

§4. Equations multilinéaires.

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **L'Enseignement Mathématique**

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

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

PDF erstellt am: **25.04.2024**

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.

valable pour tout entier $m \geq 1$ (la notation [...] signifie: partie entière de ...; cette estimation se déduit immédiatement de l'écriture de m en base p).

Dans le cas homogène, le théorème 4 peut s'énoncer:

THÉORÈME 5. — Soit $F = a_1 X_1^d + \dots + a_n X_n^d$ une forme diagonale homogène de degré d à n variables; posons $\delta = (q-1, d)$; alors, si $n = \delta$, et si δ divise $p-1$, la forme F représente tout élément non nul de k .

Ce résultat étend le théorème 2 à des formes F non isotropes; signalons que le théorème 5 reste vrai si on remplace l'hypothèse (H4) par l'hypothèse plus faible: $\delta \leq p-1$ (voir Schwarz (1950)); en revanche, si $\delta \geq p$, le théorème 5 peut tomber en défaut: ainsi, dans l'exemple donné à la fin du paragraphe 2, la forme $X_1^3 + X_2^3 + X_3^3$ sur $k = \mathbb{F}_4$ (avec $n=d=\delta=q-1=3$) représente seulement les éléments de \mathbb{F}_2 ; et de fait, $\delta = 3 \geq p = 2$.

Notons enfin que si $q = p$, les conditions: δ_i divise $p-1$, δ divise $p-1$, sont automatiquement vérifiées: sur un corps fini premier, les théorèmes 4 et 5 sont donc valables sans restriction.

§ 4. Equations multilinéaires.

4.1. Soit toujours k un corps fini à $q = p^f$ éléments, soient r et d deux entiers ≥ 1 , et soit $n = rd$. On se propose dans cette section de calculer le nombre $N(F, b)$ de solutions dans k^n de l'équation $F = b$ ($b \in k$), le polynôme F étant de la forme

$$(4.1.1) \quad F = a_1 X_1 \dots X_d + a_2 X_{d+1} \dots X_{2d} + \dots + a_r X_{n-d+1} \dots X_n$$

(un tel polynôme est parfois dit abusivement *multilinéaire*). Il est clair qu'on peut supposer tous les a_j non nuls (chap. 3, th. 5) et qu'on peut même (quitte éventuellement à multiplier les deux membres de l'équation par b^{-1} , et à faire une « homothétie » sur certaines variables) supposer $a_1 = \dots = a_r = 1$, et $b = 0$ ou 1. On est ainsi ramené à calculer les nombres de solutions dans k^n des deux équations $F_{r,d} = 0$ et $F_{r,d} = 1$, avec

$$(4.1.2) \quad F_{r,d} = X_1 \dots X_d + X_{d+1} \dots X_{2d} + \dots + X_{n-d+1} \dots X_n,$$

nombres qu'on notera respectivement $N(r, d)$ et $N_1(r, d)$.

4.2. THÉORÈME 6. — Les nombres $N(r, d)$ et $N_1(r, d)$ sont donnés par

$$(4.2.1) \quad N(r, d) = q^{n-1} + (q-1) q^{r-1} A(q, d)^r,$$

$$(4.2.2) \quad N_1(r, d) = q^{n-1} - q^{r-1} A(q, d)^r,$$

avec par définition $A(q, d) = q^{d-1} - (q-1)^{d-1}$.

Démonstration. — On établit les deux formules *simultanément* par récurrence sur l'entier r . Si $r = 1$, et donc $n = d$, on voit directement que $N(1, d) = q^n - (q-1)^n$, et que $N_1(1, d) = (q-1)^{n-1}$, ce qui coïncide bien avec les valeurs données dans ce cas par (4.2.1) et (4.2.2). Supposons alors ces formules prouvées jusqu'à un entier $r - 1 \geq 1$, et démontrons-les pour l'entier r . En classant les solutions de l'équation $F_{r,d} = 0$ selon la valeur prise par le monôme $X_{n-d+1} \dots X_n$, on obtient

$$\begin{aligned} N(r, d) &= \sum_{c \in k} N(F_{r-1,d}, c) N(F_{1,d}, -c) \\ &= N(r-1, d) N(1, d) + (q-1) N_1(r-1, d) N_1(1, d) \end{aligned}$$

(voir sect. 4.1). L'hypothèse de récurrence donne la valeur des quatre termes $N(r-1, d)$, $N(1, d)$, $N_1(r-1, d)$ et $N_1(1, d)$, et on vérifie, après calcul, que la valeur ainsi obtenue pour $N(r, d)$ coïncide bien avec celle fournie par (4.2.1). Raisonement analogue pour (4.2.2). (On peut aussi déduire directement (4.2.2) de (4.2.1) en remarquant que, puisque toutes les équations $F_{r,d} = b$ ($b \in k^*$) ont même nombre de solutions, $N_1(r, d)$, on a évidemment $q^n = N(r, d) + (q-1) N_1(r, d)$).

COROLLAIRE 1. — Si, dans l'équation $F = b$ (voir (4.1.1)), les coefficients a_j sont tous différents de 0 (et si en outre, quand $r = 1$, b est également différent de 0), alors $N(F, b)$ est un polynôme en q , à coefficients entiers rationnels, de terme dominant q^{n-1} . En particulier, si on considère q comme « infiniment grand », on peut écrire

$$N(F, b) = q^{n-1} + O(q^{n-2}).$$

On reviendra longuement sur ce genre de résultat aux chapitres 6, 7, 8 et 9.

4.3. Le théorème 6 permet en particulier de déterminer le nombre N de solutions dans k^n d'une équation diagonale homogène de degré 2,

$$(4.3.1) \quad a_1 X_1^2 + \dots + a_n X_n^2 = b,$$

($a_1, \dots, a_n, b \in k$); on peut naturellement supposer tous les coefficients a_i différents de 0; on peut également supposer $p \neq 2$ (en caractéristique 2, on a $N = q^{n-1}$); comme la détermination de N sera effectuée ultérieurement (chap. 6, sect. 1.3) par un autre procédé, on se bornera ici à indiquer la démarche du calcul, en laissant au lecteur le soin d'en expliciter les détails.

(1) Pour $n = 1$, on a évidemment $N = 1$ si $b = 0$; sinon, on a $N = 2$ ou 0 selon que $a_1 b \in k^{*2}$ ou que $a_1 b \notin k^{*2}$.

(2) Pour $n = 2$, on vérifie sans peine, soit par le calcul, soit par un raisonnement géométrique, que N est donné par les formules ci-dessous:

$$\text{pour } b = 0, N = \begin{cases} 2q - 1, & \text{si } -a_1 a_2 \in k^{*2}, \\ 1, & \text{si } -a_1 a_2 \notin k^{*2}; \end{cases}$$

$$\text{pour } b \neq 0, N = \begin{cases} q - 1, & \text{si } -a_1 a_2 \in k^{*2}, \\ q + 1, & \text{si } -a_1 a_2 \notin k^{*2}. \end{cases}$$

Supposons maintenant $n \geq 3$. Comme toute forme quadratique à trois variables ou plus sur k est isotrope (théorème de Chevalley: chap. 3, th. 1, cor. 1), la théorie générale de la réduction des formes quadratiques (voir [17], chap. IV, notamment pp. 60-62) montre qu'on peut (par une transformation linéaire inversible à coefficients dans k , ce qui n'affecte pas la valeur de N) mettre le premier membre de (4.3.1) sous l'une des deux formes suivantes:

$$(4.3.2) \quad Y_1 Y_2 + \dots + Y_{2r-1} Y_{2r} + a Y_n^2,$$

avec $n = 2r + 1$ et $a = (-1)^r a_1 \dots a_n$, si n est impair;

$$(4.3.3) \quad Y_1 Y_2 + \dots + Y_{2r-1} Y_{2r} + Y_{n-1}^2 + a Y_n^2,$$

avec $n = 2r + 2$ et $a = (-1)^2 a_1 \dots a_n$, si n est pair.

(La valeur de a s'obtient en écrivant l'invariance du discriminant).

(3) Calculons alors N quand n est *impair*, $n = 2r + 1$. En classant (comme dans la démonstration du théorème 6) les solutions de $F = b$ (F étant mis sous la forme (4.3.2)) suivant la valeur prise par le monôme $a Y_n^2$, on obtient, avec les notations de la section 4.1,

$$(4.3.4) \quad N = \sum_{c \in k, c \neq b} N_1(r, 2) N(a Y_n^2, c) + N(r, 2) N(a Y_n^2, b).$$

$N(r, 2)$ et $N_1(r, 2)$ sont donnés par le théorème 6, $N(a Y_n^2, c)$ et $N(a Y_n^2, b)$ sont donnés par (1); si on remarque que k^* contient $(q-1)/2$ carrés et autant de non-carrés, on arrive finalement à ceci:

$$\text{pour } b = 0, N = q^{n-1};$$

$$\text{pour } b \neq 0, N = \begin{cases} q^{n-1} + q^{(n-1)/2}, & \text{si } (-1)^{(n-1)/2} a_1 \dots a_n b \in k^{*2}, \\ q^{n-1} - q^{(n-1)/2}, & \text{si } (-1)^{(n-1)/2} a_1 \dots a_n b \notin k^{*2}. \end{cases}$$

(4) Le calcul de N quand n est *pair* se fait de la même manière: on réécrit la formule (4.3.4) en y remplaçant aY_n^2 par $Y_{n-1}^2 + aY_n^2$, on utilise le théorème 6 et les formules de (2), et on obtient finalement ceci:

$$\text{pour } b = 0, N = \begin{cases} q^{n-1} + q^{n/2} - q^{(n/2)-1}, & \text{si } (-1)^{n/2} a_1 \dots a_n \in k^{*2}, \\ q^{n-1} - q^{n/2} + q^{(n/2)-1}, & \text{si } (-1)^{n/2} a_1 \dots a_n \notin k^{*2}; \end{cases}$$

$$\text{pour } b = 0, N = \begin{cases} q^{n-1} - q^{(n/2)-1}, & \text{si } (-1)^{n/2} a_1 \dots a_n \in k^{*2}, \\ q^{n-1} + q^{(n/2)-1}, & \text{si } (-1)^{n/2} a_1 \dots a_n \notin k^{*2}. \end{cases}$$

Notes sur le chapitre 4

§ 1: la méthode de démonstration du théorème 1 est empruntée à Demyanov (1956). Cette méthode s'applique également aux équations diagonales homogènes sur un corps p -adique; à ce sujet, voir également Schwarz (1956), Davenport-Lewis (1963), et surtout [7], pp. 101-138, et [13], pp. 17-22 et 40-52.

§ 2: le théorème 3, (ii) et son corollaire 1 sont dus à Tornheim (1938); voir aussi Schwarz (1948, a). Pour l'application du théorème 3, (i) au problème de Waring dans un anneau d'entiers algébriques, voir Bateman-Stemmler (1962) pour un exposant d premier, et Joly (1968) pour un exposant d quelconque.

§ 3: les théorèmes 4 et 5 sont dus à Morlaye (1971); voir également Schwarz (1948, b; 1950) et Carlitz (1956, b).

§ 4: pour une autre démonstration du théorème 7, voir Porter (1966, e).

Les équations diagonales sur un corps fini ont suscité une vaste littérature; mentionnons seulement ici (en dehors des articles déjà cités, et de ceux qui le seront au chapitre 6) Cohen (1956), Chowla-Mann-Straus (1959), Gray (1960), Chowla (1961), Tietäväinen (1968), et Lewis (1960).