsilon_{18} \varepsilon^{-1} &= \frac{331 \cdot 64 \cdot 18 \cdot 17 \cdot (13!)}{28 \cdot (50 \cdot 49 \dots 33)}, & \varepsilon_{50} \varepsilon^{-1} &= \frac{440}{49 \cdot 48 \cdot 46 \cdot 28}. \end{aligned}$$

L'exactitude de l'identité (10) peut d'ailleurs se vérifier directement à l'aide des relations (3) à (6).

III.

D'autre part, on sait, d'après un lemme de Cauchy ⁽²⁾, rapproché d'un autre lemme de Liouville ⁽³⁾, qu'on peut trouver, l et k étant des nombres impairs positifs donnés quelconques et tels que

$$(11) \quad \sqrt{3k-2} - 1 < l < \sqrt{4k},$$

θ entiers positifs x_i satisfaisant à

$$6l = \sum_1^{\theta} x_i^2, \quad 6k = \sum_1^{\theta} x_i^4,$$

(1) On réussirait également en prenant $r_1 = 18$ et r_2 égal à 39, 40, ... ou 49. On en déduit une série de formules analogues à (10), et de décompositions d'un nombre entier en une somme de puissances huitièmes d'entiers positifs.

(2) *Exercices de Mathématiques*, t. I, p. 273, Paris, de Bure, 1826; ou LE-GENDRE, *Théorie des nombres*, 3^e édition, t. II, p. 338.

(3) LE BESGUE, *Exercices d'Analyse numérique*, Paris, Leiber et Faraguet, 1859, p. 113; E. MAILLET, *Bull. Soc. math.*, 1895, p. 46.

où θ peut être pris ≤ 48 , mais aussi plus grand, *a fortiori*, à condition d'envisager au besoin quelques valeurs nulles des x_i . On pourra poser, par exemple,

$$l = 3m, \quad k = 3m^2, \quad 3k = l^2 = 3^2m^2,$$

où m est un nombre impair absolument quelconque ⁽¹⁾. On aura, en prenant $n = 51$ dans (5), avec ces valeurs de G et H ,

$$G = 6^4 l^4 = 6^4 \cdot 3^4 m^4, \quad H = 6^2 k^2 = 4 \cdot 3^4 m^4, \\ G + 2H = 3^4 \cdot 2^3 (1 + 2 \cdot 3^4) m^4.$$

Plus généralement, si $x'_i = 2^t x_i$,

$$2^{2t} \cdot 6l = \sum_1^{\theta} x_i'^2, \quad 2^{4t} \cdot 6k = \sum_1^{\theta} x_i'^4,$$

et, avec ces valeurs de G et H ,

$$G = 6^4 \cdot 3^4 \cdot (2^{2t} m)^4, \quad H = 2^2 \cdot 3^4 \cdot (2^{2t} m)^4, \\ G + 2H = 3^4 \cdot 2^3 (1 + 2 \cdot 3^4) (2^{2t} m)^4,$$

ou

$$G + 2H = 3^4 \cdot 2^7 (1 + 2 \cdot 3^4) (2^{2t-1} m)^4.$$

Tout nombre entier N étant d'une des formes $m, 2^{2t}m, 2^{2t-1}m$, il en résulte que toute puissance quatrième d'un entier est de la forme

$$\frac{G + 2H}{\varphi},$$

où φ est un entier numérique indépendant de N et qui divise

$$3^4 \cdot 2^7 (1 + 2 \cdot 3^4) = \psi.$$

Or, on sait ⁽²⁾ que tout entier E est la somme d'un nombre limité de bicarrés. Donc ψE peut se mettre sous la forme d'une somme d'un nombre limité de quantités $G + 2H$ et, d'après (1) et (10), $2^{50} \epsilon \psi E$ est une somme de quantités $2A_1, 2^2A_2, \dots$, c'est-à-dire une somme de puissances huitièmes d'entiers dont le nombre est

(1) (11) a alors lieu *quel que soit le nombre impair m*.

(2) Voir LE BESGUE, *Exercices d'Analyse numérique*, p. 113, et, pour l'histoire, A FLECK, *loc. cit.*, E. LANDAU, *Rendiconti del Circolo mat. di Palermo*, t. XXXIII, 1907 (9 décembre 1906).

limité numériquement et indépendamment de E. L'unité étant une puissance huitième d'entier positif, il en est de même de

$$2^{50\varepsilon\psi}E + i, \text{ avec } i = 1, 2, \dots,$$

ou

$$2^{50\varepsilon\psi} - 1,$$

c'est-à-dire que :

Tout nombre entier positif N est la somme arithmétique d'un nombre limité indépendamment de N de puissances huitièmes de nombres entiers. C. Q. F. D.

IV.

En admettant que pour une infinité de valeurs de n l'hypothèse de Waring soit exacte et que tout nombre N supérieur à ν soit la somme d'au plus k puissances $n^{\text{ièmes}}$ d'entiers positifs, on peut montrer que k croît indéfiniment avec n pour une infinité de valeurs de N .

Soit

$$(12) \quad N \geq x_1^n + x_2^n + \dots + x_k^n;$$

on a évidemment

$$x_i^n \leq N, \quad x_i \leq E\left(N^{\frac{1}{n}}\right) = N_1.$$

Or, le nombre des nombres qu'on peut former en additionnant k des nombres $0, 1^n, 2^n, \dots, N_1^n$ est au plus égal au nombre $D_{N_1}^k$ des combinaisons avec répétitions de ces $N_1 + 1$ nombres k à k , c'est-à-dire à

$$\frac{(N_1 + 1)(N_1 + 2) \dots (N_1 + k)}{k!} \leq \frac{(N_1 + k)^k}{k!}.$$

Pour qu'on puisse former tout nombre $\leq N$ et $> \nu$ à l'aide du second membre de (12) il faudra

$$\frac{(N_1 + k)^k}{k!} \geq N - \nu.$$

Ceci sera impossible si

$$\frac{(N_1 + k)^k}{k!} < N - \nu,$$

ou, *a fortiori*, si N étant assez grand,

$$v + \frac{(N_1 + k)^k}{k!} < v + \frac{\left(\frac{1}{N^{\frac{1}{v}}} + k\right)^k}{k!} < \left(\frac{1}{N^{\frac{1}{v}}}\right)^n.$$

Posant $N^{\frac{1}{v}} = m$, il suffit, pour m assez grand,

$$m^n - v - \frac{(m + k)^k}{k!} > 0,$$

ce qui a lieu évidemment quand $2 \leq k \leq n$. Donc, si l'hypothèse de Waring est exacte pour une valeur de n , il faut $k \geq n + 1$, c'est-à-dire que k croît indéfiniment avec n , si cette hypothèse est vraie pour une infinité de valeurs de n . C. Q. F. D.

Remarque. — Quand $N = 2^n - 1, 2 \cdot 2^n - 1, \dots, r \cdot 2^n - 1 < 3^n$ et $N = x_1^n + x_2^n + \dots + x_k^n$, il faut évidemment $k \geq 2^n - 1$. Mais cette remarque ne prouve rien pour les grandes valeurs de N , n étant donné.

V.

En terminant, je ne crois pas inutile de rappeler ici les récents résultats relatifs au problème de Waring : a-t-on

$$N = x_1^n + x_2^n + \dots + x_k^n,$$

quel que soit n ? Pour $n = 3$, j'avais trouvé antérieurement qu'il suffit $k \leq 17$: M. Fleck (1) a établi, par une remarque additionnelle très simple à ma démonstration, qu'il suffit $k \leq 13$. Pour $n = 4$, M. Fleck (2) a montré qu'il suffit $k \leq 39$, et M. E. Landau (3) est arrivé à $k \leq 38$. Enfin, pour $n = 6$, M. Fleck obtient $k \leq 2451$: il s'appuie sur l'identité

$$\begin{aligned} 60n^3 &= 60(x_1^3 + x_2^3 + x_3^3 + x_4^3)^3 \\ &= \sum_{\pm} (x_1 \pm x_2 \pm x_3)^6 + 2 \sum_{\pm} (x_1 \pm x_2)^6 + 36 \sum_{\pm} x_1^6. \end{aligned}$$

(1) *Sitzungsberichte der Berl. math. Gesellschaft, loc. cit.*

(2) *Id.*

(3) *Loc. cit.*

A ce propos, il ne sera pas sans intérêt de remarquer qu'on a en même temps

$$\begin{aligned} 60n &= 60(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2) \\ &= \sum_4 (x_1 \pm x_2 \pm x_3)^2 + 2 \sum_1 (x_1 \pm x_2)^2 + 36 \sum_4 x_1^2. \end{aligned}$$

Il est donc toujours possible, E étant un entier quelconque, de satisfaire à la fois aux deux équations en nombres entiers

$$60E^3 = \sum_1^p y_i^6, \quad 60E = \sum_1^p y_i^2, \quad \text{où } p \geq 184.$$
