

MÉMOIRES DE LA S. M. F.

JEAN-RENÉ JOLY

Théorème des deux carrés dans un anneau de polynômes

Mémoires de la S. M. F., tome 25 (1971), p. 113-117

http://www.numdam.org/item?id=MSMF_1971__25__113_0

© Mémoires de la S. M. F., 1971, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Mémoires de la S. M. F. » (<http://smf.emath.fr/Publications/Memoires/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/>

THEOREME DES DEUX CARRÉS DANS UN ANNEAU DE POLYNOMES

par

Jean-René JOLY

--:--:--

1. - Introduction. Énoncé de deux théorèmes.

Étant donné un corps commutatif k , on se propose de caractériser les éléments de l'anneau de polynômes $k[T]$ qui sont sommes de deux carrés. On obtient les deux résultats suivants (on suppose naturellement k de caractéristique $\neq 2$) :

THEOREME 1. - Soit $f \in k[T]$ un polynôme irréductible et unitaire. Les deux propriétés suivantes sont équivalentes :

- (a) f est somme de deux carrés dans $k[T]$;
- (b) -1 est un carré dans le corps résiduel $k[T] / (f)$.

THEOREME 2. - Soit $g \in k[T]$ un polynôme non nul, de décomposition

$$g = a f_1^{e_1} f_2^{e_2} \dots f_m^{e_m}$$

($a \in k^*$, les f_n irréductibles, unitaires et deux à deux distincts, les $e_j \geq 1$).
Les deux propriétés suivantes sont équivalentes :

- (a) g est somme de deux carrés dans $k[T]$;
- (b) a est somme de deux carrés dans k , et de plus, pour tout indice j tel que f_j ne soit pas somme de deux carrés, l'exposant e_j est pair.

La situation est donc la même que dans l'anneau \mathbb{Z} des entiers relatifs, les polynômes irréductibles et unitaires f tels que -1 ne soit pas un carré dans $k[T]/(f)$ jouant le même rôle que les nombres premiers $p \equiv 3 \pmod{4}$.

Le théorème 1 est démontré au paragraphe 2 : on en propose deux démonstrations, calquées sur deux démonstrations classiques du théorème des deux carrés dans \mathbb{Z} . Le théorème 2 est démontré au paragraphe 3. Le paragraphe 4 donne quelques exemples et remarques.

2. - Démonstration du théorème 1.

Si -1 est un carré dans k , le théorème est évident : car (a) est vraie quel que soit f (en vertu de l'identité

$$f = \left(\frac{1+f}{2}\right)^2 - \left(\frac{1-f}{2}\right)^2 ,$$

et aussi (b) : on supposera donc désormais que -1 n'est pas un carré dans le corps k .

Le fait que (a) implique (b) est également évident : si $f = v^2 + w^2$, la comparaison des termes de plus haut degré dans les deux membres, et le fait que -1 ne soit pas un carré dans k , montrent que $\deg(f) = 2 \sup(\deg(v), \deg(w))$; en particulier, f ne peut diviser ni v , ni w ; si alors \bar{v} et \bar{w} sont les images de v et w dans le corps $k[T]/(f)$, on a $\bar{v} \neq 0$, $\bar{w} \neq 0$ et $\bar{v}^2 + \bar{w}^2 = 0$, donc $-1 = (\bar{w}\bar{v}^{-1})^2 =$ un carré dans $k[T]/(f)$.

Reste à prouver que (b) implique (a). Voici deux méthodes :

Première méthode :

Une démonstration classique du théorème des deux carrés dans \mathbb{Z} s'appuie sur la décomposition des nombres premiers $p \equiv 1 \pmod{4}$ dans l'anneau des entiers de Gauss (voir par exemple [3], p. 96). On peut procéder ici de la même manière : adjoignons à k un élément $i = \sqrt{-1}$, et posons

$$\begin{aligned} A &= k[T] , & K &= k[T] , \\ B &= k(i)[T] = k[i, T] = A[i] , \\ L &= K(i) = k(i, T) . \end{aligned}$$

A et B sont des anneaux principaux, L/K est une extension quadratique, et B est la fermeture intégrale de A dans L .

Prouvons alors que (b) implique (a); on a les isomorphismes

$$\begin{aligned} B/Bf &= k[i, T]/fk[i, T] \simeq k[X, T]/(f, X^2+1) \\ k_1[X]/(X^2+1) &\simeq k_1 \times k_1 , \end{aligned}$$

k_1 désignant le corps $k[T]/(f)$, et le dernier isomorphisme ayant lieu parce que (par hypothèse) -1 est un carré dans k_1 . L'idéal premier Af de A est donc décomposé dans B , d'où $Bf = P_1 P_2$, P_1 et P_2 étant deux idéaux premiers de B , distincts, permutés par l'unique K -automorphisme non trivial de L , et d'autre part principaux, ce qui permet d'écrire

$$P_1 = B(v+iw) , \quad P_2 = B(v-iw) ,$$

avec $v, w \in A$. De là $Bf = B(v^2+w^2)$, et donc $f = b(v^2+w^2)$, avec

$b \in k(i) \cap K = k$; b est d'ailleurs somme de deux carrés dans k , comme on le

voit en comparant les termes de plus haut degré des deux membres : l'identité de Lagrange permet alors de conclure que f est somme de deux carrés dans $A = k[T]$, C.Q.F.D.

Deuxième méthode :

On peut également démontrer le théorème des deux carrés dans \mathbb{Z} en utilisant un théorème d'approximation des nombres réels par des nombres rationnels (voir par exemple [1], p.III.4). Cette méthode se laisse de même adapter à $A = k[T]$. D'abord, un lemme élémentaire :

LEMME 1. - Si E est un sous-espace vectoriel de dimension finie de l'anneau de polynômes $k[T]$, E admet une base formée de polynômes de degrés tous différents.

Ce lemme se démontre par récurrence sur $\dim(E)$. Prouvons alors que, dans le théorème 1, (b) implique (a). Comme $k[T]/(f)$ contient par hypothèse $k(i)$, quadratique sur k , le degré de f est pair, soit $\deg(f) = 2r$. D'autre part, comme -1 est un carré modulo f , il existe $g \in k[T]$ tel que f divise $1+g^2$. Enfin :

LEMME 2. - Il existe u et $v \in k[T]$ tels que $v \neq 0$ et

$$\deg(vg-uf) \leq r \quad \text{et} \quad \deg(v) \leq r .$$

Prouvons ce lemme : soit E_r le sous-espace vectoriel de $k[T]$ formé des polynômes de degré $\leq r$, et pour tout $v \in E_r$, soit $\rho(v)$ le reste de division de vg par f ; ρ est une application linéaire injective de E_r dans $k[T]$, d'où $\dim(\rho(E_r)) = r+1$; de plus, tout élément de $\rho(E_r)$ est de degré $\leq 2r-1$. Le lemme 1 montre alors que $\rho(E_r)$ contient un polynôme non nul de degré au plus égal à

$$(2r-1) - (r+1) + 1 = r-1 \leq r ,$$

assertion qui équivaut au lemme 2 .

Posons alors $w = vg - uf$, u et v satisfaisant aux conditions du lemme 2 .

On a

$$v^2 + w^2 = v^2(1+g^2) - 2uvfg + u^2f^2 ,$$

ce qui, compte tenu du choix de g , montre que f divise $v^2 + w^2$; d'autre part,

$$\deg(v^2 + w^2) \leq 2r = \deg(f) ;$$

enfin, -1 n'étant pas un carré dans k , $v^2 + w^2$ n'est pas nul. Ainsi, f et $v^2 + w^2$ sont associés dans $k[T]$, il existe $a \in k^*$ tel que

$$f = a(v^2 + w^2) ;$$

on vérifie que a est somme de deux carrés dans k , et on conclut par l'identité de Lagrange, comme dans la première méthode.

3. - Démonstration du théorème 2.

Le fait que (b) implique (a) est encore une conséquence immédiate de l'identité de Lagrange. Prouvons la réciproque, et écrivons donc

$$g = v^2 + w^2 = a f_1^{e_1} f_2^{e_2} \dots f_m^{e_m}.$$

La comparaison des termes de plus haut degré prouve d'abord que a est somme de deux carrés dans k . Reste à prouver que si, pour j donné, f_j n'est pas somme de deux carrés, alors e_j est pair; ce qui, compte tenu du théorème 1, équivaut à prouver ceci (qui est vrai d'ailleurs dans n'importe quel anneau principal) :

LEMME 3. - Soit $f \in k[T]$ un polynôme irréductible et unitaire. Si -1 n'est pas un carré dans g , et si f divise g , alors la plus haute puissance de f qui divise g est paire.

Soit en effet u un plus grand commun diviseur de v et w , et écrivons

$$\begin{aligned} v &= uv_1, & w &= uw_1, \\ g &= u^2(v_1^2 + w_1^2); \end{aligned}$$

f ne peut diviser $v_1^2 + w_1^2$: cela impliquerait $\bar{v}_1^2 + \bar{w}_1^2 = 0$ dans $k[T]/(f)$, où -1 n'est pas un carré; on aurait donc $\bar{v}_1 = \bar{w}_1 = 0$, f diviserait v_1 et w_1 , et u ne serait par p.g.c.d. de v et w . Ainsi, f divise g par l'intermédiaire du facteur u^2 , ce qui prouve le lemme.

Le théorème 2 est ainsi démontré.

4. - Exemples et remarques.

(1) Si $k = \mathbb{R}$, le théorème 2 redonne ce résultat bien connu : $g \in \mathbb{R}[T]$ est somme de deux carrés si (et seulement si) il est défini positif.

(2) Si $k = \mathbb{F}_q$, corps fini à q éléments ($q = p^n$, $p \neq 2$), et si $q \equiv 1 \pmod{4}$, alors -1 est un carré dans k , et tout élément de $k[T]$ est somme de deux carrés. Si au contraire $q \equiv 3 \pmod{4}$ (c'est-à-dire si $p \equiv 3 \pmod{4}$) et si n est impair), on voit sans peine que le théorème 2 donne ceci :

$g = a f_1^{e_1} f_2^{e_2} \dots f_m^{e_m} \in \mathbb{F}_q[T]$ est somme de deux carrés si (et seulement si) pour tout j tel que f_j soit de degré impair, l'exposant e_j est pair.

Ce résultat est dû à W. Leakey (voir [2]).

(3) La caractérisation (b) des sommes de deux carrés donnée dans le théorème 2 n'est pas valable dans un anneau principal quelconque, même euclidien : ainsi, dans l'anneau des entiers de Gauss, l'élément $g = -4 - 4i = i^2 + (2-i)^2$ est somme de deux carrés, mais sa décomposition en facteurs irréductibles $g = (1+i)^5$ fait apparaître $1+i$ (qui n'est pas somme de deux carrés) avec l'exposant impair 5 .

-:-:-

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. CHANDRASEKHARAN. - Einführung in die analytische Zahlentheorie. Springer.
- [2] W. LEAHEY. - Sums of squares of polynomials with coefficients in a finite field. Amer. Math. Monthly. 74 (1967).
- [3] P. SAMUEL. - Théorie algébrique des nombres. Hermann.

-:-:-

Faculté des Sciences de Grenoble
Département de Mathématiques
Boîte Postale n° 116
38 - Saint-Martin-d'Hères (France)