exercice 43 de réduction

(avec une jolie erreur d'énoncé)

Léane Parent

28 octobre 2025

Exercice 43 : (Mines-Ponts 2019)
Déterminer les matrices $A \in M_n(\mathbb{R})$ telles que $A^5 - 2A^4 - 2A^3 + A^2 + 4A + I_n = 0$, $\mathrm{tr}(A) = 0$ et $\det(A) = \pm 1$.

Dans tout l'exercice, on note P le polynôme annulateur décrit dans l'énoncé.

Cette correction se repose sur Introduction à la théorie de Galois [1], par Yves Laszlo, et de divers théorèmes trouvés sur `wikipedia.org` (on fait avec les sources qu'on trouve, et avec la flemme qu'on a).

0.1 Suggestion de correction

L'énoncé original utilisait probablement le polynôme $P(X) = X^5 - 2X^4 - 2X^3 + X^2 + 4X + 4$, qui se factorise aisément en $(X+1)(X-2)^2(X^2+X+1)$. Or, toutes ses racines sont de module supérieurs ou égaux à 1. Ainsi, pour avoir un déterminant égal à ± 1, les valeurs propres de A ne peuvent être que 1, j, j^2.
En trigonalisant dans $M_n(\mathbb{C})$, et en observant la trace, on déduit que les trois valeurs propres éventuelles ont nécessairement la même multiplicité. Ainsi, il ne peut exister une telle matrice que si $3|n$. Si on note $n = 3k$, on a alors, à similitude près :

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{ccc} \overbrace{\hphantom{1 \quad \ddots \quad 1}}^{k} & \overbrace{\hphantom{j \quad \ddots \quad j}}^{k} & \overbrace{\hphantom{j^2 \quad \ddots \quad j^2}}^{k} \end{array} \\
\begin{pmatrix}
1 & & & & & & & & \\
& \ddots & & & & & & & \\
& & 1 & & & & * & & \\
& & & j & & & & & \\
& & & & \ddots & & & & \\
& & & & & j & & & \\
& & (0) & & & & j^2 & & \\
& & & & & & & \ddots & \\
& & & & & & & & j^2
\end{pmatrix}
\end{array}$$

(à noter que j'ai en réalité traité le cas complexe, mais j'admets avoir un peu la flemme de traiter le cas réel, mais si quelqu'un a envie de s'amuser, libre à lui)

1. https ://www.cmls.polytechnique.fr/perso/laszlo/galois/galois.pdf

1 Irréductibilité de P dans $\mathbb{Q}[X]$

P est unitaire, donc, d'après le lemme de Gauss[2], si celui-ci est réductible, alors il est réductible dans $\mathbb{Z}[X]$.
De plus, si P est réductible, alors il l'est modulo 2. Supposons P réductible, et notons $P(X) = (X^3 + aX^2 + bX + c)(X^2 + dX + e)$. Il en découle, dans $\mathbb{F}_2[X]$ (en assimilant les entiers à leur congruence modulo 2 par la surjection canonique) :

$$X^5 + X^2 + 1 = (X^3 + aX^2 + bX + c)(X^2 + dX + e)$$

On en déduit :

$$0 = a + c \tag{1}$$
$$0 = d + ac + b \tag{2}$$
$$1 = e + da + cb \tag{3}$$
$$0 = db + ea \tag{4}$$
$$1 = eb \tag{5}$$

(5) nous donne $e = b = 1$. On déduit de (4) que $a = e = 1$, d'où, d'après (1), $c = 1$. On a alors $d = 1$ d'après (3).
(2) n'est alors plus vérifiée, ce qui est absurde : P n'est pas réductible modulo 2, donc pas réductible.

2 Calcul du groupe de Galois

On vérifie aisément par une étude de P qu'il admet exactement trois racines réelles distinctes, donc deux complexes non réelles conjuguées.
Or, P est de degré premier. Il vérifie ainsi les hypothèses d'un théorème, trouvé sur l'article Galois group de wikipedia[3] (voir "symmetric group of prime order") : Si un polynôme irréductible de degré premier p admet exactement $p - 2$ racines réelles, alors son groupe de Galois est S_p tout entier.
(Je n'ai pas trop de doutes sur le fait que ça se calcule plus explicitement, mais vous avez envie de le faire, vous ?)

3 $\mathbb{Q}$-indépendance linéaire des racines de P

lemme : Si $V \subset \mathbb{Q}^5$ est un $\mathbb{Q}$-espace vectoriel stable par permutation, alors $V = \{0\}$, $\mathrm{Vect}_{\mathbb{Q}}(1, \dots 1)$, ou contient $W = \{(q_1, \dots q_5) \mid q_1 + \dots q_5 = 0\}$.

démonstration : Supposons qu'il existe un élément $(q_1, \dots q_5) \in V$ admettant deux éléments distincts. Quitte à permuter, supposons $q_1 \neq q_2$.
Par stabilité par permutation, $(q_2, q_1, q_3, q_4, q_5) \in V$. Par différence, $(q_2 - q_1, q_1 - q_2, 0, 0, 0) \in V$, donc $(1, -1, 0, 0, 0)$ également.
On en déduit par permutation que $(1, 0, -1, 0, 0), \dots (1, 0, 0, 0, -1) \in V$. Or, ces éléments

2. https ://fr.wikipedia.org/wiki/Lemme_de_Gauss_(polyn%C3%B4mes)
3. https ://en.wikipedia.org/wiki/Galois_group, source : Lang, Serge. Algebra (Revised Third ed.). pp. 263, 273.

forment une base de W, donc $W \subset V$.

On note r_1, r_2, r_3, r_4 et r_5 les racines de P, avec $r_4, r_5 \notin \mathbb{R}$, et $L = \mathbb{Q}(r_1, \dots r_5)$
Soit $V = \{(q_1, \dots q_5) \in \mathbb{Q}^5 \mid q_1 r_1 + \dots q_5 r_5 = 0\}$, ie l'ensemble des coefficients de combinaisons linéaires rationnelles annulant les racines de P. On montre aisément que V est un $\mathbb{Q}$-espace vectoriel

Soit $(q_1, \dots q_5) \in V$. Soit $\sigma \in \mathrm{Gal}(L/\mathbb{Q})$.
On a $q_1 r_1 + \dots q_5 r_5 = 0$, d'où, par composition par σ : $q_1 \sigma(r_1) + \dots q_5 \sigma(r_5) = \sigma(0) = 0$.
(En effet, σ est un automorphisme laissant invariant les rationnels.)
Or, en assimilant σ à une permutation, on a $\sigma(r_i) = r_{\sigma(i)}$.
On en déduit que $\sigma^{-1}(q_1, \dots q_5) \in V$: V est stable par permutation (car $\mathrm{Gal}(L/\mathbb{Q}) \cong S_5$, donc σ^{-1} décrit S_5).

D'après le lemme ci-dessus, on a $V = \{0\}$, $\mathbb{Q}(1, \dots 1)$, ou contient W.
En observant le coefficient en X^4 de P, on obtient $r_1 + \dots r_5 = 2$, d'où $V \neq \mathrm{Vect}_{\mathbb{Q}}(1, \dots 1)$.
De plus, $r_1 - r_4 \notin \mathbb{R}$, donc $r_1 - r_4 \neq 0$. On en déduit que $(1, 0, 0, -1, 0) \notin V$, donc $W \not\subset V$.

Ainsi, $V = \{0\}$, ie $r_1, \dots r_5$ sont linéairement indépendants.

4 Conclusion

Soit A convenant. En trigonalisant (dans $M_n(\mathbb{C})$), on obtient une matrice dont la trace est combinaison linéaire (à coefficients naturels) des racines de P.
Or, par hypothèse, la trace de A est nulle, ce qui est absurde car les racines de P sont libres.
L'ensemble des matrices convenant est $\emptyset$.