



Devoir non surveillé 10

Centrale PSI 2023 maths 2

à partir d'un corrigé (parfois succinct) de S. Billouet.

1. C'est un **(E1)** de colle.

Notons déjà que le produit est bien défini, toutes les matrices étant de taille $n \times n$. Notons

$$N = M_{\mathcal{F}, \mathcal{G}}(g), \quad M = M_{\varepsilon, \mathcal{F}}(f), \quad P = M_{\varepsilon, \mathcal{G}}(g \circ f)$$

Il s'agit de montrer que $P = NM$. Pour ça nommons les vecteurs des bases

$$\varepsilon = (u_1, \dots, u_n), \quad \mathcal{F} = (v_1, \dots, v_n), \quad \mathcal{G} = (w_1, \dots, w_n)$$

D'une part, pour tout $j \in \llbracket 1, n \rrbracket$,

$$\begin{aligned} (g \circ f)(u_j) &= g(f(u_j)) = g\left(\sum_{k=1}^n M_{kj} v_k\right) \\ &= \sum_{k=1}^n M_{kj} g(v_k) = \sum_{k=1}^n M_{kj} \left(\sum_{i=1}^n N_{ik} w_i\right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^n N_{ik} M_{kj}\right) w_i \end{aligned}$$

D'autre part par définition de P on a pour tout $j \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $(g \circ f)(u_j) = \sum_{i=1}^n P_{ij} w_i$.

Ainsi par unicité de la décomposition dans \mathcal{G} on récupère pour tout $j \in \llbracket 1, n \rrbracket$, pour tout $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$,

$$P_{ij} = \sum_{k=1}^n N_{ik} M_{kj}$$

ce qui est la définition de $P = NM$. On a bien : $M_{\varepsilon, \mathcal{G}}(g \circ f) = M_{\mathcal{F}, \mathcal{G}}(g) M_{\varepsilon, \mathcal{F}}(f)$.

2. Grâce à la question précédente il suffit de prendre

$$P = M_{\varepsilon, \mathcal{G}}(\text{Id } \mathbb{R}^n), \quad Q = M_{\mathcal{F}, \varepsilon}(\text{Id } \mathbb{R}^n)$$

[Mais faut-il préciser pourquoi ces matrices sont bien inversibles ?]

3. Par récurrence sur $k \in \mathbb{N}$. C'est vrai pour $k = 0$ car $M^0 X = I_n X = X = \lambda^0 X$. Supposons le résultat pour un $k \in \mathbb{N}$ fixé. Alors $M^{k+1} X = M M^k X = M \lambda^k X = \lambda^k M X = \lambda^k \lambda X = \lambda^{k+1} X$. On conclut par principe de récurrence. L'avant-dernière égalité est justifiée par le fait que λ est valeur propre de M associée à X .

4. Soit $\Pi = \sum_{k=1}^r a_k X^k \in \mathbb{R}[X]$ annulateur de M et $\lambda \in \text{Sp}_{\mathbb{C}}(M)$. On a alors $0_{\mathcal{M}_n(\mathbb{C})} = \sum_{k=0}^r a_k M^k$.

On multiplie à droite par un vecteur propre Y associé à λ et on obtient

$$0_{\mathbb{R}^n} = \sum_{k=0}^r a_k M^k Y = \sum_{k=0}^r a_k \lambda^k Y = \left(\sum_{k=0}^r a_k \lambda^k\right) Y$$

Comme $Y \neq 0$ (vecteur propre), on obtient bien que $\Pi(\lambda) = 0$.

Si $\Pi \in \mathbb{R}[X]$ est un polynôme annulateur de M , alors toute valeur propre complexe de M est une racine de Π .

5. Il suffit de vérifier que pour tout $(M, N) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, et pour tout $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$, on a :

$$\Gamma_A(\lambda M + \mu N) = \lambda \Gamma_A(M) + \mu \Gamma_A(N).$$

C'est une conséquence directe de la bilinéarité du produit matriciel : la multiplication par A à gauche est une opération linéaire.

6. Méthode 1 : avec le cours de 1ère année.

Soit $A \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$. Par le cours, on sait que le rang d'une application linéaire est invariant par composition par un isomorphisme. Pour obtenir le résultat demandé, il suffit de passer aux applications linéaires canoniquement associées. Notons f l'endomorphisme de \mathbb{R}^n canoniquement associée à A et u celui associée à M . On sait alors que f est un isomorphisme ce qui donne

$$\text{rg}(f \circ u) = \text{rg}(u)$$

donc

$$\text{rg}(AM) = \text{rg}(M)$$

Méthode 2 : l'image d'une famille libre par un isomorphisme est une famille libre

On note $r = \text{rg}(M)$.

Ainsi, par définition, il existe $X_1, \dots, X_r \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ tels que (MX_1, \dots, MX_r) soit une base de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$.

C'est donc une famille libre, et comme A est inversible, la famille (AMX_1, \dots, AMX_r) est une famille libre de $\text{Im}(AM)$. Ainsi : $\text{rg}(AM) \leq r = \text{rg}(M)$.

En appliquant ceci avec $A' = A^{-1}$ et $M' = AM$, on obtient aussi que $\text{rg}(A'M') \leq \text{rg}(M')$. Et donc $\text{rg}(M) \leq \text{rg}(AM)$.

Méthode 3 : avec le théorème du rang

Comme A est inversible, pour tout $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, on a les équivalences suivantes :

$$\begin{aligned} X \in \text{Ker}(AM) &\iff AMX = 0 \\ &\iff MX = 0 \iff X \in \text{Ker}(M) \end{aligned}$$

Ainsi, $\text{Ker}(AM) = \text{Ker}(M)$ et par le théorème du rang (toutes les matrices sont $n \times n$), on obtient $\boxed{\text{rg}(AM) = \text{rg}(M)}$.

7. — Linéarité : soit $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, et $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$. $\boxed{\text{Pour tout } M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}),}$ on a :

$$\begin{aligned} \Gamma_{\lambda A + \mu B}(M) &= (\lambda A + \mu B) M \\ &= \lambda AM + \mu BM \\ &= \lambda AM + \mu BM \\ &= \lambda \Gamma_A(M) + \mu \Gamma_B(M) = (\lambda \Gamma_A + \mu \Gamma_B)(M) \end{aligned}$$

à nouveau par bilinéarité du produit matriciel. Et donc $\Gamma_{\lambda A + \mu B} = \lambda \Gamma_A + \mu \Gamma_B$.

— Injectivité : pour tout $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$,

$$\Gamma_A = 0 \iff \forall M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), AM = 0 \iff A = 0$$

Pour la dernière équivalence, le sens \Leftarrow est immédiat et le sens \Rightarrow est obtenu en choisissant $M = I_n$.

8. Par récurrence sur $k \in \mathbb{N}$. C'est vrai pour $k = 0$ car $\Gamma_{A^0} = \Gamma_{I_n} = \text{Id } \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) = (\Gamma_A)^0$. Supposons le résultat pour un entier $k \in \mathbb{N}$ fixé. Alors, $\boxed{\text{pour tout } M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}),}$ on a :

$$\begin{aligned} \Gamma_{A^{k+1}}(M) &= A^{k+1}(M) \\ &= A(A^k(M)) \\ &= \Gamma_A \circ \Gamma_{A^k}(M) \\ &= \Gamma_A \circ (\Gamma_A)^k(M) \quad \text{par hypothèse de récurrence} \\ &= (\Gamma_A)^{k+1}(M) \end{aligned}$$

Et donc $\Gamma_{A^{k+1}} = (\Gamma_A)^{k+1}$. On conclut par principe de récurrence.

9. La question précédente montre que cette relation est vraie pour tout monôme Π . La linéarité de Γ permet d'étendre le résultat à toute combinaison linéaire de monômes, c'est-à-dire à tout polynôme.
10. Supposons A diagonalisable. Alors elle admet un polynôme annulateur scindé à racines simples P . On a alors $P(\Gamma_A) = \Gamma_{P(A)} = \Gamma_{0_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})}} = 0_{\mathcal{L}(\mathcal{M}_n(\mathbb{R}))}$ donc P annule Γ_A donc Γ_A est aussi diagonalisable. Réciproquement si Γ_A est diagonalisable, alors il admet un polynôme annulateur Q scindé à racines simples et alors $\Gamma_{Q(A)} = Q(\Gamma_A) = 0_{\mathcal{L}(\mathcal{M}_n(\mathbb{R}))}$ donc par injectivité de Γ , on a $Q(A) = 0$ donc A est diagonalisable.
11. On utilise les deux calculs de la question précédente en remplaçant P par χ_A et Q par χ_{Γ_A} et on utilise le théorème de Cayley-Hamilton.
12. On procède par double inclusion.
- $\text{Sp}_{\mathbb{C}}(\Gamma_A) \subset \text{Sp}_{\mathbb{C}}(A)$: si $\lambda \in \mathbb{C}$ est valeur propre de Γ_A alors par 4. elle est racine de tout polynôme annulateur de Γ_A , en particulier, par la question précédente, de χ_A , et donc valeur propre de A .
 - $\text{Sp}_{\mathbb{C}}(\Gamma_A) \supset \text{Sp}_{\mathbb{C}}(A)$: si $\lambda \in \mathbb{C}$ est valeur propre de A alors par 4. elle est racine de tout polynôme annulateur de A , en particulier, par la question précédente, de χ_{Γ_A} , et donc valeur propre de Γ_A .
13. Soit $(\Theta, \Theta') \in (\mathcal{L}_1 \cup \mathcal{L}_2)^2$. Supposons pour commencer que $\Theta \in \mathcal{L}_1$ et $\Theta' \in \mathcal{L}_2$. On a alors $\Theta = \Phi_{P,Q}$ et $\Theta' = \Psi_{R,S}$ pour certaines matrices inversibles $P, Q, R, S \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$. On a alors

$$\Theta \circ \Theta' = M \mapsto P(RM^{\top}S)Q = (PR)M^{\top}(SQ) = \psi_{PR,SQ} \in \mathcal{L}_2$$

car PR et SQ sont inversibles comme produit de matrices inversibles. Les trois autres cas sont similaires, selon ou non qu'il y ait transposition, on retombera toujours dans \mathcal{L}_1 ou \mathcal{L}_2 .

14. On constate que

$$\Phi_{P,Q} \circ \Phi_{P^{-1},Q^{-1}} = (M \mapsto P(P^{-1}MQ^{-1})Q) = (M \mapsto M) = \text{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})}$$

ce qui prouve (pour un endomorphisme en dimension finie, l'inversibilité d'un seul côté suffit à être inversible) que

$$\Phi_{P,Q} \text{ est un automorphisme et sa réciproque est } \Phi_{P^{-1},Q^{-1}} : M \mapsto P^{-1}MQ^{-1}$$

De même

$$\Psi_{P,Q} \circ \Psi_{P^{-1},Q^{-1}}(M) = P(P^{-1}M^{\top}Q^{-1})Q = M^{\top} = \mathcal{T}(M)$$

or \mathcal{T} est un automorphisme de réciproque lui-même donc

$$\Psi_{P,Q} \text{ est un automorphisme et sa réciproque est } M \mapsto (P^{-1}MQ^{-1})^{\top}$$

15. Cf. 6, la composition à gauche mais aussi à droite, par un isomorphisme, préserve le rang. Il suffit donc de reprendre la démonstration en 6. (méthode 1) et de composer en plus à droite par l'isomorphisme canoniquement associé à Q , et éventuellement par la transposition, qui est aussi un isomorphisme.
16. Comme pour tout $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, $\det(M^{\top}) = \det(M)$, alors $\det(PM^{\top}Q) = \det(P) \det(M) \det(Q) = \det(M)$ si et seulement si $\det(P) \det(Q) = 1$. De même pour $\det(PMQ)$. On propose donc la condition nécessaire et suffisante

$$\det(PQ) = 1$$

17. Pour tout $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, PMP^{-1} est semblable à M et de $PM^{\top}P^{-1}$ à M^{\top} donc à M . Toutes ces matrices ont donc même polynôme caractéristique, ce qui prouve que $\Phi_{P,P^{-1}}$ et $\Psi_{P,P^{-1}}$ conservent le polynôme caractéristique.
18. $\mathcal{T} = \Psi_{I_n, I_n} \in \mathcal{L}_2$. En revanche $\mathcal{T} \notin \mathcal{L}_1$ car si c'était le cas il existerait $P, Q \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$ telles que pour tout $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$,

$$PMQ = M^{\top}$$

donc en prenant $M = I_n$ on obtient $Q = P^{-1}$ donc

$$\forall M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), PMP^{-1} = M^{\top}$$

Prenons $M = E_{21}$ (matrice élémentaire). On obtient alors $PE_{21} = E_{1,2}P$. On obtient donc pour tout $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$,

$$(PE_{12})_{ij} = (E_{21}P)_{ij}$$

Avec la formule du produit matriciel on obtient

$$(PE_{12})_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } j \neq 2 \\ P_{i1} & \\ hbo{xi} & \text{si } j = 2 \end{cases}, \quad (E_{21}P)_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq 2 \\ P_{1j} & \text{si } i = 2 \end{cases}$$

Ceci prouve que $P_{1j} = (E_{21}P)_{2j} = (PE_{12})_{2j} = 0$ si $j \neq 2$. De même $P_{i1} = 0$ si $i \neq 2$.

On recommence avec $M = E_{11}$ cette fois pour obtenir que $P_{i1} = 0$ si $i \neq 1$ et $P_{1j} = 0$ si $j \neq 1$, en particulier $P_{21} = P_{12} = 0$. On vient de prouver que la première ligne et la première colonne de P sont nulles. C'est impossible car P est supposée inversible.

19. Supposons par l'absurde qu'il existe $f \in \mathcal{L}_1 \cap \mathcal{L}_2$. Alors il existe $P, Q, R, S \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$ telles que pour tout $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$,

$$PMQ = RM^\top S^{-1}$$

donc

$$M^\top = R^{-1}PMQS$$

ce qui prouverait que $\mathcal{T} = \Phi_{R^{-1}P, QS} \in \mathcal{L}_1$ ce qui est impossible par la question précédente.

20. Par construction, $M_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f) = I_n$.

21. Notons que sous l'hypothèse de l'énoncé, $\text{Vect}(e_1, \dots, e_k)$ est (par construction) un supplémentaire de $\ker(f)$. Soit $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ des scalaires tels que

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i f(e_i) = 0$$

Notons qu'alors par linéarité de f on a

$$f\left(\sum_{i=1}^k \lambda_i e_i\right) = 0$$

ce qui prouve que le vecteur $\sum_{i=1}^k \lambda_i e_i$ est dans le noyau de f . Mais par ailleurs, il est dans $\text{Vect}(e_1, \dots, e_k)$ qui est un supplémentaire dudit noyau. Ce vecteur est donc nul, et par liberté de la famille (e_1, \dots, e_k) , les scalaires λ_i sont tous nuls. C'est exactement ce qu'on voulait démontrer.

22. Notons qu'on a déjà $k \leq n$, car k est la dimension d'un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^n . Supposons que $k = n$. Alors $\mathcal{B}_2 = \emptyset$, donc le noyau de f est nul. C'est en contradiction avec l'hypothèse de l'énoncé. Donc $k < n$.

23. Par construction, il s'agit de la matrice $J_{n,r}$ définie juste après (...).

24. Soit f l'application canoniquement associée à M de rang $r \in \llbracket 0, n \rrbracket$ (on notera \mathcal{B}_{can} la base canonique de \mathbb{R}^n). Distinguons trois cas :

- Si f est nulle, M est nulle et n'importe quel couple (P, Q) de matrices inversibles convient.
- Si f est un isomorphisme, ce qui signifie que (f est un endomorphisme d'un espace de dimension finie) $\ker(f) = \{0\}$ et $r = n$, la partie III-A montre qu'il existe deux bases $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$ de \mathbb{R}^n telles que $M_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f) = I_n = J_{n,n}$; d'après Q2, il existe deux matrices P_2, Q_2 inversibles telles que $J_{n,n} = P_2 M Q_2$, donc $M = \Phi_{P_2^{-1}, Q_2^{-1}}(J_{n,n})$.
- Enfin, si on n'est dans aucun des deux cas précédents, $r \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket$ et on est dans la situation de la partie III-B. Le résultat de Q23 donne alors deux bases $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$ de \mathbb{R}^n telles que $M_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f) = J_{n,r}$; on conclut pareillement en utilisant Q2.

25. Prenons une base

$$B_1 = (U_1, U_2)$$

de \mathbb{R}^2 avec U_2 un vecteur qui dirige $\text{Ker } A$. Ceci existe car $\text{Ker } A$ est une droite vectorielle, et donc dans \mathbb{R}^2 tout supplémentaire en est une droite vectorielle aussi. Prenons

$$B_2 = (AU_1, V_2)$$

avec V_2 qui dirige $\mathfrak{S}B$. On a B_2 qui est une base de \mathbb{R}^2 car $AU_1 \in \mathfrak{S}A$ et $AU_1 \neq 0$ car $U_1 \notin \text{Ker } A$ (puisque (B_1) est une base de \mathbb{R}^2) et $V_2 \in \mathfrak{S}B$, or $\mathfrak{S}A$ et $\mathfrak{S}B$ sont des droites vectorielles distinctes *donc* (comme ce sont des droites) en somme directe, donc supplémentaires dans \mathbb{R}^2 .

Alors en posant $Q_2 = M_{B_{can}, B_1}(\text{Id } \mathbb{R}^2)$ et $P_2 = M_{B_2, B_{can}}(\text{Id } \mathbb{R}^2)$ (matrices de passage) on a le résultat désiré.

26. Par construction, $B_1^T = B_1, B_4^T = B_4, B_2^T = B_3, B_3^T = B_2$. Donc :

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

27. T est symétrique réelle ; en vertu du théorème spectral, elle est donc diagonalisable.

28. Supposons que $\mathcal{T}(M) = \lambda M$ pour un scalaire λ et une matrice non nulle M . En spécialisant sur les coefficients, on trouve que $m_{ii} = \lambda m_{ii}$ pour tout $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ et $m_{ij} = \lambda m_{ji}$ pour $i, j \in \llbracket 1, n \rrbracket$ distincts, donc $m_{ij} = \lambda^2 m_{ij}$. Comme au moins un des coefficients de M est non nul, on trouve sur ce coefficient que $\lambda^2 = 1$ donc que $\lambda \in \{1, -1\}$. La recherche des sous-espaces propres se fait directement : par construction, le sous-espace propre associé à 1 est l'espace des matrices symétriques et celui associé à -1 est celui des matrices antisymétriques. (Ce raisonnement est valable y compris si $n \neq 2$.)

29. Calcul plus ou moins pénible à l'appui (il y a sûrement moyen de rendre ça facile), on trouve le résultat voulu avec

$$U = \begin{pmatrix} e & g \\ f & h \end{pmatrix} = Q.$$

30. Comme Φ préserve le rang, on a notamment que l'image d'une matrice non nulle (donc de rang non nul) est non nulle ; ainsi, le noyau de Φ est l'espace nul, ce qui (Φ est un endomorphisme d'un espace de dimension finie) entraîne que Φ est bijectif, donc un automorphisme de $\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$.

31. B_1 et B_4 sont de rang 1, leurs images par Φ le sont donc aussi ; $B_1 + B_4 = I_2$ est de rang 2, son image est donc également inversible. Les images de B_1 et de B_4 sont distinctes, donc Q25 permet de conclure.

32. Comme $\Phi'(B_1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ alors $C_1 = (1, 0, 0, 0)^\top$. De même $C_4 = (0, 0, \alpha, \beta)^\top$.

33. Φ' préserve le rang donc pour tout $i \in \llbracket 1, 4 \rrbracket$, $\text{rg } B'_i = \text{rg } B_i = 1$ et en particulier B'_i est non-inversible, or par définition de C_i on a $B'_i = \begin{pmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{pmatrix}$ et la nullité de son déterminant donne la relation désirée.

34. $B'_1 + B'_2$ est de rang 1 (comme $B_1 + B_2$) donc son déterminant est nul à savoir

$$\begin{vmatrix} 1 + a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{vmatrix} = 0$$

ce qui donne

$$0 = (1 + a_2)d_2 - b_2c_2 = d_2$$

par la question précédente. De même pour $d_3 = 0$ avec $B'_1 + B'_3$ non inversible.

35. En rassemblant toutes les informations connues sur M' on a à ce stade

$$M' = \begin{pmatrix} 1 & a_2 & a_3 & 0 \\ 0 & b_2 & b_3 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & \beta \end{pmatrix}$$

de plus M' est inversible car Φ' est un automorphisme (composée d'automorphismes), donc $\det(M') = b_3c_3\beta = b_2c_3d_4 \neq 0$.

36. $B'_3 + B'_4$ est de rang 1 donc non inversible donc son déterminant est nul, ceci donne, en utilisant que $b_3c_3 = 0$, que

$$a_3d_4 = b_3c_4$$

De même le déterminant de $B'_2 + B'_4$ est nul ce qui donne

$$a_2d_4 - b_2c_4 = 0$$

Enfin, $B'_1 + B'_2 + B'_3 + B'_4$ a aussi un déterminant nul (rang 1) ce qui donne

$$0 = (1 + a_2 + a_3)d_4 - (b_2 + b_3)(c_3 + c_4) = d_4 - (b_2 + b_3)c_3$$

Il reste à prouver que $b_3 = 0$ car on aura alors $d_4 = b_2c_3$ (deuxième relation demandée) puis par la première relation on aura $a_3 = 0$ (car $d_4 \neq 0$) donc la forme de matrice annoncée, et enfin on aura $c_4 = a_2 \frac{d_4}{b_2} = a_2c_3$ ($b_2 \neq 0$ et $b_2c_3 = d_4$).

On tire $b_3 = 0$ du fait que $B'_3 = \begin{pmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & 0 \end{pmatrix}$ a même rang que B_3 , à savoir 1, donc non inversible, donc son déterminant, à avoir $-b_3c_3 = 0$, or on a montré $c_3 \neq 0$.

37. Par ce qui vient d'être fait on a

$$M' = \begin{pmatrix} 1 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 & a_2c_3 \\ 0 & 0 & 0 & b_2c_3 \end{pmatrix}$$

donc on reconnaît une matrice de la forme par blocs

$$\begin{pmatrix} aU & bU \\ cU & dU \end{pmatrix}$$

avec $a = 1, b = c = 0, d = c_3$ et $U = \begin{pmatrix} 1 & a_2 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix}$ ce qui par la question 29 donne que Φ' est dans \mathcal{L}_1 et donc $\Phi = \Phi_{P_1^{-1}, Q_1^{-1}} \circ \Phi'$ aussi par stabilité par composition de \mathcal{L}_1 (cf la réponse à la question 13).

38. Comme $c_2 \neq 0$ et $b_2c_2 = 0$ on a $b_2 = 0$ donc

$$M' = \begin{pmatrix} 1 & a_2 & a_3 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & c_2 & c_3 & c_4 \\ 0 & 0 & 0 & d_4 \end{pmatrix}$$

En multipliant à gauche par T (Q26) on a le résultat voulu.

39. Cette matrice est inversible en tant que matrice d'automorphisme, donc son déterminant est non-nul donc

$$b_3c_2d_4 \neq 0$$

donc $b_3 \neq 0$, or $b_3c_3 = 0$ (fin de la Q34) donc $c_3 = 0$.

40. On va exploiter les trois déterminants nuls comme en 36. Cependant nous n'avons plus $c_2 = 0$, en revanche nous avons $c_3 = 0$. Ainsi

$$\text{— } \det(B'_1 + B'_4) = 0 = \begin{vmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 + c_4 & d_4 \end{vmatrix} \text{ fournit (en utilisant que } b_3c_3 = 0)$$

$$0 = a_3d_4 - b_3c_4$$

$$\text{— } \det(B'_2 + B'_4) = 0 = \begin{vmatrix} a_2 & c_2 + c_4 \\ 0 & d_4 \end{vmatrix} \text{ fournit (comme } d_4 \neq 0)$$

$$a_2 = 0$$

— Le dernier donne, en utilisant $b_3c_3 = 0$ et en utilisant le premier, que

$$d_4 = b_3c_2$$

Finalement la matrice de $\Phi' \circ \mathcal{T}$ est

$$\begin{pmatrix} 1 & a_3 & 0 & 0 \\ 0 & b_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_2 & c_4 \\ 0 & 0 & 0 & d_4 \end{pmatrix}$$

avec $d_4 = c_2b_3$ et $c_4 = c_2a_3$ car $c_2 = \frac{d_4}{b_3}$ donc on retrouve la forme par blocs de la question 29, ce qui prouve que $\Phi' \circ \mathcal{T}$ est dans \mathcal{L}_1 et donc par composition par \mathcal{T} , $\Phi' \in \mathcal{L}_2$ et par composition par $\Phi_{P_1^{-1}, Q_1^{-1}}$, $\Phi \in \mathcal{L}_2$ (cf preuve de 13).

41. Puisque Φ préserve le déterminant, le fait que $\Phi(A) = 0_2$, de déterminant nul, entraîne que A est de déterminant nul. Donc A n'est pas inversible, donc elle est de rang < 2 . Elle ne peut être de rang 0 car elle n'est pas nulle par hypothèse : c'est qu'elle est de rang 1.
42. Notons que $A + N = P(I_2 - J_{2,1} + J_{2,1})Q = PQ$. Ainsi, $\det(A + N) = \det(PQ) \neq 0$ car P et Q sont inversibles, donc PQ également. Par ailleurs,

$$\det(A + N) = \det(\Phi(A + N)) = \det(\Phi(A) + \Phi(N)) = \det(\Phi(N)) = \det(N)$$

où on a utilisé le fait que Φ préservait le déterminant (première et dernière égalité), la linéarité de Φ (deuxième égalité) et le fait que $\Phi(A) = 0$ (troisième égalité).

Or, $I_2 - J_{2,1}$ n'est pas inversible, car c'est la matrice élémentaire B_4 de la partie précédente. Donc $P(I_2 - J_{2,1})Q$ ne l'est pas non plus ; son déterminant est donc nul. Contradiction !

Donc une telle matrice A n'existe pas ; c'est donc que le noyau de A est nul, et (comme déjà dit plusieurs fois) Φ est donc un automorphisme.

43. Φ préserve le rang de la matrice nulle car elle est linéaire ; Φ préserve le rang des matrices de rang 2 car celles-ci sont inversibles, donc leur image l'est également ; l'image d'une matrice de rang 1 ne peut être nulle (sinon Φ ne serait pas injective) ni inversible (car Φ préserve le déterminant), donc elle ne peut être que de rang 1. C'est gagné.
44. Il suffit de mettre à bout plusieurs résultats précédents : d'après ce qu'on vient d'admettre, un tel endomorphisme Φ qui conserve le déterminant conserve le rang ; d'après ce qu'on a admis dans la partie précédente, un tel endomorphisme est donc dans $\mathcal{L}_1 \cup \mathcal{L}_2$; d'après Q16 (enfin quelque chose de démontré!), on en déduit qu'une condition nécessaire est suffisante que Φ soit de la forme $\Phi_{P,Q}$ ou $\Psi_{P,Q}$ avec $\det(P)\det(Q) = 1$.
(Franchement, tant qu'à faire, on aurait pu rester en 2×2 , hein... Au moins on l'a démontré...)

45. C'est du cours (de MPSI et de PSI).

46. C'est du cours.

47. Si tel est le cas, on a alors $\text{tr}(AA^T) = \text{tr}(A^T A) = 0$ (on a utilisé le fait que la trace d'un produit ne dépend pas de l'ordre des facteurs) ; par caractère défini du produit scalaire, c'est alors que $A = 0$.

48. Les valeurs propres d'une matrice sont exactement les racines de son polynôme caractéristique ; le déterminant est égal au produit desdites valeurs propres, la trace à leur somme. Ainsi, deux matrices qui ont même polynôme caractéristique ont notamment le même déterminant et la même trace. D'où le résultat.

49. Un tel endomorphisme Φ conserve donc le déterminant, donc est de la forme $\Phi_{P,Q}$ ou $\Psi_{P,Q}$ avec $\det(P)\det(Q) = 1$. Par ailleurs, Φ conserve la trace. Que Φ soit un $\Phi_{P,Q}$ ou un $\Psi_{P,Q}$, on en déduit que pour tous i, j dans $[[1, n]]$, on a

$$\text{tr}(PE_{i,j}Q) = \text{tr}(E_{i,j})$$

(la trace de la transposée de $E_{i,j}$ est la trace de $E_{i,j}$...) Mais alors $\text{tr}(QPE_{i,j}) = \text{tr}(PE_{i,j}Q) = \text{tr}(E_{i,j})$; par linéarité de la trace et par le fait que les $(E_{i,j})$ forment une base de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, on a donc $\text{tr}(QPM) = \text{tr}(M)$ pour toute matrice $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. On en déduit que pour toute telle matrice M , on a $\text{tr}((QP - I_n)M) = 0$. D'après Q47, $QP - I_n$ est la matrice nulle, donc $Q = P^{-1}$.

On conclut par Q17 que les $\Phi_{P,P^{-1}}$ et les $\Psi_{P,P^{-1}}$ pour $P \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$, sont exactement les endomorphismes qui conservent le polynôme caractéristique.