

§2. Démonstration du théorème 1.

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **L'Enseignement Mathématique**

Band (Jahr): **19 (1973)**

Heft 1-2: **L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE**

PDF erstellt am: **11.07.2024**

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.

Ces diverses propriétés étant établies, prouvons maintenant (toujours en supposant $0 \leq j < q - 1$) que $\sigma(j) = s(j)$; les propriétés (i), puis (v), puis (ii) et (iii), montrent d'abord que pour $0 \leq j \leq p - 1$, on a $s(j) = j = j_0 = \sigma(j)$; les propriétés (ii) et (iv) donnent d'autre part

$$s(j) \leq s(j_0) + s(j_1) + \dots + s(j_{f-1});$$

comme $0 \leq j_i \leq p - 1$ pour $i = 0, \dots, f - 1$, ces deux remarques impliquent, pour $0 \leq j < q - 1$,

$$(1.4.9) \quad s(j) \leq j_0 + j_1 + \dots + j_{f-1} = \sigma(j);$$

l'égalité $s(j) = \sigma(j)$ résulte alors de (1.4.9), de la propriété (vi), et de l'égalité $\sum_{0 \leq j < q-1} \sigma(j) = f(p-1)(q-2)/2$, qui se vérifie facilement par récurrence sur f . La proposition 1 se trouve ainsi démontrée.

§ 2. Démonstration du théorème 1.

Cette démonstration se fera en quatre étapes.

2.1. Introduction du polynôme $C(Y)$. Soit T le sous-ensemble de B formé de 0 et des éléments de T^* ; pour tout $t \in T$, soit \bar{t} l'image de t dans $k = B/\mathfrak{P}$; l'application $t \mapsto \bar{t}$ est alors une bijection de T sur k (sect. 1.1 et 1.2), dont la bijection inverse est le caractère θ , prolongé comme toujours par $\theta(0) = 0$. Soit d'autre part β le caractère additif de k défini par $\beta(x) = \zeta^{Tr(x)}$ ($x \in k$); comme $\text{card}(T) = q$, il existe évidemment un polynôme à une variable Y et un seul, soit $C(Y)$, de degré $q - 1$, à coefficients dans L , et tel que $C(t) = \beta(\bar{t})$ pour tout $t \in T$; posons

$$(2.1.1) \quad C(Y) = c_0 + c_1 Y + \dots + c_{q-1} Y^{q-1}.$$

LEMME 1. — Avec les notations du paragraphe 1, on a

$$(2.1.2) \quad c_0 = 1; \quad c_{q-1} = -q/(q-1); \quad \text{et } c_j = \tau(j)/(q-1) \\ \text{pour } 1 \leq j \leq q-2.$$

En effet, pour $0 \leq j \leq q - 1$, on a, par définition de $\tau(j)$, de θ et de $C(Y)$,

$$\tau(j) = \sum_{x \in k^*} \theta^{-j}(x) \beta(x) = \sum_{t \in T^*} t^{-j} \beta(\bar{t}) = \sum_{t \in T^*} t^{-j} C(t);$$

il suffit alors, pour obtenir les relations (2.1.2), de remplacer, dans le membre de droite, $C(t)$ par son expression développée $c_0 + c_1 t + \dots + c_{q-1} t^{q-1}$, et de remarquer comme au paragraphe 1 que

$$(2.1.3) \quad \sum_{t \in T^*} t^u = \begin{cases} q - 1, & \text{si } u \equiv 0 \pmod{q-1}; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

LEMME 2. — Avec les notations du paragraphe 1, on a, pour tout j tel que $0 \leq j \leq q - 1$, l'égalité

$$(2.1.4) \quad \text{ord}(c_j) = \sigma(j).$$

Si $0 \leq j < q - 1$, il suffit d'appliquer le lemme 1, la proposition 1, et de remarquer que $\text{ord}(1/(q-1)) = 0$. Si $j = q - 1$, on a $j_0 = j_1 = \dots = j_{f-1} = p - 1$, donc $\sigma(j) = f(p-1)$; on a d'autre part (lemme 1) $\text{ord}(c_j) = \text{ord}(-q/(q-1)) = \text{ord}(q) = \text{ord}(p^f) = f \text{ord}(p) = f(p-1)$ (sect. 1.3); d'où $\text{ord}(c_j) = \sigma(j)$ également pour $j = q - 1$.

2.2. Evaluation de N à l'aide des c_j . Commençons par introduire un supplément de notations; $\mathbf{x} = (x_0, \dots, x_n)$ désignera un point quelconque de k^{n+1} ; U désignera l'ensemble des suites $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$ d'entiers rationnels non négatifs telles que $\|\mathbf{u}\| = u_1 + \dots + u_n \leq d = \text{deg}(F)$; enfin, si $\mathbf{u} \in U$, $X^{\mathbf{u}}$ désignera le monôme $X_1^{u_1} \dots X_n^{u_n}$, \mathbf{u}' désignera la suite $(1, u_1, \dots, u_n)$, et $X^{\mathbf{u}'}$ désignera le monôme $X_0 X_1^{u_1} \dots X_n^{u_n} = X_0 X^{\mathbf{u}}$; convention analogue pour $\mathbf{x}^{\mathbf{u}}$ et $\mathbf{x}^{\mathbf{u}'}$ si $\mathbf{x} \in k^{n+1}$, etc.

Cela étant, on a (chap. 5, prop. 3)

$$(2.2.1) \quad N = q^{-1} \sum_{\mathbf{x} \in k^{n+1}} \beta(x_0 F(x_1, \dots, x_n));$$

d'autre part, on peut écrire (en notant $a_{\mathbf{u}}$ ($\mathbf{u} \in U$) les coefficients de F) $F(X_1, \dots, X_n) = \sum_{\mathbf{u} \in U} a_{\mathbf{u}} X^{\mathbf{u}}$, donc $X_0 F(X_1, \dots, X_n) = \sum_{\mathbf{u} \in U} a_{\mathbf{u}} X^{\mathbf{u}'}$; comme β est un caractère additif, (2.2.1) peut se réécrire

$$(2.2.2) \quad N = q^{-1} \sum_{\mathbf{x} \in k^{n+1}} \prod_{\mathbf{u} \in U} \beta(a_{\mathbf{u}} \mathbf{x}^{\mathbf{u}'}).$$

Posons alors, quels que soient $\mathbf{u} \in U$ et $x_i \in k$, $b_{\mathbf{u}} = \theta(a_{\mathbf{u}})$ et $t_i = \theta(x_i)$; posons également $\mathbf{t} = (t_0, \dots, t_n)$; on a $b_{\mathbf{u}} \in T$, $t_i \in T$, $b_{\mathbf{u}} t^{\mathbf{u}'} \in T$, et $\bar{b}_{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{t}}^{\mathbf{u}'} = a_{\mathbf{u}} \mathbf{x}^{\mathbf{u}'}$; ainsi,

$$\beta(a_{\mathbf{u}} \mathbf{x}^{\mathbf{u}'}) = C(b_{\mathbf{u}} \mathbf{t}^{\mathbf{u}'}) = \sum_{0 \leq j \leq q-1} c_j b_{\mathbf{u}}^j \mathbf{t}^{j \mathbf{u}'},$$

$\mathbf{t}^{ju'}$ signifiant évidemment $t_0^j t_1^{ju_1} \dots t_n^{ju_n}$; et (2.2.2) devient

$$(2.2.3) \quad N = q^{-1} \sum_{\mathbf{t} \in T^{n+1}} \prod_{\mathbf{u} \in U} \sum_{0 \leq j \leq q-1} c_j b_{\mathbf{u}}^j \mathbf{t}^{ju'}$$

Soit M l'ensemble de toutes les applications de U dans $\{0, 1, \dots, q-1\}$ (c'est-à-dire l'ensemble de toutes les « façons d'associer un j à chaque \mathbf{u} »); la distributivité de la multiplication par rapport à l'addition permet de mettre le second membre de (2.2.3) sous la forme

$$q^{-1} \sum_{j \in M} \sum_{\mathbf{t} \in T^{n+1}} \prod_{\mathbf{u} \in U} c_{j(\mathbf{u})} b_{\mathbf{u}}^{j(\mathbf{u})} \mathbf{t}^{j(\mathbf{u})\mathbf{u}'}$$

Pour chaque $j \in M$, posons $b^{(j)} = \prod_{\mathbf{u} \in U} b_{\mathbf{u}}^{j(\mathbf{u})}$ ($b^{(j)}$ est donc un élément de T), et désignons par \mathbf{e}_j' la suite

$$\sum_{\mathbf{u} \in U} j(\mathbf{u}) \mathbf{u}' = (\sum j(\mathbf{u}), \sum j(\mathbf{u}) u_1, \dots, \sum j(\mathbf{u}) u_n)$$

L'égalité (2.2.3) peut alors s'écrire

$$(2.2.4) \quad N = q^{-1} \sum_{j \in M} b^{(j)} \prod_{\mathbf{u} \in U} c_{j(\mathbf{u})} \sum_{\mathbf{t} \in T^{n+1}} \mathbf{t}^{\mathbf{e}_j'}$$

2.3. Réduction du problème. Dans (2.2.4), tous les termes du membre de droite (abstraction faite du facteur q^{-1}) sont dans l'anneau B des entiers de L ; il suffit donc pour prouver le théorème 1 de montrer ceci:

(2.3.1) *Quel que soit $j \in M$, l'entier algébrique $\prod_{\mathbf{u} \in U} c_{j(\mathbf{u})} \sum_{\mathbf{t} \in T^{n+1}} \mathbf{t}^{\mathbf{e}_j'}$ est divisible (dans B) par q^{b+1} .*

Convenons d'écrire $q-1 \mid \mathbf{e}_j'$ si $q-1$ divise chacune des $n+1$ composantes de \mathbf{e}_j' , et $q-1 \nmid \mathbf{e}_j'$ dans le cas contraire; d'après (2.1.3), on a

$$(2.3.2) \quad \sum_{\mathbf{t} \in T^{n+1}} \mathbf{t}^{\mathbf{e}_j'} = \begin{cases} q^{n+1}, & \text{si } \mathbf{e}_j' = (0, 0, \dots, 0); \\ 0, & \text{si } q-1 \nmid \mathbf{e}_j'; \\ (q-1)^{s+1} q^{n-s}, & \text{si } \mathbf{e}_j' \neq (0, 0, \dots, 0), \text{ si } q-1 \mid \mathbf{e}_j', \\ & \text{et si } \mathbf{e}_j \text{ (c'est-à-dire } \mathbf{e}_j' \text{ privé de sa première composante)} \\ & \text{possède exactement } s \text{ composantes non nulles;} \end{cases}$$

et il suffit en fait, pour établir (2.3.1), donc le théorème 1, de prouver ceci:

LEMME 3. — Si $j \in M$ est tel que \mathbf{e}_j' soit différent de $(0, 0, \dots, 0)$, soit « divisible » par $q - 1$, et que \mathbf{e}_j possède exactement s composantes non nulles, alors l'entier algébrique $q^{n-s} \prod_{\mathbf{u} \in U} c_{j(\mathbf{u})}$ est divisible (dans B) par q^{b+1} .

2.4. Démonstration du lemme 3. Pour tout $\mathbf{u} \in U$ et tout $j \in M$, écrivons l'entier $j(\mathbf{u})$ en base p :

$$j(\mathbf{u}) = j_0(\mathbf{u}) + j_1(\mathbf{u})p + \dots + j_{f-1}(\mathbf{u})p^{f-1}$$

($0 \leq j_i(\mathbf{u}) \leq p - 1$; $0 \leq i \leq f - 1$); ceci définit $j_i(\mathbf{u})$ pour $0 \leq i < f$; étendons cette définition en convenant de poser, pour tout entier rationnel z , $j_z(\mathbf{u}) = j_{i(z)}(\mathbf{u})$, où $i(z)$ est le reste de division de z par f ; enfin, pour tout entier rationnel h , posons

$$j^{(h)}(\mathbf{u}) = j_{-h}(\mathbf{u}) + j_{1-h}(\mathbf{u})p + \dots + j_{f-1-h}(\mathbf{u})p^{f-1}$$

(les $j^{(h)}(\mathbf{u})$ sont les entiers rationnels déduits de $j(\mathbf{u})$ par permutation circulaire des chiffres de $j(\mathbf{u})$ en base p). Il est clair qu'on ne change rien aux égalités (2.3.2) en y remplaçant j par $j^{(h)}$, ce qui équivaut à effectuer sur T la permutation $t \mapsto t^{p^h}$; en particulier, cette substitution ne modifie pas la valeur de s ; ainsi, sous les hypothèses du lemme 3, on a

$$(2.4.1) \quad s(q-1) \leq \|\mathbf{e}_{j^{(h)}}\| = \left\| \sum_{\mathbf{u} \in U} j^{(h)}(\mathbf{u}) \mathbf{u} \right\| \leq d \sum_{\mathbf{u} \in U} j^{(h)}(\mathbf{u}).$$

Mais $\sum_{\mathbf{u} \in U} j^{(h)}(\mathbf{u})$ est la première composante de $\mathbf{e}_{j^{(h)}}$: c'est donc (toujours avec les hypothèses du lemme 3) un entier strictement positif divisible par $q - 1$; si $(s/d)^*$ désigne le plus petit entier supérieur ou égal à s/d , (2.4.1) implique alors

$$(q-1)(s/d)^* \leq \sum_{\mathbf{u} \in U} j^{(h)}(\mathbf{u});$$

dans cette égalité, donnons à h les valeurs $0, 1, \dots, f - 1$, et additionnons; compte tenu de la définition de $j^{(h)}(\mathbf{u})$, il vient

$$f(q-1)(s/d)^* \leq \sum_{0 \leq h \leq f-1} \sum_{\mathbf{u} \in U} \sum_{0 \leq i \leq f-1} j_{i-h}(\mathbf{u}) p^i,$$

ou encore (en intervertissant l'ordre des sommations, en utilisant la notation $\sigma(j)$, et en remplaçant q par p^f),

$$f(p^f - 1)(s/d)^* \leq (p^{f-1} + \dots + p + 1) \sum_{\mathbf{u} \in U} \sigma(j(\mathbf{u})).$$

Comme $\sum_{\mathbf{u} \in U} \sigma(j(\mathbf{u})) = \text{ord} \left(\prod_{\mathbf{u} \in U} c_{j(\mathbf{u})} \right)$ (lemme 2 et première formule (1.3.1)), cette dernière inégalité peut s'écrire, après division par $p^{f-1} + \dots + p + 1$,

$$f(p-1)(s/d)^* \leq \text{ord} \left(\prod_{\mathbf{u} \in U} c_{j(\mathbf{u})} \right);$$

compte tenu de (1.3.1) et (1.3.4), on a alors

$$(2.4.2) \quad f(p-1)(n-s+(s/d)^*) \leq \text{ord} \left(q^{n-s} \prod_{\mathbf{u} \in U} c_{j(\mathbf{u})} \right).$$

Mais le symbole ord est relatif à *n'importe quel* idéal premier \mathfrak{P} de B divisant p , et on a (sect. 1.1, (1.1.3)) $pB = \prod_{\mathfrak{P}|p} \mathfrak{P}^{p-1}$, donc, puisque $q = p^f$, $qB = \prod_{\mathfrak{P}|p} \mathfrak{P}^{f(p-1)}$; ainsi, étant donné (2.4.2), il suffit, pour prouver le lemme 3 (donc le théorème 1), d'établir la propriété suivante:

(2.4.3) *Pour tout entier s tel que $0 \leq s \leq n$, on a l'inégalité*

$$n - s + (s/d)^* \geq b + 1.$$

Démontrons (2.4.3); il est clair que pour tout entier positif t , on a $t \geq ((s+t)/d)^* - (s/d)^*$: car, pour $t = 0$, les deux membres sont égaux, et d'autre part le membre de droite, considéré comme fonction de t , croît « moins vite » que t ; dans cette inégalité, faisons alors $t = n - s$; il vient

$$n - s + (s/d)^* \geq (n/d)^*;$$

mais par définition même $(n/d)^* = b + 1$: ce qui prouve (2.4.3) et achève la démonstration du théorème 1.

§ 3. Généralisations et compléments.

3.1. Le théorème 1 s'étend sans difficulté au cas d'un système d'équations:

THÉORÈME 2. — *Soit F_1, \dots, F_s une famille de s polynômes de degrés respectifs d_1, \dots, d_s , à n variables et à coefficients dans k ; posons $d = d_1 + \dots + d_s$, et soit b le plus grand entier strictement inférieur à n/d . Si alors N désigne le nombre de solutions dans k^n du système d'équations*

$$(3.1.1) \quad F_1 = 0, \dots, F_s = 0,$$

N est divisible par q^b .

Démonstration. — On se sert du lemme combinatoire suivant: