

CONCOURS d'ADMISSION à l'ÉCOLE POLYTECHNIQUE 1998
 deuxième composition de mathématiques

Première Partie

N.B. La première question est essentiellement une question de cours. Cependant il a semblé préférable d'en donner une justification directe complète.

I-1.a ($i \Rightarrow ii$) : si $n = \dim_K(K[\alpha])$ la famille $(1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^n)$ est liée, donc il existe une famille de coefficients $(a_i)_{0 \leq i \leq n}$ non nulle telle que $\sum_{i=0}^n a_i \alpha^i = 0$; c'est à dire que le polynôme $P = \sum_{i=0}^n a_i X^i$ vérifie $P \neq 0$ et $P(\alpha) = 0$ donc $P \in I_K(\alpha) \setminus \{0\}$ d'où (ii).

($ii \Rightarrow i$) : soit P un polynôme non nul appartenant à $I_K(\alpha)$; quitte à multiplier par une constante on peut supposer P unitaire ; soit n son degré : $P = X^n - \sum_{i=0}^{n-1} a_i X^i$. On a donc $\alpha^n = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \alpha^i$.

Soit E le K -sous-espace vectoriel de $\mathbf{C}$ engendré par $\{1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{n-1}\}$: il est clair, compte tenu de la formule précédente que E est stable par $z \mapsto \alpha z$ et par suite contient tous les α^j pour $j \in \mathbf{N}$. Il en résulte que $E \supset K[\alpha]$ (et par suite $E = K[\alpha]$) donc $\dim_K(K[\alpha]) \leq \dim_K(E) \leq n$, d'où (i).

I-1.b $I_K(\alpha)$ est un idéal de $K[X]$: on sait que tout idéal de $K[X]$ est principal. Rappelons l'argument : soit P un polynôme non nul de degré minimum de $I_K(\alpha)$ que l'on peut prendre unitaire. Pour un polynôme S quelconque de $I_K(\alpha)$ on peut considérer la division euclidienne de S par P : $S = PQ + R$ avec $\deg R < \deg P$. Comme $R = S - PQ \in I_K(\alpha)$ (on vérifie d'ailleurs immédiatement $R(\alpha) = 0$), l'hypothèse $R \neq 0$ contredit le choix de P ; par suite $R = 0$ et $S = PQ$: tout élément de $I_K(\alpha)$ est multiple de P .

Si P_1 unitaire possède la même propriété on a simultanément P divise P_1 et P_1 divise P donc $P_1 = \lambda P$ avec $\lambda \in K$: comme P et P_1 sont unitaires on a $\lambda = 1$ et $P_1 = P$. Ce qui prouve que P est l'unique générateur unitaire de $I_K(\alpha)$.

I-1.c Le polynôme $P_K(\alpha)$ est aussi, d'après la construction faite en **b**, le polynôme noté P en **a** ($ii \Rightarrow i$). On a donc $\dim_K(K[\alpha]) \leq \deg P$; d'après **a** ($i \Rightarrow ii$) on a aussi $\deg P \leq \dim_K(K[\alpha])$.

Finalement $\deg P_K(\alpha) = \dim_K(K[\alpha])$.

I-1.d Soit $a \in K[\alpha] \setminus \{0\}$; l'application de $K[\alpha]$ dans lui-même : $x \mapsto ax$ est K -linéaire et injective (car $x \neq 0$) donc bijective (car l'espace est de dimension finie). Par suite il existe $b \in K[\alpha]$ tel que $ab = 1$ c'est à dire que tout élément non nul de $K[\alpha]$ est inversible. Par suite $K[\alpha]$ est un corps (rappelons que $K[\alpha]$ est commutatif).

I-2.a $\alpha = \sqrt{2}$ est racine de $X^2 - 2$; pour justifier que $X^2 - 2$ est bien le polynôme $\mathbf{Q}$ -minimal de $\sqrt{2}$ il suffit de vérifier que $\sqrt{2}$ n'est racine d'aucun polynôme non nul de degré inférieur ou égal à 1 de $\mathbf{Q}[X]$, c'est à dire que $\sqrt{2}$ n'est pas dans $\mathbf{Q}$. Raisonnons par l'absurde : si $\sqrt{2} = \frac{p}{q}$ avec $p, q \in \mathbf{Z} \setminus \{0\}$ premiers entre eux on a $p^2 = 2q^2$ donc 2 divise p , soit $p = 2p'$; il vient $2p'^2 = q^2$ donc 2 divise q ; 2 est diviseur commun à p et q ce qui contredit l'hypothèse p, q premiers entre eux. Par conséquent $\sqrt{2}$ n'est pas rationnel et $X^2 - 2$ est le polynôme $\mathbf{Q}$ -minimal de $\sqrt{2}$.

I-2.b Soit $\alpha = \sqrt{\frac{1+\sqrt{5}}{2}}$; on a $\alpha^2 = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ d'où $(2\alpha^2 - 1)^2 = 5$, ou encore $\alpha^4 - \alpha^2 - 1 = 0$. Donc α est racine du polynôme $P = X^4 - X^2 - 1$: pour montrer que ce polynôme est le polynôme $\mathbf{Q}$ -minimal de α il suffit de montrer que P est irréductible sur $\mathbf{Q}$ (car le polynôme $\mathbf{Q}$ minimal en étant un diviseur non constant et unitaire ne pourra alors que lui être égal).

Pour montrer que P n'a pas de diviseur dans $\mathbf{Q}[X]$ de degré 1 il suffit de vérifier que P n'a pas de racine rationnelle. Sinon soit $\frac{p}{q} \neq 0$ (P n'admet pas 0 pour racine) une telle racine ($p \in \mathbf{Z}$ et $q \in \mathbf{N} \setminus \{0\}$ avec p, q premiers entre eux). On a alors $p^4 - p^2 q^2 - q^4 = 0$ donc $p^4 = (p^2 + q^2)q^2$ d'où résulte que q divise

p^4 ; or q est aussi premier avec p^4 (corollaire du théorème de Gauss), donc $q = 1$. Alors $p^4 - p^2 - 1 = 0$ entraîne que p divise 1 donc $p = \pm 1$. On constate immédiatement que 1 et -1 ne sont pas racines de P donc P n'a pas de diviseur de degré 1 et par suite n'a pas non plus de diviseur de degré 3.

Montrons maintenant que P n'a pas de diviseur de degré 2 dans $\mathbf{Q}[X]$. Sinon P est produit de deux polynômes de degré 2 et on peut supposer le second unitaire :

$$X^4 - X^2 - 1 = P = (aX^2 + bX + c)(X^2 + b'X + c').$$

L'identification donne $a = 1$, $ab' + b = 0$, $ac' + bb' + c = -1$, $bc' + cb' = 0$, $cc' = -1$. On a donc $b' = -b$; si $b \neq 0$ il vient $c' = c$ et $c^2 = -1$ ce qui est impossible. Par suite $b = b' = 0$, $c' = -c - 1$ et $c^2 + c - 1 = 0$. On vérifie encore que cette dernière équation n'a pas de racine dans $\mathbf{Q}$: si $\frac{p}{q}$ irréductible est racine, $p^2 + pq - q^2 = 0$ donc q divise p^2 et par ailleurs premier à p^2 , d'où $q = 1$; puis $p^2 + p - 1 = 0$ donc p divise 1 et $p = \pm 1$; comme 1 et -1 ne sont pas racine de $X^2 + X - 1$ on a la contradiction cherchée. P n'a pas de diviseur de degré 2.

Ainsi $P = X^4 - X^2 - 1$ est irréductible et c'est le polynôme $\mathbf{Q}$ -minimal de $\sqrt{\frac{1+\sqrt{5}}{2}}$.

Deuxième Partie

II-3 Soit P irréductible dans $K[X]$; notons Δ le pgcd de P et P' . Δ est donc un diviseur de P de degré strictement inférieur à celui de P , par suite $\Delta = 1$. Ainsi P' est premier à P et les zéros de P sont simples.

II-4.a Par définition tout élément de $K[\alpha]$ peut s'écrire $Q(\alpha)$ avec $Q \in K[X]$.

Si σ est un K -morphisme d'algèbre de $K[\alpha]$ dans $\mathbf{C}$ tel que $\sigma(\alpha) = \lambda$ on a $\sigma(\alpha^j) = \lambda^j$ et nécessairement $\sigma(Q(\alpha)) = Q(\lambda)$.

Soit λ une des racines de $P_K(\alpha)$; définissons donc σ de $K[\alpha]$ dans $\mathbf{C}$ par $\sigma(Q(\alpha)) = Q(\lambda)$. Pour légitimer cette définition il faut constater que si $x = Q_1(\alpha) = Q_2(\alpha) \in K[\alpha]$ alors les images de x calculées à partir de Q_1 et Q_2 coïncident : $Q_1(\lambda) = Q_2(\lambda)$. Or comme $(Q_1 - Q_2)(\alpha) = 0$, $P_K(\alpha)$ divise $Q_1 - Q_2$; par suite, puisque λ est racine de $P_K(\alpha)$ on a $(Q_1 - Q_2)(\lambda) = 0$ et $Q_1(\lambda) = Q_2(\lambda)$. Donc σ est bien défini.

Il est alors immédiat de vérifier que σ est un morphisme de K -algèbre. Notant $Q, Q_1, Q_2 \in K[X]$ et $t \in K$:

$$\sigma(Q_1(\alpha) + Q_2(\alpha)) = \sigma((Q_1 + Q_2)(\alpha)) = (Q_1 + Q_2)(\lambda) = Q_1(\lambda) + Q_2(\lambda) = \sigma(Q_1(\alpha)) + \sigma(Q_2(\alpha))$$

$$\sigma(tQ(\alpha)) = \sigma((tQ)(\alpha)) = (tQ)(\lambda) = tQ(\lambda) = t\sigma(Q(\alpha))$$

$$\sigma(Q_1(\alpha)Q_2(\alpha)) = \sigma((Q_1Q_2)(\alpha)) = (Q_1Q_2)(\lambda) = Q_1(\lambda)Q_2(\lambda) = \sigma(Q_1(\alpha))\sigma(Q_2(\alpha))$$

$$\sigma(1) = 1 \text{ (utiliser } Q = 1\text{)}.$$

Il y a donc un unique morphisme de $K[\alpha]$ dans $\mathbf{C}$ dont l'image de α est λ . Il suffit d'appliquer ce résultat à $\lambda_1, \lambda_1, \dots, \lambda_n$.

II-4.b On obtient ainsi tous les morphismes de K -algèbre de $K[\alpha]$ dans $\mathbf{C}$: si σ est un tel morphisme on a pour tout $Q \in K[X]$, $\sigma(Q(\alpha)) = Q(\sigma(\alpha))$ donc en particulier, avec $Q = P_K(\alpha)$: $(P_K(\alpha))(\lambda) = \sigma((P_K(\alpha))(\alpha)) = \sigma(0) = 0$. Donc λ est une des racines de $P_K(\alpha)$: σ est donc un des morphismes construits précédemment.

II-5 Pour $\beta \in K[\alpha]$ notons $K' = K[\beta]$; comme $K[\beta] \subset K[\alpha]$ on a $\dim_K(K[\beta])$ fini et d'après **I-1.d** K' est un corps.

On a évidemment $K[\alpha] = K'[\alpha]$ (puisque $K \subset K' \subset K[\alpha]$). D'après la question précédente il y a exactement $\dim_{K'} K[\alpha]$ morphismes de K' -algèbre de $K[\alpha]$ dans $\mathbf{C}$. Un tel morphisme est d'une part dans la liste des K -morphismes d'algèbre de $K[\alpha]$ dans $\mathbf{C}$, et d'autre part laisse fixe tout élément de K' (puisque'il laisse fixe 1). Par hypothèse les $\sigma_i(\beta)$ sont tous distincts, donc en notant j l'injection canonique de $K[\alpha]$ dans $\mathbf{C}$, on a pour $\sigma_i \neq j$: $\sigma_i(\beta) \neq \beta$ et σ_i n'est pas un K' -morphisme de $K[\alpha]$ dans $\mathbf{C}$. Par suite il n'existe qu'un seul morphisme de K' algèbre de $K[\alpha]$ dans $\mathbf{C}$, c'est l'injection canonique j . Il en résulte que $\dim_{K'}(K[\alpha]) = 1$ et donc $K' = K[\alpha]$ (K' -espaces vectoriels emboîtés de même dimension).

On a ainsi prouvé que $K[\beta] = K' = K[\alpha]$.

II-6 λ étant un élément de K à choisir, posons $\beta_1 = \alpha + \lambda\beta$ et $\beta_2 = -\alpha + (1 - \lambda)\beta$. On a $\beta_1 + \beta_2 = \beta$.

Pour montrer que $K[\beta_1] = K[\alpha]$ et $K[\beta_2] = K[\alpha]$ il suffit de prouver, d'après la question précédente, que d'une part les $\sigma_i(\beta_1)$, d'autre part les $\sigma_i(\beta_2)$ sont distincts. Il faut donc prendre λ de façon que pour $i \neq j$ on ait

$$\sigma_i(\alpha + \lambda\beta) \neq \sigma_j(\alpha + \lambda\beta) \quad \text{et} \quad \sigma_i(-\alpha + (1 - \lambda)\beta) \neq \sigma_j(-\alpha + (1 - \lambda)\beta)$$

Or chacune des équations en λ : $\sigma_i(\alpha + \lambda\beta) = \sigma_j(\alpha + \lambda\beta)$ admet au plus une racine (car elle est linéaire et non vérifiée pour $\lambda = 0$).

Il en est de même pour : $\sigma_i(-\alpha + (1 - \lambda)\beta) = \sigma_j(-\alpha + (1 - \lambda)\beta)$ (linéaire non vérifiée pour $\lambda = 1$).

Il n'y a donc qu'un nombre fini de valeurs à éviter pour le choix de λ , et comme K (contenant $\mathbf{Q}$) est infini le choix de λ comme annoncé est possible.

Par suite il existe β_1 et β_2 dans $K[\alpha]$ tels que $\beta = \beta_1 + \beta_2$ et $K[\beta_1] = K[\beta_2] = K[\alpha]$.

Troisième Partie

III-7 Remarquons au préalable qu'il résulte de la question 1.c appliquée à $K = \mathbf{Q}$ que $(1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{m-1})$ est une $\mathbf{Q}$ -base de $\mathbf{Q}[\alpha]$ (famille libre et de cardinal égal à la dimension de l'espace).

Pour $x \in K$ il existe des $x_i \in \mathbf{Q}[\alpha]$ tels que $x = \sum_{i=1}^d x_i e_i$; pour chaque $x_i \in \mathbf{Q}[\alpha]$ il existe des coefficients $t_{i,j} \in \mathbf{Q}$ tels que $x_i = \sum_{j=0}^{m-1} t_{i,j} \alpha^j$. Par suite $x = \sum_{i=1}^d \sum_{j=0}^{m-1} t_{i,j} \alpha^j e_i$: donc $(\alpha^p e_r)_{(p,r) \in \{0, \dots, m-1\} \times \{1, \dots, d\}}$ est une famille génératrice.

Montrons que cette famille est libre : si $\sum_{i=1}^d \sum_{j=0}^{m-1} t_{i,j} \alpha^j e_i = 0$ on a $\sum_{i=1}^d (\sum_{j=0}^{m-1} t_{i,j} \alpha^j) e_i = 0$ donc puisque $\sum_{j=0}^{m-1} t_{i,j} \alpha^j \in \mathbf{Q}[\alpha]$ et $(e_i)_{i \in \{1, \dots, d\}}$ libre, $\sum_{j=0}^{m-1} t_{i,j} \alpha^j = 0$; comme $(\alpha^j)_{j \in \{0, \dots, m-1\}}$ est libre il en résulte enfin $t_{i,j} = 0$. Ainsi $(\alpha^p e_r)_{(p,r) \in \{0, \dots, m-1\} \times \{1, \dots, d\}}$ est libre. Nous avons donc prouvé que c'est une base.

III-8.a On vérifie immédiatement que $M_\alpha^j(\beta) = \alpha^j \beta$. Il en résulte que pour tout polynôme $R \in \mathbf{Q}[X]$ on a $R(M_\alpha) = M_{R(\alpha)}$. D'après le théorème d'Hamilton-Cayley $\Delta_\alpha(M_\alpha) = 0$ donc $M_{\Delta_\alpha(\alpha)} = 0$ et par suite $\Delta_\alpha(\alpha) = 0$. Donc $P_{\mathbf{Q}}(\alpha)$ divise Δ_α .

Dans le cas $K = \mathbf{Q}[\alpha]$, Δ_α est unitaire de degré m donc $\Delta_\alpha = P_{\mathbf{Q}}(\alpha)$.

Ce raisonnement permet d'éviter tout calcul mais l'expression de M_α dans la base $(1, \alpha, \dots, \alpha^{m-1})$ conduit à une matrice compagnon dont le calcul du déterminant est immédiat.

Si $\alpha^m = \sum_{i=0}^{m-1} a_i \alpha^i$ on a $P_{\mathbf{Q}}(\alpha) = X^m - \sum_{i=0}^{m-1} a_i \alpha^i$ et la matrice de M_α (dans le cas $K = \mathbf{Q}[\alpha]$) est

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & a_0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & a_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & a_{m-1} \end{pmatrix} \text{ de polynôme minimal et de polynôme caractéristique } P_{\mathbf{Q}}(\alpha).$$

Considérons maintenant le cas général : chaque $E_i = \text{vect}(e_i, \alpha e_i, \alpha^2 e_i, \dots, \alpha^{m-1} e_i) = \mathbf{Q}[\alpha] e_i$ est un $\mathbf{Q}$ -sous-espace vectoriel de K stable par M_α et la matrice de l'endomorphisme induit par M_α sur ce sous-espace, dans la base $(e_i, \alpha e_i, \dots, \alpha^{m-1} e_i)$ est la matrice A . K étant la somme directe des espaces E_i le polynôme caractéristique de M_α est le produit des d polynômes caractéristiques des induits, tous égaux à $P_{\mathbf{Q}}(\alpha)$ (polynôme caractéristique de A). Donc $\Delta_\alpha = (P_{\mathbf{Q}}(\alpha))^d$.

Remarque : on peut aussi dire que la matrice de M_α dans la base considérée de K est diagonale en blocs A .

III-8.b La trace de M_α est la somme des racines de Δ_α c'est à dire d fois la somme des racines de $P_{\mathbf{Q}}(\alpha)$. Pour prouver l'égalité $\text{Tr}(M_\alpha) = \sum_{i=1}^n \sigma_i(\alpha)$ il suffit de montrer que la liste $(\sigma_i(\alpha))_{1 \leq i \leq n}$ contient exactement d fois chaque racine de $P_{\mathbf{Q}}(\alpha)$.

Remarquons d'abord que $(P_{\mathbf{Q}}(\alpha))(\alpha) = 0$ entraîne pour tout i $(P_{\mathbf{Q}}(\alpha))(\sigma_i(\alpha)) = \sigma_i((P_{\mathbf{Q}}(\alpha))(\alpha)) = 0$ car les coefficients de $P_{\mathbf{Q}}(\alpha)$ sont dans $\mathbf{Q}$ donc fixes par σ_i . Ainsi tous les $\sigma_i(\alpha)$ sont racines de $P_{\mathbf{Q}}(\alpha)$.

Fixons maintenant un indice k et montrons qu'il y a exactement d indices j tels que $\sigma_j(\alpha) = \sigma_k(\alpha)$. Il est commode ici de considérer σ_i comme un isomorphisme sur son image (σ_i est injectif car c'est un

morphisme de corps : on le corestreint à son image). Alors $\sigma_j \sigma_k^{-1}$ est un isomorphisme de $K' = \sigma_k(K)$ sur un sous-corps de $\mathbf{C}$ et $\sigma_j(\alpha) = \sigma_k(\alpha) = \alpha'$ équivaut à $\sigma_j \sigma_k^{-1}(\alpha') = \alpha'$; ce qui équivaut encore à : $\sigma_j \sigma_k^{-1}$ est isomorphisme de K' sur un sous-corps de $\mathbf{C}$ qui laisse fixe α' et donc $\mathbf{Q}[\alpha']$. Inversement si μ est un $\mathbf{Q}[\alpha']$ -isomorphisme de K' sur un sous-corps de $\mathbf{C}$ alors $\tau = \mu \sigma_k$ est un isomorphisme de K sur un sous-corps de $\mathbf{C}$ tel que $\tau(\alpha) = \alpha' = \sigma_k(\alpha)$: c'est donc un des σ_j recherché (le caractère morphisme de $\mathbf{Q}$ -algèbre est alors automatique). L'application $\mu \mapsto \mu \sigma_k$ étant bijective de l'ensemble des isomorphismes de K' sur des sous-corps de $\mathbf{C}$ laissant fixe α' vers l'ensemble des σ_j cherché, il suffit de rechercher le nombre de ces isomorphismes. Un tel isomorphisme laisse automatiquement fixe tous les éléments de $\mathbf{Q}[\alpha']$ et c'est donc un isomorphisme de $\mathbf{Q}[\alpha']$ -algèbre. Leur nombre est donc $\dim_{\mathbf{Q}[\alpha']} K'$ (application de la question 4 avec changement de notations et les conventions faites). Comme σ_k est un isomorphisme de K sur K' qui envoie $\mathbf{Q}[\alpha]$ sur $\mathbf{Q}[\alpha']$ les familles $\mathbf{Q}[\alpha']$ -libre de K' correspondent par σ_k aux familles $\mathbf{Q}[\alpha]$ -libre de K : par suite $\dim_{\mathbf{Q}[\alpha']} K' = \dim_{\mathbf{Q}[\alpha]} K = d$.

Nous avons ainsi prouvé que si une racine de $P_{\mathbf{Q}}(\alpha)$ figure dans la liste des $\sigma_i(\alpha)$ elle y figure d fois. Il y a donc $n/d = m$ $\sigma_i(\alpha)$ distincts, c'est à dire que toutes les racines de $P_{\mathbf{Q}}(\alpha)$ sont dans la liste des $\sigma_i(\alpha)$ (facile à voir aussi directement à l'aide de la deuxième partie). Ce qui achève la démonstration du résultat annoncé et prouve l'égalité proposée.

III-9 Il en résulte $\text{Tr}(M_{\alpha_i \alpha_j}) = \sum_{k=1}^n \sigma_k(\alpha_i \alpha_j) = \sum_{k=1}^n \sigma_k(\alpha_i) \sigma_k(\alpha_j)$ La matrice $(\text{Tr} M_{\alpha_i \alpha_j})$ est donc le produit de la matrice $B = (\sigma_j(\alpha_i))$ par sa transposée. Le déterminant est donc $\det(B)^2$.

On a $D(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = \left(\det(\sigma_i(\alpha_j)_{i,j=1,\dots,n}) \right)^2$.

III-10 $\beta_i = \sum_{p=1}^n A_{i,p} \alpha_p$ entraîne pour tout j : $\sigma_j(\beta_i) = \sum_{p=1}^n A_{i,p} \sigma_j(\alpha_p)$; la matrice $B' = (\sigma_j(\beta_i))$ est donc AB (avec la notation de la question précédente). Par suite et en appliquant deux fois la question précédente : $D(\beta_1, \dots, \beta_n) = (\det B')^2 = (\det(AB))^2 = (\det A \det B)^2 = (\det A)^2 (\det B)^2 = (\det A)^2 D(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$

III-11 $\sigma_i(\theta^j) = (\sigma_i(\theta))^j$ donc $\det(\sigma_i(\theta^j))_{1 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq n-1}$ est le déterminant de Vandermonde $V(\sigma_1(\theta), \dots, \sigma_n(\theta))$ qui vaut $\prod_{1 \leq j < i \leq n} (\sigma_i(\theta) - \sigma_j(\theta))$. C'est aussi, puisqu'il y a $n(n-1)/2$ facteurs, en changeant tous les signes : $(-1)^{n(n-1)/2} \prod_{1 \leq j < i \leq n} (\sigma_j(\theta) - \sigma_i(\theta)) = (-1)^{n(n-1)/2} \prod_{1 \leq i < j \leq n} (\sigma_i(\theta) - \sigma_j(\theta))$.

Faisant le produit des deux expressions :

$$D(1, \theta, \theta^2, \dots, \theta^{n-1}) = V(\sigma_1(\theta), \dots, \sigma_n(\theta))^2 = (-1)^{n(n-1)/2} \prod_{\substack{1 \leq i, j \leq n \\ i \neq j}} (\sigma_i(\theta) - \sigma_j(\theta))$$

III-12 Posons $\alpha_i = \sum_{p=0}^{n-1} A_{i,p} \theta^p$. Comme $(1, \theta, \dots, \theta^{n-1})$ est une $\mathbf{Q}$ -base de K , $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ est une $\mathbf{Q}$ -base de K si et seulement si la matrice $A = (A_{i,j})_{1 \leq i, j \leq n}$ est inversible.

Or on a d'après la question 10 : $D(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = (\det A)^2 D(1, \theta, \dots, \theta^{n-1})$ et d'après la question 11 $D(1, \theta, \dots, \theta^{n-1}) \neq 0$ (tous les $\sigma_i(\theta)$ sont distincts d'après la deuxième partie). Par suite A inversible équivaut à $\det A \neq 0$ et encore à $D(\alpha_1, \dots, \alpha_n) \neq 0$.

Conclusion : $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ est une $\mathbf{Q}$ -base de K si et seulement si $D(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ est non nul.

III-13.a $\phi = X^3 - X - 1$ a pour dérivée $3X^2 - 1$ nulle en $\pm \frac{1}{\sqrt{3}}$. Sur $]-\infty, -\frac{1}{\sqrt{3}}]$ ϕ croît de $-\infty$ à $\phi(-\frac{1}{\sqrt{3}}) = \frac{2}{3\sqrt{3}} - 1 < 0$, sur $[-\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}]$ ϕ est décroissante strictement négative, et sur $[\frac{1}{\sqrt{3}}, +\infty]$ ϕ est strictement croissante continue depuis $\phi(\frac{1}{\sqrt{3}}) < 0$ jusqu'à $+\infty$ donc admet une racine θ unique. Il en résulte que θ est l'unique racine réelle de $X^3 - X - 1$.

III-13.b Le polynôme $\mathbf{Q}$ minimal de θ est $\phi = X^3 - X - 1$.

Il suffit pour le prouver de montrer que ϕ est irréductible. Sinon ϕ serait produit dans $\mathbf{Q}[X]$ de deux polynômes non constants dont l'un serait de degré 1 : ϕ aurait une racine rationnelle $\frac{p}{q}$ (fraction

irréductible). On aurait $p^3 - pq^2 - q^3 = 0$ donc q diviseur de p^3 et premier à p^3 : donc $q = 1$. Alors $p^3 - p - 1 = 0$ entraîne p divise 1 donc $p = \pm 1$: on vérifie que 1 et -1 ne sont pas racines de ϕ . Donc ϕ n'est pas réductible sur $\mathbf{Q}$.

III-13.c Soit $\theta_1 = \theta$, θ_2 et θ_3 les racines de ϕ .

D'après la deuxième partie la liste des $\sigma_i(\theta)$ est la liste des θ_i .

On a donc en utilisant directement la question 11 sous la forme “carré du Vandermonde” :

$$D(1, \theta, \theta^2) = (\theta_2 - \theta_1)^2 (\theta_3 - \theta_1)^2 (\theta_3 - \theta_2)^2.$$

On obtient dans l'équation $\phi = 0$: $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 0$ et $\theta_1 \theta_2 \theta_3 = 1$.

Par suite $(\theta_2 - \theta_3)^2 = (\theta_1 + \theta_2)^2 - 4\theta_1 \theta_2 = \theta_3^2 - \frac{4}{\theta_3} = \frac{1}{\theta_3}(\theta_3^3 - 4) = \frac{1}{\theta_3}(\theta_3 - 3)$.

La situation étant ici symétrique entre les différentes racines on a :

$$D(1, \theta, \theta^2) = \prod_{i=1}^3 \frac{\theta_i - 3}{\theta_i} = \prod_{i=1}^3 (\theta_i - 3)$$

C'est donc le produit des racines de l'équation dont les racines sont les $u_i = \theta_i - 3$. Posant $u = X - 3$ donc $X = u + 3$ on obtient l'équation $(u + 3)^3 - (u + 3) - 1 = 0$; le terme constant est $3^3 - 3 - 1 = 23$ et le produit des racines est donc -23 .

Il en résulte $D(1, \theta, \theta^2) = -23$.

En fait ceci vaut pour l'une quelconque des racines θ_i : il est inutile de spécifier qu'il s'agit de la racine réelle. Comme le montre bien la question 11 le résultat est symétrique entre les différentes racines. En dissymétrisant l'énoncé induisait ici à faire des calculs plus lourds.