

SÉMINAIRE DELANGE-PISOT-POITOU. THÉORIE DES NOMBRES

PIERRE DAMEY

Existence et construction des extensions galoisiennes d'un corps de caractéristique $\neq 2$ à groupe de Galois isomorphe au groupe du carré ou au groupe des quaternions

Séminaire Delange-Pisot-Poitou. Théorie des nombres, tome 9, n° 2 (1967-1968), exp. n° 18, p. 1-7

http://www.numdam.org/item?id=SDPP_1967-1968__9_2_A4_0

© Séminaire Delange-Pisot-Poitou. Théorie des nombres
(Secrétariat mathématique, Paris), 1967-1968, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la collection « Séminaire Delange-Pisot-Poitou. Théorie des nombres » 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/>

EXISTENCE ET CONSTRUCTION DES EXTENSIONS GALOISIENNES
 D'UN CORPS DE CARACTÉRISTIQUE $\neq 2$ À GROUPE DE GALOIS ISOMORPHE
 AU GROUPE DU CARRÉ OU AU GROUPE DES QUATERNIONS

par Pierre DAMEY

Problème. - Etant donné un corps κ de caractéristique différente de 2, trouver une extension galoisienne N de ce corps, dont le groupe de Galois soit isomorphe au groupe des quaternions, et qui contienne une extension donnée de κ (de degré ≤ 4 !) quadratique ou biquadratique.

1. Groupes d'ordre 8 non abéliens.

Il y a 5 groupes d'ordre 8, dont 2 seulement sont non abéliens. Ces 2 groupes sont : le groupe du carré et le groupe des quaternions.

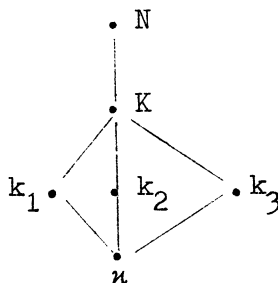
Par générateurs et relations, ils sont donnés ainsi :

- Groupe du carré : $\langle \sigma, \tau \rangle$: $\sigma^4 = 1, \tau^2 = 1, \tau\sigma = \sigma^3\tau$ ou $\tau\sigma = \sigma^{-1}\tau$
 (c'est le groupe diédral d'ordre $2n$ avec $n = 4$).

- Groupe des quaternions : $\langle \sigma, \tau \rangle$: $\sigma^4 = 1, \tau^4 = 1, \tau^2 = \sigma^2, \tau\sigma = \sigma^{-1}\tau$.

2. Propriétés. Extension carrée (resp. extension quaternionique).

Soit l'extension N/κ dont le groupe de Galois est isomorphe au groupe du carré (resp. des quaternions).



N/κ carrée (resp. quaternionique). Les sous-corps galoisiens sont : K un biquadratique, et k_1, k_2, k_3 3 quadratiques.

- Si N/κ est carrée, N/k_1 est cyclique de degré 4 et N/k_2 et N/k_3 non cycliques (2, 2).

- Si N/κ est quaternionique, N/k_i est cyclique de degré 4 pour $i=1, 2, 3$.

Enfin, ce qui distingue aussi le groupe du carré du groupe des quaternions est que le groupe du carré \mathcal{G} est un produit semi-direct d'un groupe G cyclique d'ordre 4 par un groupe g cyclique d'ordre 2 (i. e. il existe \bar{g} , relèvement de g dans \mathcal{G}).

En termes d'extensions, N carrée est composée de k_1 et de K_1 (invariant de $\langle 1, \tau \rangle$) linéairement disjointes.

3. Résolution du problème.

Historiquement, le problème fut pris sous la forme suivante :

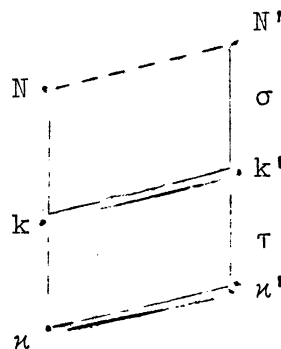
K extension biquadratique de κ est donnée, on cherche N/K quadratique telle que N/κ soit quaternionique ([2] et [3]).

La méthode utilisée ici sera de chercher l'existence et la construction d'extensions N quaternioniques sur κ , cycliques de degré 4 sur un corps k donné, extension quadratique de κ .

Pour cela nous utiliserons la méthode de Kummer, par les résolvantes de Lagrange, qui utilise les racines 4-ième de l'unité.

Donc schématiquement, nous rajoutons éventuellement les racines 4-ièmes de l'unité au corps κ , et nous cherchons alors les extensions quaternioniques de ce nouveau corps de base (de façon générale, $L' = L(\sqrt{-1})$).

Remarque : κ' et N ne sont pas toujours linéairement disjointes !



Une extension quaternionique N' sera une extension :

- cyclique de degré 4 de k' ,
- galoisienne sur κ' ,
- non abélienne sur κ' ,
- non décomposée par rapport à k' .

La difficulté réside dans la traduction de la décomposition de l'extension N'/κ' .

Nous avons différents cas à étudier provenant du fait que κ' et N sont, ou ne sont pas, linéairement indépendants sur κ :

1er cas : $-1 \in \kappa^2$, $\kappa' = \kappa$.

2e cas : $-1 \notin \kappa^2$ et $k = \kappa(\sqrt{-1})$, $k = \kappa'$.

3e cas : $-1 \notin \kappa^2$ et $-1 \in N^2$, $K = k'$.

4e cas : $-1 \notin N^2$.

Voyons les 1er et 4e cas.

1er cas : $-1 \in \kappa^2$.

k .

| $k = \kappa(\sqrt{m})$, $m \in \kappa \setminus \kappa^2$, $g = \text{Gal}(k/\kappa)$.

κ .

$$N/k \left\{ \begin{array}{l} \text{cyclique de degré } 4 \\ \text{galoisienne sur } \kappa \end{array} \right\} \longleftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mathbb{F} \text{ sous-groupe de } k^*/k^{*4}, \text{ cyclique} \\ \text{d'ordre } 4 \text{ invariant par } \text{Gal}(k/\kappa) = g \end{array} \right\}$$

(le symbole \longleftrightarrow est mis pour correspondance biunivoque). Alors g opère sur \mathbb{F} .

N/κ non abélienne $\iff g$ opère non trivialement sur \mathbb{F} .

g opère sur \mathbb{F} , on associe Φ homomorphisme de g dans $\text{Aut } X$ (X groupe des caractères de $\text{Gal}(N/k) = G$ à valeurs dans κ) de la façon suivante :

$$\tau \in g = \text{Gal}(k/\kappa), \quad \chi \in X, \quad \sigma \in G = \text{Gal}(N/k),$$

$$[\Phi(\tau)\chi](\sigma) = [\chi(\sigma^{-1})]^\tau \quad (\text{dans le cas général}).$$

D'après J. J. PAYAN [1], à partir de Φ et de \mathbb{F} uniquement, on sait reconnaître si l'extension N/κ est décomposée (à l'aide d'un 2-cocycle de X^2 à valeurs dans k^*).

Dans le cas présent,

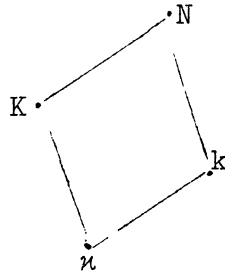
$$\Phi(\tau)\chi = \chi^{-1}.$$

Soit \mathbb{F} donné par un système de représentant ; on prend

$$\alpha \in k \setminus k^2, \quad \mathbb{F} = \{1, \alpha, \alpha^2, \alpha^3\}.$$

$$N/\kappa \left\{ \begin{array}{l} \text{galoisienne, non abélienne} \\ \text{cyclique sur } k \end{array} \right\} \iff \alpha \in k \setminus k^2 \text{ et } N_{k/\kappa}(\alpha) \in k^4 \quad (\alpha^\tau = \alpha^3).$$

Extension carrée :



Soit N/k carrée, cyclique sur k , soit $\bar{\tau}$ un relèvement de τ dans $G = \text{Gal}(N/k)$.

Notons K_1 le corps des invariants par $\bar{\tau}$. $\exists \theta \in K_1$ tel que les μ -conjugués de θ forment une base de N/k .

$\beta_{\chi^x} = \langle \theta, \chi^x \rangle^4$, $\langle \theta, \chi^x \rangle = \sum_{\sigma \in G} \chi^x(\sigma^{-1}) \theta^\sigma$, résolvante de Lagrange ; on a

$$\begin{aligned} (\langle \theta, \chi \rangle)^{\bar{\tau}} &= \langle \theta^{\bar{\tau}}, (\Phi(\tau)\chi) \rangle \\ &= \langle \theta, \Phi(\tau)\chi \rangle = \langle \theta, \chi^{-1} \rangle . \end{aligned}$$

Il est immédiat que $\beta_{\chi^x} \in k^*$ ($\langle \theta, \chi \rangle^\sigma = \chi(\sigma) \langle \theta, \chi \rangle$),

$$F = \{ \dot{\beta}_{\chi}, \dot{\beta}_{\chi^2}, \dot{\beta}_{\chi^3}, \dot{\beta}_{\chi^4} \}$$

convient, et l'on a

$$\beta_{\chi^3}^{\bar{\tau}} = \beta_{\chi^3} ; \quad N(\beta_{\chi}) \in \mu^4 ; \quad \beta_{\chi^2} \in \mu^2 ; \quad \beta_{\chi^4} \in \mu^4 ; \quad \beta_{\chi^2} / \beta_{\chi}^2 \in k^4 .$$

Il se trouve que : Inversement, si F est engendré par des éléments vérifiant ces propriétés, alors l'extension N/k associée à F est une extension carrée sur k (il faut voir qu'elle est décomposée).

THÉORÈME. - $F = \{1, \dot{\alpha}, \dot{\alpha}^2, \dot{\alpha}^3\}$ donne une extension décomposée si, et seulement si,

$$\alpha \in k \setminus k^2 \quad \underline{\text{et}} \quad N_{k/\mu}(\alpha) \in \mu^4 .$$

(On prend $\beta_{\chi} = \alpha$, $\beta_{\chi^3} = \alpha^{\bar{\tau}}$, $\beta_{\chi^4} = 1$, et $\beta_{\chi^2} = [a^4(\alpha + \alpha^{\bar{\tau}} + 2a^2)]^2$, avec $N_{k/\mu}(\alpha) = a^4$.)

On en déduit le théorème suivant, en prenant ($-1 \in \mu^2$) :

THÉORÈME. - k extension quadratique de \mathfrak{n} , se plonge dans une extension carrée (resp. quaternionique) cyclique sur k , si, et seulement si,

$$\exists \alpha \in k \setminus k^2, \quad N_{k/\mathfrak{n}}(\alpha) = a^4, \quad a \in \mathfrak{n}.$$

En effet, $k(\sqrt[4]{\alpha})/\mathfrak{n}$ carrée $\iff k(\sqrt[4]{m\alpha})/\mathfrak{n}$ quaternionique ($k = \mathfrak{n}(\sqrt{m})$), car

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{k/\mathfrak{n}}(\alpha) \in \mathfrak{n}^4 \\ \alpha \in k \setminus k^2 \end{array} \right\} \iff \left\{ \begin{array}{l} N_{k/\mathfrak{n}}(m\alpha) \in k^4 \setminus \mathfrak{n}^4 \\ m\alpha \in k \setminus k^2 \end{array} \right\},$$

puisque N/\mathfrak{n} dans les deux cas est galoisienne, non abélienne, cyclique sur k .

Existence :

$$N_{k/\mathfrak{n}}(\alpha) = a^4 \iff \exists \mu \in k^*, \quad \alpha = a^2 \frac{\mu}{\mu^\tau},$$

$$\alpha \text{ non carré} \iff \mu\mu^\tau \text{ non carré de } k;$$

il n'y a existence que si $\exists \mu \in k : N(\mu) \notin \mathfrak{n}^2 \cup m\mathfrak{n}^2$, donc

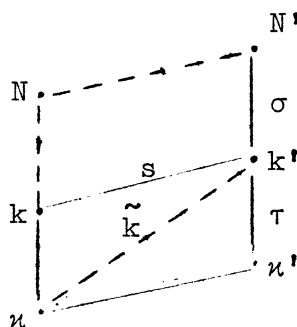
$$\text{Card}(N(k^*)/\mathfrak{n}^{*2}) > 2.$$

Sous-corps quadratiques : l'un correspond à

$$\sqrt[2]{\frac{\beta}{\chi^2}} \quad \text{②} \quad \alpha + \alpha^\tau + 2a^2 \quad \text{②} \quad \mu\mu^\tau.$$

Ce sont k , $\mathfrak{n}(\sqrt{\mu\mu^\tau})$ et $\mathfrak{n}(\sqrt{m\mu\mu^\tau})$.

4e cas : $-1 \notin N^2$.



Il est clair que : N/\mathfrak{n} carrée (resp. quaternionique) $\implies N'/\mathfrak{n}'$ carrée (resp. quaternionique).

Inversement : Soit N' une extension cyclique de degré 4 de k' , et notons :

- σ le générateur de $\text{Gal}(N'/k')$,
- s le générateur de $\text{Gal}(k'/k)$,
- τ le générateur de $\text{Gal}(k'/\mathfrak{n}')$.

THÉOREME. - N' contient une sous-extension N carrée sur κ , cyclique sur k (resp. quaternionique sur κ) si, et seulement si :

- N'/κ' est carrée sur κ' (resp. quaternionique) ;
- N'/k est abélienne décomposée ;
- Un relèvement de s et un relèvement de τ (dans $\text{Gal}(N'/\kappa)$) commutent.

$$N_1 \text{ invariants de } N' \text{ pour } \langle 1, \bar{s} \rangle, \quad N_1 = K(\sqrt{\theta}),$$

$$N_2 \text{ invariants de } N' \text{ pour } \langle 1, \bar{s}\sigma^2 \rangle, \quad N_2 = K(\sqrt{-\theta}).$$

En explicitant, on arrive à :

Extension carrée (resp. quaternionique), si $\exists \alpha \in k' \setminus k'^2$,

$$\alpha\alpha^s = a^4, \quad a \in k,$$

$$\alpha\alpha^\tau = b^4, \quad b \in \kappa' \quad (\text{resp. } \alpha\alpha^\tau = m^2 b^4),$$

$$aa^\tau = bb^s \quad (\text{resp. } aa^\tau = mbb^s).$$

Dans le cas de l'extension carrée, on peut toujours se ramener au cas où $\alpha \in \tilde{k} = \kappa(\sqrt{-m})$ avec $N_{\kappa/\kappa'}(\alpha) \in \kappa'^4$ et $\alpha \in k' \setminus k'^2$.

Résultats dans le cas où $\kappa = \mathbb{Q}$: $-1 \notin \mathbb{Q}^2$, et -1 n'est pas somme de carrés dans \mathbb{Q} .

- Extensions carrées cycliques sur $\mathbb{Q}' = \mathbb{Q}(\sqrt{-1})$:

$$N = \mathbb{Q}'(\sqrt[4]{\alpha}), \quad |\alpha| \in \mathbb{Q} \setminus \mathbb{Q}^2.$$

- Extensions carrées cycliques sur $k = \mathbb{Q}(\sqrt{m})$, contenant \mathbb{Q}' : Condition nécessaire et suffisante d'existence : $-m$, somme de deux carrés de \mathbb{Q} sans être un carré dans \mathbb{Q} .

On prend

$$N = K(\sqrt{\alpha}), \quad \alpha \in \mathbb{Q}', \quad N_{\mathbb{Q}'/\mathbb{Q}}(\alpha) = -m.$$

- Extensions carrées linéairement disjointes de \mathbb{Q}' : $N(k^*)/\mathbb{Q}^{*2}$ est infini, donc tout corps k se plonge dans une extension carrée, cyclique sur k .

On prend

$$\mu \in \tilde{k} = \mathbb{Q}(\sqrt{-m}), \quad \text{avec } N_{\kappa/\mathbb{Q}}(\mu) \notin k'^2 = \mathbb{Q}^2(\sqrt{m}, \sqrt{-1}), \quad a \in \mathbb{Q}^*.$$

$$N' = k'(\sqrt[4]{\alpha}), \quad \alpha = a^2 \frac{\mu}{\mu^s}$$

contient deux extensions, carrées sur \mathbb{Q} , cycliques sur k .

- Extensions quaternioniques de \mathbb{Q} : $k = \mathbb{Q}(\sqrt{m})$, m quadratfrei, entier.

k se plonge dans une extension quaternionique si, et seulement si, m est somme de trois carrés.

Soit

$$m > 0, \quad m \not\equiv -1(8) .$$

Construction :

$$m = p^2 + q^2 + r^2, \quad u = p + \sqrt{m}, \quad v = r + s\sqrt{-1} ;$$

$$\alpha = mu^2 \frac{v}{v^s} a^2 \frac{\lambda}{\lambda^s}, \quad a \in \mathbb{Q}, \quad \lambda \in \tilde{k}, \quad \lambda\lambda^s vv^s \notin k'^2 .$$

Les sous-corps quadratiques sont $\mathbb{Q}(\sqrt{\lambda\lambda^s vv^s})$ et $\mathbb{Q}(\sqrt{m\lambda\lambda^s vv^s})$.

L'étude des propriétés arithmétiques de ces extensions N/\mathbb{Q} non abéliennes, des extensions non ramifiées, et le calcul du discriminant de N/\mathbb{Q} sont en cours.

L'ensemble de ce travail sera publié ultérieurement. Il est effectué en commun avec J. J. PAYAN [1].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PAYAN (J. J.). - Le critère de décomposition d'une extension sur un sous-corps du corps de base (à paraître).
- [2] ROSENBLÜTH (Emanuel). - Die arithmetische Theorie und die Konstruktion der Quaternionenkörper auf klassenkörpertheoretischer Grundlage, Monatsh. für Math., t. 41, 1934, p. 85-125.
- [3] WITT (Ernst). - Theorie der quadratischen Formen in beliebigen Körpern, J. für die reine und angew. Math., t. 176, 1937, p. 31-44.