

ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES,
ÉCOLES NATIONALES SUPÉRIEURES DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE,
DE TECHNIQUES AVANCÉES, DES TÉLÉCOMMUNICATIONS,
DES MINES DE PARIS, DES MINES DE SAINT-ETIENNE, DES MINES DE NANCY,
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS DE BRETAGNE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
(OPTION TA)

CONCOURS D'ADMISSION 1996

MATHÉMATIQUES

DEUXIÈME ÉPREUVE

OPTION M

(Durée de l'épreuve : 4 heures)

Les candidats sont priés de mentionner de façon apparente sur la première page de la copie : MATHÉMATIQUES II - M.

L'énoncé de cette épreuve, particulière aux candidats de l'option M, comporte 6 pages.

Nombres algébriques et nombres transcendants.

Dans tout le problème \mathbb{K} est un sous-corps du corps des réels \mathbb{R} et $\mathbb{K}[X]$ le \mathbb{K} -espace vectoriel des polynômes sur \mathbb{K} . Par définition, un réel α est algébrique sur le corps \mathbb{K} si et seulement si le réel α est racine d'un polynôme P , autre que le polynôme nul, appartenant à $\mathbb{K}[X]$. Dans le cas contraire, le réel α est transcendant sur le corps \mathbb{K} .

Le but de ce problème est d'établir des propriétés simples des nombres algébriques et transcendants sur un corps \mathbb{K} , d'en donner des exemples lorsque le corps \mathbb{K} est celui des rationnels puis d'appliquer les résultats obtenus pour caractériser des figures géométriques constructibles "à la règle et au compas".

Première Partie

Soient \mathbb{K} un sous-corps de \mathbb{R} et α un réel algébrique sur le corps \mathbb{K} ; désignons par $\mathfrak{J}(\alpha)$ l'ensemble des polynômes P appartenant à $\mathbb{K}[X]$ qui admettent α comme racine :

$$\mathfrak{J}(\alpha) = \{ P \mid P \in \mathbb{K}[X], P(\alpha) = 0 \}.$$

I-1°) $\mathfrak{J}(\alpha)$ est un idéal de $\mathbb{K}[X]$:

- a. Démontrer que $\mathfrak{J}(\alpha)$ est un idéal de $\mathbb{K}[X]$. En déduire l'existence d'un polynôme M_α unitaire (le coefficient du terme de M_α de plus haut degré est égal à 1) unique tel que $\mathfrak{J}(\alpha)$ soit l'ensemble des polynômes de $\mathbb{K}[X]$ proportionnels à M_α dans $\mathbb{K}[X]$.

$$\mathfrak{J}(\alpha) = \{ P \mid \exists Q \in \mathbb{K}[X] ; P = M_\alpha \cdot Q \}.$$

- b. Démontrer que, pour qu'un polynôme P , appartenant à $\mathbb{K}[X]$, unitaire et irréductible dans $\mathbb{K}[X]$, soit le polynôme M_α , il faut et il suffit que le réel α soit racine du polynôme P .

Par définition le polynôme M_α est le polynôme minimal de α sur \mathbb{K} , le degré du polynôme M_α , noté $d(\alpha, \mathbb{K})$, est le degré de α sur \mathbb{K} . Soit $\mathbb{K}[\alpha]$ le \mathbb{K} -espace vectoriel engendré par la famille des réels $1, \alpha, \dots, \alpha^q, \dots$: $\mathbb{K}[\alpha] = \{x \mid x = \sum_{p=0}^q x_p \alpha^p, q \in \mathbb{N}, x_p \in \mathbb{K}\}$. Il est admis que l'ensemble $\mathbb{K}[\alpha]$ est, pour les lois de composition somme et produit, un anneau.

I-2°) Le degré de α sur \mathbb{K} est égal à 1 :

Le réel α et le corps \mathbb{K} étant donnés, démontrer l'équivalence entre les affirmations suivantes :

i/ le réel α appartient à \mathbb{K} , ii/ le degré de α sur \mathbb{K} est égal à 1; iii/ $\mathbb{K}[\alpha]$ est égal à \mathbb{K} .

I-3°) Dans cette question le degré de α sur \mathbb{K} est égal à 2 .

- a. Préciser la dimension de $\mathbb{K}[\alpha]$; démontrer que $\mathbb{K}[\alpha]$ est un corps.
- b. Démontrer qu'il existe un réel k ($k > 0$) appartenant au corps \mathbb{K} tel que les deux corps $\mathbb{K}[\alpha]$ et $\mathbb{K}[\sqrt{k}]$ soient égaux.

Par définition, dans ce cas ($d(\alpha, \mathbb{K}) = 2$), $\mathbb{K}[\alpha]$ est une extension quadratique de \mathbb{K} .

I-4°) Dans cette question le degré de α sur \mathbb{K} est égal à un entier $n \geq 2$:

- a. Démontrer qu'à tout réel x appartenant à l'espace vectoriel $\mathbb{K}[\alpha]$ est associé de manière unique un polynôme R de degré inférieur ou égal à $n-1$ appartenant à $\mathbb{K}[X]$ tel que :
- $$x = R(\alpha) .$$

En déduire une base du \mathbb{K} -espace vectoriel $\mathbb{K}[\alpha]$ et sa dimension.

- b. Démontrer que, pour tout réel x (différent de 0) de $\mathbb{K}[\alpha]$, le polynôme R ainsi associé est premier avec le polynôme minimal M_α . En déduire l'existence d'un polynôme U de $\mathbb{K}[X]$ tel que la relation $U(\alpha).R(\alpha) = 1$ ait lieu.
- c. Démontrer que l'anneau $\mathbb{K}[\alpha]$ est un corps.
- d. Démontrer que l'ensemble $\mathbb{K}[\alpha]$ est le plus petit corps admettant α comme élément, contenant \mathbb{K} et contenu dans \mathbb{R} ($\alpha \in \mathbb{K}[\alpha], \mathbb{K} \subset \mathbb{K}[\alpha] \subset \mathbb{R}$).

Le corps \mathbb{K} est maintenant le corps des rationnels \mathbb{Q} . Considérons la suite des polynômes définis, pour tout réel x et pour tout entier naturel n , par les relations :

$$P_0(x) = 1, P_1(x) = 2x + 1; P_{n+2}(x) = 2x P_{n+1}(x) - P_n(x).$$

Soit Q_n le polynôme défini par la relation : $Q_n(x) = P_n\left(\frac{x}{2}\right)$.

I-5°) Propriétés générales des polynômes P_n :

- Déterminer le degré du polynôme P_n , $n \geq 0$; préciser le coefficient du terme de plus haut degré et le terme constant. Déterminer les polynômes : P_2, P_3, P_4 . Démontrer que les coefficients des polynômes Q_n , $n \geq 0$, sont des entiers relatifs.
- Démontrer que les seules racines rationnelles possibles du polynôme Q_n sont les entiers 1 et -1 . Exprimer l'expression $Q_{n+3}(x) + x Q_n(x)$ en fonction du polynôme $Q_{n+1}(x)$. En déduire que les racines rationnelles éventuelles des polynômes Q_{n+3} et Q_n sont les mêmes. Préciser les polynômes P_n qui ont une racine rationnelle.

I-6°) Racines du polynôme P_n :

Soit θ un réel donné compris strictement entre 0 et π ($0 < \theta < \pi$). Considérons la suite $(u_n)_{n \geq 0}$ définie par la donnée de u_0 et de u_1 et la relation de récurrence :

$$\text{pour tout entier naturel } n, u_{n+2} = 2 u_{n+1} \cos \theta - u_n.$$

- Déterminer l'expression du terme général u_n de la suite ci-dessus en fonction des réels n, θ et de deux scalaires λ et μ déterminés par θ, u_0 et u_1 .
- Utiliser les résultats précédents pour exprimer le réel $v_n = P_n(\cos \theta)$ en fonction des réels n et θ . En déduire toutes les racines du polynôme P_n notées $x_{k,n}$, $1 \leq k \leq n$.
- Démontrer que les trois nombres réels $\cos\left(\frac{2\pi}{5}\right)$, $\cos\left(\frac{2\pi}{7}\right)$ et $\cos\left(\frac{2\pi}{9}\right)$ sont algébriques sur \mathbb{Q} . Déterminer leur polynôme minimal.

I-7°) Dans cette question le réel α est le nombre algébrique sur \mathbb{Q} , $\cos\left(\frac{2\pi}{9}\right)$:

- Démontrer que la dimension de l'espace vectoriel $\mathbb{Q}[\alpha]$ est trois et qu'une de ses bases est $\mathfrak{B} = (1, \alpha, \alpha^2)$. Donner l'expression dans cette base des réels $\cos\left(\frac{4\pi}{9}\right)$, $\cos\left(\frac{8\pi}{9}\right)$.
- Soit f un endomorphisme de l'espace vectoriel $\mathbb{Q}[\alpha]$; supposons que, pour tout couple de réels x et y appartenant à $\mathbb{Q}[\alpha]$, la relation $f(x.y) = f(x).f(y)$ ait lieu. Déterminer les différentes images possibles des réels 1 et α dans la base \mathfrak{B} . En déduire que l'ensemble de ces endomorphismes est, pour la loi de composition des endomorphismes, un groupe à trois éléments f_1, f_2, f_3 . Déterminer les matrices associées à ces endomorphismes f_1, f_2, f_3 dans la base \mathfrak{B} .

I-8°) Exemple de nombres transcendants sur \mathbb{Q} :

Soit S un polynôme, appartenant à $\mathbb{Q}[X]$, de degré $n \geq 2$, irréductible sur \mathbb{Q} .

a. Démontrer qu'il existe un entier naturel C_S (différent de 0) tel que pour tout rationnel $r = \frac{p}{q}$ (le couple (p, q) appartient à $\mathbb{Z} \times \mathbb{N}^*$) il vienne : $|S(r)| \geq \frac{1}{C_S q^n}$.

b. Supposons que le réel α soit une racine de S . Dédurre du résultat précédent l'existence d'une constante K , strictement positive, telle que pour tout rationnel $r = \frac{p}{q}$ appartenant à l'intervalle $[\alpha-1, \alpha+1]$, l'inégalité $|\alpha - r| \geq \frac{K}{q^n}$ ait lieu.

c. Soit $(t_n)_{n \in \mathbb{N}}$ la suite des réels définis par la relation : $t_n = \sum_{k=0}^n 10^{\pm k!}$, $n \geq 0$.

Démontrer que la suite $(t_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est convergente ; soit t sa limite. Établir l'inégalité : $|t - t_n| \leq 2 \times 10^{-(n+1)!}$. En déduire que le réel t est transcendant sur \mathbb{Q} .

Seconde partie

Le but de cette partie est d'appliquer les résultats précédents pour caractériser les points du plan qui peuvent être construits "à la règle et au compas".

Soit P un plan affine euclidien orienté. Considérons un repère orthonormé Oxy et \mathbb{K} un sous-corps du corps des réels \mathbb{R} ; posons :

- \mathfrak{K} est l'ensemble des points du plan P dont chaque coordonnée appartient au corps \mathbb{K} .
- \mathfrak{D} est l'ensemble des droites du plan P qui joignent deux points de \mathfrak{K} .
- \mathfrak{C} est l'ensemble des cercles du plan P centrés en un point de \mathfrak{K} et de rayon égal à la distance de deux points de \mathfrak{K} .

II-1°) Intersection de droites et de cercles appartenant à \mathfrak{D} ou à \mathfrak{C} :

Démontrer les résultats suivants :

- Toute droite appartenant à \mathfrak{D} et tout cercle appartenant à \mathfrak{C} admettent au moins une équation cartésienne dont les coefficients sont dans \mathbb{K} .
- Le point commun à deux droites sécantes de \mathfrak{D} appartient à \mathfrak{K} .
- Un point commun à une droite de \mathfrak{D} et à un cercle de \mathfrak{C} est soit un point de l'ensemble \mathfrak{K} , soit un point dont chaque coordonnée appartient à une extension quadratique de \mathbb{K} .

Que dire d'un point commun à deux cercles de \mathfrak{C} ?

Points et réels constructibles :

i/ Soit E un ensemble fini de points du plan P . Considérons toutes les droites passant par deux points de E et tous les cercles centrés en un de ces points de rayon égal à la distance de deux points quelconques de E . Les points d'intersection de ces droites et cercles deux

à deux sont dits "points construits à partir de E à la règle et au compas" ou brièvement "construits à partir de E".

ii/ Considérons deux points O et I du plan P. Un point M du plan P est dit "constructible" à partir des points O et I s'il existe une suite finie de points $M_1, M_2, \dots, M_n = M$ telle que :

- M_1 soit construit à partir de l'ensemble des deux points O et I,
- $M_i, 2 \leq i \leq n$, soit construit à partir de l'ensemble $\{O, I, M_1, M_2, \dots, M_{i-1}\}$.

iii/ Dans la suite seuls le point O et le point I de l'axe Ox sont donnés ; l'abscisse du point I est égale à 1 ; tout point M "constructible à partir des points O et I" est dit brièvement "constructible".

iv/ Un réel est dit "constructible" s'il est égal à l'abscisse d'un point constructible de l'axe Ox ou à l'ordonnée d'un point constructible de l'axe Oy.

II-2°) Exemples de "points construits" et de "points et réels constructibles" :

Démontrer, en justifiant un dessin "effectué à l'aide d'une règle et d'un compas", les propriétés suivantes :

- Soit E un ensemble de trois points A, B, C du plan P ; ces points sont deux à deux distincts et ne sont pas alignés. Démontrer que le quatrième sommet D du parallélogramme ABCD est un "point construit" à partir de l'ensemble E.
En déduire que si A et Δ sont un point et une droite du plan P donnés, la droite parallèle à la droite Δ passant par A peut être construite "à la règle et au compas".
- Démontrer que le point J symétrique du point I par rapport à O est constructible ainsi que le point K porté par l'axe Oy d'ordonnée égale à 1. Il est admis que tout point dont les coordonnées sont des entiers relatifs, est constructible.
 - Soient α et β deux réels strictement positifs constructibles ; démontrer que les réels $\alpha + \beta$, $\frac{\alpha}{\beta}$ et $\alpha \cdot \beta$ sont constructibles.
 - Soit α un réel strictement positif constructible ; démontrer que $\sqrt{\alpha}$ est constructible (on pourra considérer le cercle dont un diamètre est le segment joignant le point J au point A ($\alpha, 0$)).

Une suite finie $(\mathbb{K}_i)_{0 \leq i \leq n}$, de sous-corps du corps des réels est dite avoir la propriété (\mathfrak{P}) si les deux relations ci-dessous ont lieu :

$$(P1) \quad \mathbb{Q} = \mathbb{K}_0 \subset \mathbb{K}_1 \subset \mathbb{K}_2 \subset \dots \subset \mathbb{K}_n,$$

(P2) Pour tout entier i , $1 \leq i \leq n$, le corps \mathbb{K}_i est une extension quadratique du corps \mathbb{K}_{i-1} .

II-3°) Une condition nécessaire et suffisante de constructibilité :

- a) Soit M un point constructible ; démontrer qu'il existe une suite finie $(\mathbb{K}_i)_{0 \leq i \leq n}$, de sous-corps du corps des réels \mathbb{R} ayant la propriété (\mathfrak{P}) telle que les coordonnées de M appartiennent au corps \mathbb{K}_n .
- b) Soit une suite finie $(\mathbb{K}_i)_{0 \leq i \leq n}$ ayant la propriété (\mathfrak{P}) ; démontrer par récurrence que tous les points M du plan dont les coordonnées appartiennent au corps \mathbb{K}_n sont constructibles.

II-4°) Une condition nécessaire de constructibilité :

- a. Soient F , G et H trois sous-corps du corps des réels \mathbb{R} tels que les inclusions $F \subset G \subset H$ aient lieu. Faisons les hypothèses : G est un F -espace vectoriel, H un G -espace vectoriel, leurs dimensions sont finies et respectivement égales aux entiers q et r . Démontrer que H est un F -espace vectoriel de dimension finie. Préciser sa dimension.
- b. Considérons une suite finie $(\mathbb{K}_i)_{0 \leq i \leq n}$, de sous-corps du corps des réels ayant la propriété (\mathfrak{P}) ; quelle est la dimension du \mathbb{Q} -espace vectoriel \mathbb{K}_n ?
- c. En déduire que, si le réel α est constructible, le degré $d(\alpha, \mathbb{Q})$ est une puissance de l'entier 2.

Note historique : Les Grecs furent embarrassés lorsque la Pythie leur demanda un autel deux fois plus grand dans le temple d'Apollon à Delphes ; la racine cubique de 2 n'est pas constructible !

II-5°) Polygones réguliers constructibles :

Considérons les polygones réguliers à n côtés ($3 \leq n \leq 10$) inscrits dans le cercle de centre O et de rayon 1. Désignons par A_1, A_2, \dots, A_n leurs sommets. Supposons le premier sommet A_1 confondu avec le point I . L'abscisse du deuxième sommet A_2 est égale à $\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)$.

Quels sont, parmi les polygones réguliers à n côtés ($3 \leq n \leq 10$) inscrits dans le cercle de centre O et de rayon 1, ceux qui sont constructibles ?

FIN DU PROBLÈME

iii/ Dans la suite les point O et I de l'axe Ox sont donnés ; l'abscisse de I est égale à 1.
Tout point M "constructible à partir des points O et I" est dit brièvement "constructible".

- b. • Démontrer que le point J symétrique du point I par rapport à O est constructible ainsi que le point K porté par l'axe Oy d'ordonnée égale à 1. Il est admis que tout point dont les coordonnées sont des entiers relatifs, est constructible.