

BULLETIN DE LA S. M. F.

P. LE LIDEC

Nouvelle forme des congruences de Kummer-Mirimanoff pour le premier cas du théorème de Fermat

Bulletin de la S. M. F., tome 97 (1969), p. 321-328

http://www.numdam.org/item?id=BSMF_1969__97__321_0

© Bulletin de la S. M. F., 1969, 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/conditions>). 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/>

NOUVELLE FORME DES CONGRUENCES
DE KUMMER-MIRIMANOFF
POUR LE PREMIER CAS DU THÉORÈME DE FERMAT

PAR

PAUL LE LIDEC (*).

1. — Soient p un nombre premier impair, et (a, b, c) une solution de l'équation de Fermat

$$(F) \quad x^p + y^p + z^p = 0$$

telle que $abc \not\equiv 0 \pmod{p}$. MIRIMANOFF a déduit des congruences de Kummer les congruences suivantes :

$$(M) \quad f_i(t) f_{p-i}(t) \equiv 0 \pmod{p},$$
$$i = 3, 5, \dots, (p-2) \quad (1), \quad t \equiv -\frac{b}{a} \pmod{p},$$

auxquelles il faut ajouter la congruence

$$f_{p-1}(t) \equiv 0 \pmod{p}$$

qui n'est autre que le développement de $\frac{(t+1)^p - t^p - 1}{p} \equiv 0 \pmod{p}$.

Le développement de $f_i(x)$ est le suivant :

$$f_i(x) = x^{p-1} + 2^{i-1} x^{p-2} + 3^{i-1} x^{p-3} + \dots + (p-2)^{i-1} x^2 + (p-1)^{i-1},$$

c'est-à-dire

$$f_i(x) = \sum_{s=1}^{p-1} s^{i-1} x^{p-s}.$$

(*) *Thèse Univ.*, Fac. Sc. Paris, 1967, 2^e partie (la première était un aperçu historique).

(1) Si l'on prend tous les $i = 2, 3, 4, \dots, (p-2)$, on obtient les mêmes congruences, chacune répétée 2 fois, car $f_{p-i}(x) f_{p-(p-i)}(x) = f_i(x) f_{p-i}(x)$.

Le présent mémoire a pour but de déduire des congruences (M) d'autres congruences équivalentes de forme remarquable et qui semblent permettre l'application de méthodes combinatoires susceptibles d'aboutir à la démonstration du premier cas du théorème de Fermat.

Les calculs qui suivent sont des calculs de polynômes dans le corps Ω_p de p éléments. Sauf au moment de la conclusion, nous n'écrirons aucune congruence (mod p), les polynômes considérés étant supposés appartenir à $\Omega_p(x)$. Pour les besoins de la cause, nous munirons Ω_p de certaines autres structures, et adopterons provisoirement certains abus d'écriture.

1° Ω_p sera considéré de la manière habituelle comme un Z -module, où Z est l'anneau des entiers rationnels.

2° Quand nous exprimerons un entier rationnel n , ce signe, par abus d'écriture, signifiera le produit

$$n \cdot 1 = 1 + 1 + \dots + 1 \text{ (} n \text{ fois) par } n \text{ de l'unité } 1 \text{ de } \Omega_p$$

alors que, dans de rares cas où nous en aurons besoin, l'entier rationnel sera noté n^* .

3° Ω_p étant considéré comme l'anneau quotient $\frac{Z}{(p)}$ de Z par son idéal (p) , n désignera également la classe (mod p) de l'entier qu'il note normalement, ce second abus d'écriture n'entrant pas en conflit avec le premier.

4° Ω_p sera considéré comme totalement ordonné par l'ordre des plus petits restes non négatifs de ses éléments, considérés comme classes (mod p) dans l'anneau Z .

2. — On a visiblement la formule de récurrence

$$f_{i+1}(x) = -x f'_i(x),$$

où $f'(x)$ désigne la dérivée de $f(x)$.

D'autre part, si $1 \leq i < p$,

$$f_i(1) = \sum_{s=1}^{p-1} s^{i-1} = \sum_{s \in \Omega_p} s^{i-1} = 0,$$

tandis que

$$f_p(1) = \sum_{s=1}^{p-1} s^{p-1} = p - 1 \neq 0.$$

Par suite, si $2 \leq i \leq p-1$ et si $f_{i+1}(x)$ est d'ordre J par rapport à $(x-1)$ dans $\Omega_p(x)$, $f_i(x)$ est d'ordre $j+1$. Il en résulte que l'ordre de $f_i(x)$ en $(x-1)$ dans $\Omega_p(x)$ est $p-i$.

Posons

$$g_i(x) = \frac{f_i(x)}{(x-1)^{p-i}}.$$

3. — Calculons d'abord $g_{p-1}(x)$ et, pour simplifier l'écriture, notons \bar{q} l'inverse dans Ω d'un $q \in \Omega$ non nul. On a

$$g_{p-1}(x) = A_1^{(p-2)} x^{p-2} + A_2^{(p-2)} x^{p-3} + \dots + A_{p-2}^{(p-2)} x,$$

avec

$$\begin{aligned} A_1^{(p-2)} &= \bar{1}, \\ A_2^{(p-2)} &= \bar{2} + \bar{1}, \\ &\dots\dots\dots, \\ A_q^{(p-2)} &= \bar{q} + (\overline{q+1}) + \dots + \bar{1}. \end{aligned}$$

On a donc

$$g_{p-1}(x) = x^{p-2} + (\bar{2} + \bar{1})x^{p-3} + (\bar{3} + \bar{2} + \bar{1})x^{p-4} + \dots + [(\overline{p-2}) + (\overline{p-3}) + \dots + \bar{1}]x,$$

d'où

$$g_{p-1}(x) = \sum_{s=1}^{p-2} \left(\sum_{q=1}^s \bar{q} \right) x^{p-1-s}.$$

4. — Calculons maintenant, pour $i = 2, 3, \dots, (p-2)$, l'expression

$$g_i(x) g_{p-i}(x) = \frac{f_i(x)}{(x-1)^{p-i}} \frac{f_{p-i}(x)}{(x-1)^i} = \frac{f_i(x) f_{p-i}(x)}{(x-1)^p} = \frac{f_i(x) f_{p-i}(x)}{x^p - 1}$$

On a $q^{(p-i)-1} = q^{p-1} q^{-i} = \bar{q}^i$,

$$(x^p - 1) g_i(x) g_{p-i}(x) = f_i(x) f_{p-i}(x) = \left(\sum_{q=1}^{p-1} q^{i-1} x^{p-q} \right) \left(\sum_{q'=1}^{p-1} \bar{q}'^i x^{p-q'} \right)$$

ou encore

$$\sum_{s=2}^{2p-2} \left(\sum_{q+q'=s} q^{i-1} \bar{q}'^i \right) x^{2p-s},$$

ce qui donne

$$g_i(x) g_{p-i}(x) = \sum_{s=2}^{p-2} \left(\sum_{q=1}^{s-1} \bar{q}^i (s-q)^{i-1} \right) x^{p-s}.$$

Ce produit est explicité comme suit.

Par exemple, si $s = p - 3$, le coefficient du terme en $x^{p-(p-3)} = x^3$ est

$$\sum_{q=1}^{p-4} \bar{q}^i (p-3-q)^{i-1}.$$

n étant un entier quelconque tel que $1 \leq n \leq p-2$, posons

$$Q_n(x) = \sum_{s=2}^{p-2} u_s x^{p-s} = \sum_{i=2}^{p-2} n^i g_i(x) g_{p-i}(x),$$

u_s a donc pour valeur

$$\sum_{i=2}^{p-2} n^i \sum_{q=1}^{s-1} \bar{q}^i (s-q)^{i-1} = \sum_{q=1}^{s-1} \left(\sum_{i=2}^{p-2} n^i \bar{q}^i (s-q)^{i-1} \right) = \sum_{q=1}^{s-1} r_{s,q},$$

avec

$$r_{s,q} = \frac{1}{s-q} \left[\frac{[n\bar{q}(s-q)]^{p-1} - 1}{n\bar{q}(s-q) - 1} - n\bar{q}(s-q) - 1 \right].$$

Or, $n\bar{q}(s-q)^{p-1} - 1 = 0$, donc :

$$\text{si } n\bar{q}(s-q) \neq 1, \quad r_{s,q} = \frac{-1}{s-q} [n\bar{q}(s-q) + 1] = -[(\overline{s-q}) + n\bar{q}];$$

$$\begin{aligned} \text{si } n\bar{q}(1-q) = 1, \quad r_{s,q} &= (p-3) \frac{1}{s-q} = -\frac{3}{s-q} \\ &= -[(\overline{s-q}) + n\bar{q} + n\bar{q}]. \end{aligned}$$

Posons

$$u'_s = -\sum_{q=1}^{s-1} [(\overline{s-q}) + n\bar{q}],$$

$$u''_s = -\sum_{q=1}^{s-1} n\bar{q} \quad \text{avec } n\bar{q}(s-q) = 1.$$

On a d'une façon générale :

$$\sum_{q=1}^{s-1} \bar{q} = \sum_{q=1}^{s-1} (\overline{s-q}) = a_{s-1}^{(p-1)},$$

$a_{s-1}^{(p-1)}$ étant le symbole désignant la somme $\bar{1} + \bar{2} + \dots + (\overline{s-1})$, donc

$$u'_s = \sum_{q=1}^{s-1} (\overline{s-q}) + n\bar{q} = -(n+1) a_{s-1}^{(p-1)}.$$

Par suite, on a

$$\begin{aligned} \sum_{s=2}^{p-2} u'_s x^{p-s} &= -(n+1) \sum_{s=2}^{p-2} a_{s-1}^{(p-1)} x^{p-s} \\ &= (n+1) \sum_{s=1}^{p-3} a_s^{(p-1)} x^{p-1-s}. \end{aligned}$$

En effet, le développement de $\sum_{s=1}^{p-3}$ et de $\sum_{s=2}^{p-2}$ est le même dans les deux cas, et est exprimé par $\frac{1}{1} x^{p-2} + \frac{1}{2} x^{p-3} + \frac{1}{3} x^{p-4} + \dots + \frac{1}{s-1} x^2$, mais

$$\begin{aligned} -(n+1) \sum_{s=1}^{p-3} a_s^{(p-1)} x^{p-1-s} &= -(n+1) [g_{p-1}(x) - a_{p-2}^{(p-1)} x] \\ &= -(n+1) [g_{p-1}(x) - x]. \end{aligned}$$

En effet,

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^{p-3} a_s^{(p-1)} x^{p-1-s} &= \bar{1} x^{p-2} + (\bar{1} + \bar{2}) x^{p-3} + \dots + (\bar{1} + \bar{2} + \dots + \overline{p-3}) x^2, \\ g_{p-1}(x) &= \bar{1} x^{p-2} + (\bar{1} + \bar{2}) x^{p-3} + \dots + \bar{1} + \bar{2} + \dots + \overline{p-2} x, \end{aligned}$$

donc

$$\sum_{s=2}^{p-2} u'_s x^{p-s} = -(n+1) g_{p-1}(x) + (n+1) x.$$

5. — L'égalité $n\bar{q}(s-q) = 1$ équivaut à $n(s-q) = q$, donc à $ns = (n+1)q$.

Si, pour un n tel que $1 \leq n \leq p-2$, s et q sont liés par cette égalité, $s = 0$ équivaut à $q = 0$, et $s = q = 0$ est le seul cas où $s = q$.

Si $s = 1$, donc $\neq 0$, on doit avoir $q \neq 0$ et $q \geq 1 = s$, ce qui conduit à une impossibilité.

Si $s = p-1$, comme on a $q \leq p-1 = s$ et comme $s \neq 0$, on a $s \neq q$. D'autre part, on peut écrire

$$\begin{aligned} q &= (\overline{n+1}) ns = (\overline{n+1}) n(p-1) = -n(\overline{n+1}), \\ \text{d'où} \quad n\bar{q} &= n[-\bar{n}(n+1)] = -(n+1). \end{aligned}$$

Par suite,

$$\text{si } s = 1, \quad \sum_{\substack{s=1 \\ s > q > 0}} n\bar{q} x^{p-s} = 0;$$

$$\text{si } s = p-1, \quad \sum_{\substack{s=p-1 \\ s > q > 0}} n\bar{q} s^{p-s} = -(n+1) x.$$

Donc on a

$$\sum_{s=2}^{p-2} u'_s x^{p-s} + (n+1)x = - \sum_{\substack{1 \leq s \leq p-1 \\ q = (\overline{n+1}) ns < s}} n\bar{q} x^{p-s}.$$

6. — En réunissant les résultats des paragraphes 4 et 5, on obtient

$$Q_n(x) = \sum_{s=2}^{p-2} u'_s x^{p-s} + \sum_{s=2}^{p-2} u'_s x^{p-s},$$

$$\begin{aligned} Q_n(x) &= -(n+1)g_{p-1}(x) + (n+1)x - \sum n\bar{q}x^{p-s} - (n+1)x \\ &= -(n+1)g_{p-1}(x) - \sum_{\substack{1 \leq s \leq p-1 \\ q = (\overline{n+1}) ns < s}} n\bar{q}x^{p-s} \\ &= -(n+1)g_{p-1}(x) - \sum_{\substack{1 \leq s \leq p-1 \\ q = (\overline{n+1}) ns < s}} (n+1)\bar{s}x^{p-s}, \quad \text{car } n\bar{q} = (n+1)\bar{s}. \end{aligned}$$

Donc, si l'on pose

$$P_n(x) = \sum_{\substack{1 \leq s \leq p-1 \\ (\overline{n+1}) ns < s}} \bar{s}x^{p-1-s},$$

on a

$$Q_n(x) = -(n+1)g_{p-1}(x) - xP_n(x)(n+1)$$

et

$$P_n(x) \cdot x = -g_{p-1}(x) - (\overline{n+1})Q_n(x).$$

Les polynômes $P_n(x)$ sont les sommes de certains termes du polynôme fixe $f_{p-1}(x)$, d'une manière plus précise, d'une certaine moitié de ses termes, qui dépend de l'indice n . Ce résultat, qui se traduit par l'éclatement de la congruence fondamentale $f_{p-1}(x) \equiv 0 \pmod{p}$ en $\frac{p-1}{2}$ congruences distinctes, pourrait revêtir une grande importance s'il ouvrait la possibilité d'appliquer à la théorie des congruences de Kummer les méthodes du type combinatoire.

Soit S_n l'ensemble des exposants s tels que $\bar{s}x^{p-s-1}$ soit un terme de $P_n(x)$, et soit T_n l'ensemble complémentaire de S_n dans la suite $1, 2, \dots, (p-1)$.

Montrons que $T_n = -S_n$, ce qui montrera que S_n a $\frac{p-1}{2}$ éléments. En effet, soit $s' = s$, alors on a $q' = (\overline{n+1}) ns' = -(\overline{n+1}) ns = -q$, et $s > q$ équivaut à $s' < q'$; autrement dit :

$$s \in S_n \iff s' \notin T_n.$$

et $T_n = -S_n$.

7. — Les $P_n(x)$ ne sont pas tous distincts, car $P_{\bar{n}}(x) = P_n(x)$.

En effet, considérons un $s = 0$, et soient

$$q = (\bar{n} + 1) ns \quad \text{et} \quad q' = (\bar{n} + 1) \bar{n} s,$$

$$(\bar{n} + 1) \bar{n} s = (\bar{n}\bar{n} + n) (n\bar{n}) s = (\bar{n} + 1) s = \bar{n} q.$$

On a

$$s = (n + 1) \bar{n} q = q + q'.$$

Soient s^* , q^* , q'^* les plus petits restes positifs mod p des s , q et q' considérés comme éléments de $\frac{Z}{p}$. On a

$$s^* = q^* + q'^*$$

ou

$$s^* = q^* + q'^* - p$$

selon que q est $< s$ ou $q > s$.

Or, dans le premier cas, $q'^* = sq^* - q^* < s^*$, d'où $q' < s$.

Dans le second cas, on a

$$q'^* - s^* = p^* - q^* > 0 \quad \text{et} \quad q' > s.$$

Ainsi $q < s$ équivaut à $q' < s$, et sx^{p-1-s} est un terme commun de $P_n(x)$ et de $P_{\bar{n}}(x)$, d'où résulte

$$P_{\bar{n}}(x) = P_n(x).$$

8. — Nous avons vu que tout $P_n(x)$ est une combinaison linéaire des $\frac{g_{p-1}(x)}{x} = \frac{f_{p-1}(x)}{x(x-1)}$ et des $\frac{Q_u(x)}{x}$, lesquels sont des combinaisons linéaires de

$$\frac{g_i(x) g_{p-i}(x)}{x} = \frac{f_i(x) f_{p-i}(x)}{x(x-1)^p}.$$

Vice versa, les $Q_n(x)$ sont des combinaisons linéaires des $g_{p-i}(x) = \frac{f_{p-1}(x)}{x-1}$ et des $xP_n(x)$ tandis que, puisque le vandermondien $|n^i|$ [$n = 2, 3, \dots, (p-2), i = 2, 3, \dots, (p-2)$] n'est pas nul, les

$$g_i(x) g_{p-i}(x) = \frac{f_i(x) f_{p-i}(x)}{(x-1)^p}$$

sont des combinaisons linéaires des $Q_n(x)$. Par suite, tout élément t , distinct de 0 et de 1, de Ω_p ou d'une extension arbitraire de ce corps, est en même temps un zéro commun des $f_{p-1}(x)$ et $f_i(x) f_{p-1}(x)$ [$i = 2, 3, \dots, (p-2)$, on peut se limiter aux indices impairs] et zéro commun des $f_{p-1}(x)$ et $P_n(x)$ [$n = 2, 3, \dots, (p-2)$, on peut, se limiter à un seul indice pour deux indices inverses dans Ω_p].

9. — Donc, si $t \equiv -\frac{b}{a} \pmod{p}$, où (a, b, c) est une solution de l'équation (F) telle que $abc \not\equiv 0 \pmod{p}$, t doit satisfaire aux congruences établies au paragraphe 6 :

$$\left. \begin{array}{l} P_n(t) = 0 \\ f_{p-1}(t) = 0 \end{array} \right\} \pmod{p}, \quad n = 2, 3, \dots, (p-2),$$

et si t satisfait à ces congruences, il satisfait automatiquement à celles de MIRIMANOFF.

(Texte reçu le 31 janvier 1969.)

Paul LE LIDEC,
4, rue Lamothe-Guérin,
83-Toulon.
