

Feuille d'exercices 3

1 Extensions de corps, groupes de Galois

Exercice 1. *Montrer que si a et b sont deux éléments non nuls d'un corps K de caractéristique différente de 2, $K(\sqrt{a})$ est égal à $K(\sqrt{b})$ si et seulement si b/a est un carré dans K .*

Exercice 2. *Soit $K = \mathbb{Q}(i + \sqrt{2})$. Montrer que K est galoisien sur \mathbb{Q} . Calculer le degré de K sur \mathbb{Q} et le groupe de Galois de K/\mathbb{Q} . Donner la liste des sous-corps de K .*

Exercice 3. *Soit $L = \mathbb{Q}(\sqrt{5})$ et $M = \mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}})$. Déterminer les degrés des extensions L/\mathbb{Q} , M/\mathbb{Q} et M/L . Indiquer lesquelles de ces extensions sont galoisiennes. Déterminer les polynômes minimaux de $\sqrt{2 + \sqrt{5}}$ sur \mathbb{Q} et sur L . Soit a et b deux rationnels tels que $a^2 - 4b$ soit positif mais pas un carré rationnel, et b négatif. Montrer que le polynôme $X^4 + aX^2 + b$ est irréductible sur \mathbb{Q} et que son corps de rupture n'est pas galoisien sur \mathbb{Q} .*

Exercice 4. *Trouver a et b entiers tels que le polynôme $X^4 + aX^2 + b$ soit irréductible sur \mathbb{Q} et que son corps de rupture soit galoisien sur \mathbb{Q} .*

Exercice 5. *Soit $K = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$, L la clôture galoisienne de K sur \mathbb{Q} . Calculer le degré de L sur \mathbb{Q} , le groupe de Galois de L/K . Donner la liste des sous-corps de L .*

Exercice 6. *On rappelle que, si L/K est une extension cubique de corps de caractéristique différente de 3, L est engendré par une racine α d'un polynôme de $K[X]$ de la forme $X^3 + pX + q$. Montrer que si la caractéristique est aussi différente de 2, l'extension L/K est galoisienne si et seulement si le discriminant $\Delta = -(4p^3 + 27q^2)$ est un carré dans K .*

Exercice 7. *Soit G le groupe de Galois de $X^5 - 2$. Quel est le cardinal de G ? Est-il abélien, réductible?*

Exercice 8. *Quel est le degré du corps de rupture du polynôme $(X^3 - 5)(X^3 - 7)$ sur \mathbb{Q} ?*

Exercice 9. *Déterminez le groupe de Galois de $X^6 - 5$ sur \mathbb{Q} , \mathbb{R} .*

Exercice 10. *Trouvez un élément primitif de $\mathbb{Q}[\sqrt{3}, \sqrt{7}]$.*

Exercice 11. *Soit G le groupe de Galois de $(X^3 - 5)(X^4 - 2)$ sur \mathbb{Q} .*

1) *Donner un ensemble de générateurs de G ainsi que l'ensemble de relations entre eux.*

2) *G est-il un groupe cyclique, diédral, symétrique?*

Exercice 12. *Trouvez un élément primitif du corps de rupture de $(X^2 - 2)(X^2 - 5)(X^2 - 7)$.*

Exercice 13. *Soit ζ une racine primitive 12-ième de l'unité. Combien y a-t-il d'extension comprises entre $\mathbb{Q}[\zeta^3]$ et $\mathbb{Q}[\zeta]$.*

Exercice 14. *Soit ζ une racine primitive 5-ième de l'unité.*

(1) *Décrivez le groupe de Galois de $K = \mathbb{Q}[\zeta]/\mathbb{Q}$ et montrez que K contient un unique sous-corps de degré 2 sur \mathbb{Q} à savoir $\mathbb{Q}[\zeta + \zeta^4]$.*

(2) *Donnez le polynôme minimal de $\zeta + \zeta^4$ sur \mathbb{Q} .*

(3) *Donnez le groupe de Galois de $(X^2 - 5)(X^5 - 1)$.*

(4) *Donnez le groupe de Galois de $(X^2 + 3)(X^5 - 1)$.*

Exercice 15. *Notons K le corps $\mathbb{Q}(\sqrt{-15})$, f son automorphisme non trivial, et α un élément de K tel que le polynôme $X^3 - \alpha$ soit irréductible sur K . Pourquoi existe-t-il de tels α ? On note L le corps de décomposition de ce polynôme, et $\{\theta, \rho\theta, \rho^2\theta\}$ ses différentes racines dans L .*

- 1) Pourquoi sont-elles de cette forme?
- 2) Montrer que L est une extension galoisienne de K de degré 6, et que L contient $\sqrt{5}$.
- 3) Montrer qu'il existe deux K -automorphismes σ et τ de L tels que

$$\sigma(\sqrt{5}) = \sqrt{5}, \quad \sigma(\theta) = \rho\theta, \quad \tau(\sqrt{5}) = -\sqrt{5}, \quad \tau(\theta) = \theta.$$

- 4) Déterminer l'ordre des éléments σ et τ du groupe $\text{Gal}(L/K)$ et calculer $\tau\sigma\tau^{-1}$. Etablir la liste des extensions de K contenues dans L .
- 5) On suppose désormais que $N_{K/\mathbb{Q}}(\alpha)$ est le cube d'un nombre rationnel b (on admettra que c'est possible). Déterminer les différents conjugués de θ sur \mathbb{Q} . Montrer que l'extension L/\mathbb{Q} est galoisienne de degré 12. Prouver qu'il est possible de prolonger l'automorphisme f de K en un automorphisme ϕ de L tel que $\phi(\sqrt{5}) = \sqrt{5}$ et $\phi(\theta) = b/\theta$. Calculer ϕ^2 , $\phi\sigma\phi^{-1}$ et $\phi\tau\phi^{-1}$. Montrer que $\mathbb{Q}(\sqrt{5})$ admet une extension de degré 3 contenue dans L et galoisienne sur \mathbb{Q} .

Exercice 16. a) Montrer que le polynôme $P_1(T) = T^3 - 7T + 7$ a trois racines réelles x_1, x_2 et x_3 vérifiant $x_1 > x_2 > 0 > x_3$. Calculer le degré de l'extension $M = \mathbb{Q}(x_1)$ de \mathbb{Q} .

b) Montrer que l'extension M/\mathbb{Q} est galoisienne, et décrire son groupe de Galois.

c) On note $\pm y_1, \pm y_2$ et $\pm y_3$ les racines de $P_2(T) = T^6 - 7T^2 + 7$, numérotées de façon que $x_i = y_i^2$, et L le corps $\mathbb{Q}(y_1, y_2, y_3)$.

i) Montrer que y_3 n'appartient pas à $\mathbb{Q}(y_1, y_2)$.

ii) Montrer que y_2 n'appartient pas à $\mathbb{Q}(y_1)$.

iii) Calculer le degré de M sur L .

iv) L'extension L/\mathbb{Q} est-elle galoisienne? Abélienne?

d) On note G le groupe $\text{Aut}(L)$. Montrer que, pour $i \in \{1, 2, 3\}$, il existe deux éléments τ_i et τ'_i de G tels que, pour $j \neq i$, on ait

$$\tau_i(y_i) = -y_i, \quad \tau'_i(y_i) = y_i, \quad \tau_i(y_j) = y_j, \quad \tau'_i(y_j) = -y_j.$$

Montrer qu'il existe un élément τ de G tel que

$$\forall i \in \{1, 2, 3\}, \quad \tau(y_i) = -y_i.$$

Donner la liste des sous-corps N de L contenant M et tels que $[L : N] = 2$.

e) Montrer qu'il existe un élément σ de G tel que

$$\sigma(y_1) = y_2, \quad \sigma(y_2) = y_3, \quad \sigma(y_3) = y_1,$$

et calculer

$$\tau_1\sigma\tau_3, \quad \tau_1\sigma^2\tau_1, \quad \tau'_3\sigma\tau'_2.$$

f) Montrer que $\sqrt{-7}$ appartient à L et déterminer le groupe $\text{Aut}(L/\mathbb{Q}(\sqrt{-7}))$.

g) On pose $\theta = y_1 + y_2 + y_3$. Calculer le degré de θ sur \mathbb{Q} (on pourra étudier les images de θ sous l'action de G). Quelle est la structure du groupe $\text{Aut}(L/\mathbb{Q}(\theta))$? Est-il distingué dans G ?

h) Indiquer combien de sous-corps de $\mathbb{Q}(\theta)$ contiennent $\sqrt{-7}$.

Exercice 17. Montrer que si K est un corps de caractéristique p non nulle, le corps $M = K(X, Y)$ des fractions rationnelles en deux indéterminées à coefficients dans K est une extension de degré p^2 de son sous-corps $L = K(X^p, Y^p)$. Montrer que si α est un élément de M qui n'est pas dans L , son polynôme minimal sur L est de degré p . En déduire que le mot "séparable" dans l'énoncé du théorème de l'élément primitif n'est pas inutile.

Exercice 18. On note L le corps de décomposition dans \mathbb{C} du polynôme $P = T^4 - 3T - 3$.

- Montrer que le polynôme P est irréductible sur \mathbb{Q} , et qu'il admet dans \mathbb{C} deux racines réelles x et y , et un couple (z, \bar{z}) de racines complexes conjuguées l'une de l'autre.
- Notons $T^2 + aT + b$ et $T^2 - aT + b'$ les polynômes unitaires de degré 2 qui divisent P dans $\mathbb{R}[X]$. Montrer que a est une racine du polynôme $X^6 + 12X^2 - 9$, et calculer le degré de a^2 sur \mathbb{Q} .
- Montrer que $[L : \mathbb{Q}]$ est un multiple de 12.
- Montrer que le groupe alterné \mathcal{A}_4 est le seul sous-groupe d'indice 2 du groupe symétrique \mathcal{S}_4 .
- Montrer qu'il existe un automorphisme de L qui échange z et \bar{z} et qui laisse x fixe. Déterminer le groupe de Galois de L/\mathbb{Q} . Combien L a-t-il de sous-corps ?

Exercice 19. (1) Soit $E \subset F$ une extension quadratique et soit $x \in F \setminus E$ tel que $x^2 \in E$. Si $a \in F$ est un carré montrez que ou bien a est un carré dans E ou bien ax^2 est un carré dans E .

(2) Soient p_1, \dots, p_n des nombres premiers distincts. On considère les propriétés suivantes:

(a_n) le corps $\mathbb{Q}[\sqrt{p_1}, \dots, \sqrt{p_n}]$ est de degré 2^n sur \mathbb{Q} ;

(b_n) $x \in \mathbb{Q}$ est un carré dans $\mathbb{Q}[\sqrt{p_1}, \dots, \sqrt{p_n}]$ si et seulement s'il existe une partie $I \subset \{1, \dots, n\}$ telle que $x \prod_{i \in I} p_i$ est un carré dans \mathbb{Q} .

(i) Montrez que $(a_n) \wedge (b_n) \Rightarrow (a_{n+1})$.

(ii) Montrez que $(a_n) \wedge (b_{n-1}) \Rightarrow (b_n)$.

(iii) En déduire que (a_n) et (b_n) sont vraies pour tout n .

(iv) Montrez que la famille $\sqrt{2}, \sqrt{3}, \dots$ des racines carrées des nombres premiers, est libre sur \mathbb{Q} .

Exercice 20. Soit $P(X) = a_n X^n + \dots + a_0 \in \mathbb{C}[X]$; on veut prouver que P est totalement décomposé dans $\mathbb{C}[X]$.

(1) Montrer que $Q(X) = (X^2 + 1)P(X)\bar{P}(X) \in \mathbb{R}[X]$.

(2) On note D le corps de décomposition sur \mathbb{R} de Q et on note G le groupe de Galois de D/\mathbb{R} de cardinal 2^m avec m impair.

(i) Montrer que $n \geq 1$.

(ii) En notant que tout polynôme réel de degré impair admet au moins une racine réelle, montrer, en utilisant le théorème de Sylow, que $m = 1$.

(iii) En notant que tout nombre complexe est le carré d'un nombre complexe, montrer, en utilisant le théorème de Sylow, que $n = 1$.

(iv) Montrer que $D = \mathbb{C}$ et conclure.

2 Nombres transcendants

Exercice 1. e est irrationnel: on considère la suite (u_n) définie par récurrence: $u_0 = 1$ et $u_{n+1} = u_n + \frac{1}{(n+1)!}$.

(a) Montrez que (u_n) converge; on notera e sa limite.

(b) On suppose qu'il existe $a, b \in \mathbb{N}$ tels que $e = a/b$ ($b \neq 0$ avec a et b premiers entre eux). En étudiant $\alpha = (k!)(e - u_k)$ pour $k > b$, montrez que l'on aboutit à une contradiction.

Exercice 2. π^2 est irrationnel: Soit $f_n(x) = \frac{x^n(1-x)^n}{n!}$.

(a) Montrez que pour tout $m \geq 0$, $f_n^{(m)}(0) \in \mathbb{Z}$.

(b) On suppose qu'il existe $a, b \in \mathbb{N}$ premiers entre eux et $b \neq 0$ tels que $\pi^2 = a/b \in \mathbb{Q}$ et on pose

$$G_n(x) = b^n [\pi^{2n} f_n(x) - \pi^{2n-2} f_n''(x) + \dots + (-1)^n f_n^{(2n)}(x)].$$

Montrez que $G_n(0)$ et $G_n(1)$ sont des entiers.

(c) Montrez que

$$\pi \int_0^1 a^n \sin(\pi x) f_n(x) dx = G_n(0) + G_n(1)$$

et conclure.

Exercice 3. e est transcendant: (a) Soit $P \in \mathbb{R}[X]$ de degré m ; montrez que

$$I_P(t) = \int_0^t e^{t-u} P(u) du = e^t \sum_{i=0}^m P^{(i)}(0) - \sum_{i=0}^m P^{(i)}(t).$$

(b) Soient $a_0, \dots, a_n \in \mathbb{Z}$ tels que $a_0 + a_1 e + \dots + a_n e^n = 0$ avec $a_0 \neq 0$ et $a_n \neq 0$. On pose pour tout $0 < p \in \mathbb{N}$: $f(x) = x^{p-1}(x-1)^p \dots (x-n)^p$ ainsi que $J_p = a_0 I_f(0) + \dots + a_n I_f(n)$. Montrez que $J_p \in \mathbb{Z}$ puis que si p est un nombre premier assez grand, J_p est divisible par $(p-1)!$ mais pas par $p!$.

(c) Montrez qu'il existe une constante c indépendante de p , telle que $|J_p| \leq c^p$ et conclure.

Exercice 4. Approximation des réels par des rationnels

(i) Soient $p/q \neq a/b$ des rationnels distincts. Montrez que $|p/q - a/b| \geq 1/bq$.

(ii) (a) Soit $P \in \mathbb{Z}[X]$ un polynôme de degré n ne possédant aucune racine rationnelle (i.e. $\forall x \in \mathbb{Q}, P(x) \neq 0$). Soit $x \in \mathbb{R}$ un irrationnel tel que $P(x) = 0$. Montrez que pour tout $\delta > 0$ et tout $p/q \in \mathbb{Q}$ avec p et q premiers entre eux et $q > 0$, tel que $|p/q - x| \leq \delta$, il existe une constante $K(x, \delta)$ qui ne dépend que de x et de δ telle que $|p/q - x| \geq K(x)/q^n$.

(b) Soit $x = \sum_{i=1}^{+\infty} 10^{-i!}$. Justifiez cette écriture et montrez que x est irrationnel. On considère alors $I_x = \{P \in \mathbb{Q}[X], P(x) = 0\} = (\mu_x)$ avec $\mu_x \in \mathbb{Z}[X]$ qu'on appelle le polynôme minimal de x sur \mathbb{Q} . **On suppose** que μ_x est non nul et on note n son degré. Montrez que μ_x n'a pas de racines rationnelles. En considérant les rationnels $x_k = \sum_{i=1}^k 10^{-i!}$ pour $k \geq n$, montrez que l'on aboutit à une contradiction.

(iii) Soit $x \in \mathbb{R}$ un irrationnel. Soit alors (p_n/q_n) une suite de rationnels écrite sous forme réduite (i.e. p_n et q_n premiers entre eux et $q_n > 0$), convergeant vers x . Montrez que (q_n) tend vers l'infini.

Exercice 5. Transcendance de π : DEVOIR A RENDRE au choix avec l'exercice 16 du 1)

(i) Soit f un polynôme à coefficients réels de degré m . Montrez que pour tout nombre complexe z , l'intégrale complexe

$$I(f; z) = \int_0^1 z e^{z(1-u)} f(zu) dz$$

vérifie

$$I(f; z) = e^z \sum_{j=0}^m f^{(j)}(0) - \sum_{j=0}^m f^{(j)}(z)$$

ainsi que la majoration

$$|I(f; z)| \leq |z| e^{|z|} \sup_{u \in [0,1]} |f(zu)|$$

(ii) Soit f un polynôme à coefficients entiers. Montrez que pour tout $n \geq 0$, il existe un polynôme f_n à coefficients entiers tel que $f^{(n)} = n! f_n$.

(iii) Pour un polynôme f et $g : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction, on note $\sum_{f(\alpha)=0} g(\alpha)$ la somme $g(\alpha_1) + \dots + g(\alpha_n)$ où les α_i sont les racines de f répétées autant de fois que leur multiplicité. Montrez que si f est à coefficients entiers de coefficient a , alors pour tout $n \geq 0$, $a^n \sum_{f(\alpha)=0} \alpha^n$ appartient à \mathbb{Z} .

Indication: on pourra introduire une matrice dont la trace est $a^n \sum_{f(\alpha)=0} \alpha^n$.

(iv) Soit f un polynôme à coefficients entiers tel que $f(0) \neq 0$ et de coefficient dominant a . Pour p un nombre premier, soit $g(x) = x^{p-1}f^p(x)$ et $J_p = \sum_{f(\alpha)=0} I(g; \alpha)$. Montrez qu'il existe un entier M tel que

$$\frac{a^{m-p}}{(p-1)!} J_p = a^{m-p} N f(0)^p + pM$$

où $N = \sum_{f(\alpha)=0} e^\alpha$. En déduire que N n'est pas un entier non nul.

(v) On veut montrer que π est transcendant. On raisonne par l'absurde: soit f un polynôme irréductible à coefficients entiers tel que $f(i\pi) = 0$ dont on note $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ les racines.

(a) En développant l'égalité $\prod_{f(\alpha)=0} (1 + e^\alpha)$ montrez que

$$\sum_{\epsilon \in \{0,1\}^n} \exp\left(\sum \epsilon_j \alpha_j\right) = 0.$$

(b) Soit $Q(X) = \prod_{\epsilon \in \{0,1\}^n} (X - \sum \epsilon_j \alpha_j)$. Montrez que $Q(X) \in \mathbb{Q}[X]$.

(c) En utilisant la question (4), aboutissez à une contradiction.

3 Construction à la règle et au compas

Soit Σ un ensemble de points du plan \mathbb{R}^2 ; on dit qu'un point P est constructible à la règle et au compas à partir de Σ s'il existe un entier n et une suite de points $P_1, \dots, P_n = P$ tels que pour tout $i \in \{1, \dots, n\}$, notant $\Sigma_i = \Sigma \cup \{P_1, \dots, P_{i-1}\}$, il existe 4 points $A, B, A', B' \in \Sigma_i$ tels que l'une des propriétés suivantes soit vérifiée:

- P_i est le point d'intersection des droites non parallèles (AB) , $(A'B')$;
- P_i est l'un des deux points d'intersection de la droite (AB) et du cercle de centre A' passant par B' ;
- P_i est l'un des points d'intersection des cercles centrés en A, A' et passant respectivement par B, B' .

Un réel x est dit constructible à partir de Σ si le point $(x, 0)$ de \mathbb{R}^2 l'est. Un nombre complexe z est dit constructible à partir de Σ si le point si sa partie réelle et imaginaire l'est.

- (1) Soit Σ une partie de \mathbb{R}^2 contenant $0, 1$ et soit C_Σ l'ensemble des points constructibles à partir de Σ . Montrez que si $x, y \in C_\Sigma$ alors $x + y, x - y, xy, x/y, \sqrt{x}$ sont aussi dans C_Σ .
- (2) Désormais $\Sigma = \{0, 1\}$. Montrez qu'un réel x est constructible si et seulement s'il existe un entier n et une suite de sous-corps de \mathbb{R} : $\mathbb{Q} = E_0 \subset E_1 \subset \dots, E_n$ tels que pour tout i , $[E_i : E_{i-1}] = 2$ et $x \in E_n$.
- (3) En déduire que si x est constructible, alors x est algébrique de degré une puissance de 2.
- (4) Que pensez-vous des problèmes de la duplication du cube, de la trisection des angles et de la quadrature du cercle.
- (5) Montrez que $x \in \mathbb{R}$ est constructible si et seulement si le sous-corps de \mathbb{C} engendré par x et ses conjugués est de degré une puissance de 2: autrement dit si le corps de décomposition de x est de degré une puissance de 2.
- (6) Montrez que les polygones réguliers constructibles sont les $2^s p_1 \dots p_r$ où les p_i sont des nombres premiers de Fermat.