

DEVOIR SURVEILLÉ N°08

- La présentation, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la rédaction et la précision des raisonnements entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies.
- On prendra le temps de vérifier les résultats dans la mesure du possible.
- Les calculatrices sont interdites.

Problème 1

1 Supposons que $A > 0$, $X \geq 0$ et $X \neq 0$. Il existe donc $i_0 \in \llbracket 1, n \rrbracket$ tel que $X_{i_0} > 0$. Alors, pour tout $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$,

$$(AX)_i = \sum_{j=1}^n A_{i,j}X_j \geq A_{i,i_0}X_{i_0} > 0$$

Soit $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$. Alors, par inégalité triangulaire,

$$|(AB)_{i,j}| = \left| \sum_{k=1}^n A_{i,k}B_{k,j} \right| \leq \sum_{k=1}^n |A_{i,k}||B_{k,j}| = (|A||B|)_{i,j}$$

On en déduit que $|AB| \leq |A||B|$.

2 Pour le produit scalaire canonique de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, l'inégalité de Cauchy-Schwarz est $|(X, Y)| \leq \|X\|\|Y\|$. En prenant $X = (|z_1|, \dots, |z_n|)^T$ et $Y = (|w_1|, \dots, |w_n|)^T$, on obtient bien l'inégalité voulue.

3 On a alors $|1 + z|^2 = (1 + |z|)^2$ ou encore $(1 + z)(1 + \bar{z}) = 1 + 2|z| + |z|^2$. Sachant que $z\bar{z} = |z|^2$, on obtient $\operatorname{Re}(z) = |z| \geq 0$. De plus, $|z|^2 = \operatorname{Re}(z)^2 + \operatorname{Im}(z)^2$ donc $\operatorname{Im}(z) = 0$. Ceci signifie que $z \in \mathbb{R}_+$. Supposons maintenant que $|z + z'| = |z| + |z'|$. En divisant par $|z| > 0$ et en posant $\alpha = z'/z$, on obtient $|1 + \alpha| = 1 + |\alpha|$. D'après ce qui précède, $\alpha \in \mathbb{R}_+$.

4 Comme les z_i ne sont pas tous nuls, on peut quitte à les réordonner, supposer que $z_1 \neq 0$. Notons alors θ un argument de z_1 . On a donc alors $z_1 = e^{i\theta}|z_1|$. Soit $k \in \llbracket 2, n \rrbracket$. Par inégalité triangulaire,

$$\left| \sum_{j=1}^n z_j \right| \leq |z_1 + z_k| + \sum_{j=1, j \neq k}^n |z_j| \leq \sum_{j=1}^n |z_j|$$

Or, par hypothèse, $\left| \sum_{j=1}^n z_j \right| = \sum_{j=1}^n |z_j|$ donc

$$|z_1 + z_k| + \sum_{j=1, j \neq k}^n |z_j| = \sum_{j=1}^n |z_j|$$

puis $|z_1 + z_k| = |z_1| + |z_k|$. Il existe donc $\alpha \in \mathbb{R}_+$ tel que $z_k = \alpha z_1$ d'après la question précédente. On a alors $|z_k| = \alpha|z_1|$ de sorte que

$$z_k = \alpha z_1 = \alpha e^{i\theta}|z_1| = e^{i\theta}|z_k|$$

5 Il est clair que $\chi_A = X^2 - (a + d)X + (ad - bc)$. On en déduit que

$$\Delta = (a + d)^2 - 4(ad - bc) = a^2 + d^2 - 2ad + 4bc = (a - d)^2 + 4bc$$

6 D'après la question précédente, $\Delta \geq 4bc > 0$. χ_A possède donc deux racines réelles distinctes λ et μ . On peut supposer que $\lambda < \mu$. Ainsi A possède deux valeurs propres distinctes λ et μ : elle est donc diagonalisable et semblable à $\begin{pmatrix} \mu & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$.

7 On sait déjà que $\lambda < \mu$. Par ailleurs, $\lambda + \mu = a + d > 0$ donc $-\lambda < \mu$. Ainsi $|\lambda| < \mu$.

8 Posons $D = \begin{pmatrix} \mu & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$. Il existe alors $P \in GL_2(\mathbb{R})$ telle que $A = PDP^{-1}$. On a alors $A^k = PD^kP^{-1}$ et $D^k = P^{-1}A^kP$ pour tout $k \in \mathbb{N}$. Les applications $M \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R}) \mapsto PMP^{-1}$ et $M \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R}) \mapsto P^{-1}MP$ sont linéaires donc continues ($\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$ est de dimension finie). On en déduit que la suite (A^k) converge si et seulement si la suite D^k converge. La suite (A^k) converge si et seulement si $\mu \in]-1, 1]$ et $\lambda \in]-1, 1]$. Mais comme $|\lambda| < \mu$, si $\mu < 1$, la suite (A^k) converge vers la matrice nulle. On en déduit que (A^k) converge vers une matrice non nulle si et seulement si $\mu = 1$ et dans ce cas, elle converge vers $L = P \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} P^{-1}$. Par invariance du rang par similitude, $\text{rg}(L) = 1$. De plus, $L^2 = L$ donc L est une matrice de projecteur.

9 Dans ce cas,

$$\chi_B = X^2 - (2 - \alpha - \beta)X + (1 - \alpha)(1 - \beta) - \alpha\beta = X^2 - (2 - \alpha - \beta)X + 1 - \alpha - \beta = (X - 1)(X - (1 - \alpha - \beta))$$

Comme $\alpha + \beta > 0$, χ_B possède deux racines distinctes, à savoir 1 et $1 - \alpha - \beta$: elle est donc diagonalisable et semblable à la matrice $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \alpha - \beta \end{pmatrix}$. Or $\text{Ker}(B - I_2) = \text{vect}\left(\begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix}\right)$ et $\text{Ker}(B - (1 - \alpha - \beta)I_2) = \text{vect}\left(\begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}\right)$. On peut donc choisir $S = \begin{pmatrix} \beta & -1 \\ \alpha & 1 \end{pmatrix}$.

10 Comme B est à coefficients strictement positifs, ce qui précède montre que la suite (B^k) converge vers la matrice

$$\Lambda = S \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} S^{-1} = \frac{1}{\alpha + \beta} \begin{pmatrix} \beta & -1 \\ \alpha & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -\alpha & \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{\alpha + \beta} \begin{pmatrix} \beta & \beta \\ \alpha & \alpha \end{pmatrix}$$

11 Tout d'abord, $\|\cdot\|_\infty$ est bien à valeurs dans \mathbb{R}_+ .

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ telle que $\|A\|_\infty = 0$. Alors, pour tout $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $\sum_{j=1}^n |A_{i,j}| = 0$. Comme tous les termes de ces sommes sont positifs, ils sont nuls. On en déduit que $A = 0$.

Soient maintenant $\lambda \in \mathbb{C}$ et $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. Alors, comme $|\lambda| \geq 0$,

$$\|\lambda A\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} \left(\sum_{j=1}^n |\lambda| |A_{i,j}| \right) = \max_{1 \leq i \leq n} \left(|\lambda| \sum_{j=1}^n |A_{i,j}| \right) = |\lambda| \max_{1 \leq i \leq n} \left(\sum_{j=1}^n |A_{i,j}| \right) = |\lambda| \|A\|_\infty$$

Soit $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$. Par inégalité triangulaire,

$$\sum_{j=1}^n |A_{i,j} + B_{i,j}| \leq \sum_{j=1}^n |A_{i,j}| + \sum_{j=1}^n |B_{i,j}| \leq \|A\|_\infty + \|B\|_\infty$$

On en déduit que

$$\|A + B\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |A_{i,j} + B_{i,j}| \leq \|A\|_\infty + \|B\|_\infty$$

On a bien prouvé que $\|\cdot\|_\infty$ était une norme.

Soit $(A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})^2$. Soit $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$.

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^n |(AB)_{i,j}| &= \sum_{j=1}^n \left| \sum_{k=1}^n A_{i,k} B_{k,j} \right| \\
 &\leq \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n |A_{i,k}| |B_{k,j}| \quad \text{par inégalité triangulaire} \\
 &= \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n |A_{i,k}| |B_{k,j}| \\
 &= \sum_{k=1}^n |A_{i,k}| \left(\sum_{j=1}^n |B_{k,j}| \right) \\
 &\leq \sum_{k=1}^n |A_{i,k}| \|B\|_\infty \\
 &= \|B\|_\infty \sum_{k=1}^n |A_{i,k}| \leq \|B\|_\infty \|A\|_\infty
 \end{aligned}$$

Par conséquent, $\|AB\|_\infty \leq \|A\|_\infty \|B\|_\infty$. La norme $\|\cdot\|_\infty$ est donc sous-multiplicative.

12 Soit $(A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})^2$. Soit $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$. Par inégalité triangulaire et en utilisant la question 2,

$$|(AB)_{i,j}| = \left| \sum_{k=1}^n A_{i,k} B_{k,j} \right| \leq \left(\sum_{k=1}^n |A_{i,k}|^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{k=1}^n |B_{k,j}|^2 \right)^{1/2}$$

On en déduit que

$$\|AB\|_2^2 = \sum_{1 \leq i, j \leq n} |(AB)_{i,j}|^2 \leq \sum_{1 \leq i, j \leq n} \left(\sum_{k=1}^n |A_{i,k}|^2 \right) \left(\sum_{k=1}^n |B_{k,j}|^2 \right) = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |A_{i,k}|^2 \right) \left(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n |B_{k,j}|^2 \right) = \|A\|_2^2 \|B\|_2^2$$

Puis $\|AB\|_2 \leq \|A\|_2 \|B\|_2$.

13 Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ telle que $\nu(A) = 0$. Comme N est une norme $S^{-1}AS = 0$ puis $A = 0$.

Soit $(\lambda, A) \in \mathbb{C} \times \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. Alors $\nu(\lambda A) = N(\lambda S^{-1}AS) = |\lambda| N(S^{-1}AS) = |\lambda| \nu(A)$.

Soit $(A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})^2$. Alors

$$\nu(A + B) = N(S^{-1}AS + S^{-1}BS) \leq N(S^{-1}AS) + N(S^{-1}BS) = \nu(A) + \nu(B)$$

Enfin,

$$\nu(AB) = N((S^{-1}AS)(S^{-1}BS)) \leq N(S^{-1}AS)N(S^{-1}BS) = \nu(A)\nu(B)$$

Donc ν est également une norme sous-multiplicative sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$.

14 Les matrices A et $S^{-1}AS$ sont semblables donc possèdent le même spectre. Ainsi $\rho(A) = \rho(S^{-1}AS)$.

15 χ_A est scindé sur \mathbb{C} donc A est trigonalisable. A est trigonalisable donc est semblable à une matrice triangulaire T dont on note $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ les coefficients diagonaux. Pour $k \in \mathbb{N}^*$, A^k est alors semblable à la matrice triangulaire T^k dont les coefficients diagonaux sont $\lambda_1^k, \dots, \lambda_n^k$. La question précédente permet d'affirmer que

$$\rho(A^k) = \rho(T^k) = \max_{1 \leq i \leq n} |\lambda_i^k| = \left(\max_{1 \leq i \leq n} |\lambda_i| \right)^k = \rho(T)^k = \rho(A)^k$$

De même, αA est semblable à αT donc

$$\rho(\alpha A) = \rho(\alpha T) = \max_{1 \leq i \leq n} |\alpha \lambda_i| = |\alpha| \max_{1 \leq i \leq n} |\lambda_i| = |\alpha| \rho(T) = |\alpha| \rho(A)$$

16 Soit λ une valeur propre de A . Notons X un vecteur propre associé et H la matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ dont toutes les colonnes sont égales à X . Comme $X \neq 0$, $H \neq 0$. De plus, $AH = \lambda H$. On en déduit que

$$|\lambda| N(H) = N(\lambda H) = N(AH) \leq N(A)N(H)$$

Comme $N(H) > 0$, $|\lambda| \leq N(A)$. Par conséquent,

$$\rho(A) = \max_{\lambda \in \text{Sp}(A)} |\lambda| \leq N(A)$$

17 On peut déjà dire que $D_\tau^{-1}TD_\tau$ est triangulaire supérieure comme produit de telles matrices. Ainsi

$$\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2, i > j \implies (D_\tau^{-1}TD_\tau)_{i,j} = 0$$

De plus, pour $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$ tel que $i \leq j$,

$$(D_\tau^{-1}TD_\tau)_{i,j} = \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n (D_\tau^{-1})_{i,k} T_{k,\ell} (D_\tau)_{\ell,j} = (D_\tau^{-1})_{i,i} T_{i,j} (D_\tau)_{j,j} = \tau^{j-i} T_{i,j}$$

18 D'après la question précédente, pour tout $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2, i \neq j \implies \lim_{\tau \rightarrow 0} (D_\tau^{-1}TD_\tau)_{i,j} = 0$ et $(D_\tau^{-1}TD_\tau)_{i,i} = T_{i,i}$. On en déduit que $\lim_{\tau \rightarrow 0} D_\tau^{-1}TD_\tau = \text{diag}(T_{1,1}, \dots, T_{n,n}) = L$. De plus, pour tout $\tau \in \mathbb{R}^*$, on a par inégalité triangulaire

$$\|D_\tau^{-1}TD_\tau\|_\infty - \|L\|_\infty \leq \|D_\tau^{-1}TD_\tau - L\|_\infty$$

donc

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \|D_\tau^{-1}TD_\tau\|_\infty = \|L\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} |T_{i,i}| = \rho(T)$$

Par définition de la limite, il existe donc $\delta > 0$ tel que

$$\forall \tau \in \mathbb{R}, |\tau| \leq \delta \implies \|D_\tau^{-1}TD_\tau\|_\infty \leq \rho(T) + \varepsilon$$

19 Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. Alors A est semblable à une matrice triangulaire T . On choisit alors $\tau \in \mathbb{R}^*$ tel que $|\tau| \leq \delta$ où δ est défini dans la question précédente. On pose enfin $N(M) = \|D_\tau^{-1}MD_\tau\|_\infty$ pour $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. La norme $\|\cdot\|_\infty$ est sous-multiplicative d'après la question 11 donc N est également une norme sous-multiplicative d'après la question 13. La question précédente et la question 14 montrent alors que

$$N(A) = \|D_\tau^{-1}TD_\tau\|_\infty \leq \rho(T) + \varepsilon = \rho(A) + \varepsilon$$

20 Supposons que $\rho(A) < 1$. Soit alors $\varepsilon > 0$ tel que $\rho(A) + \varepsilon < 1$ (on peut par exemple prendre $\varepsilon = \frac{1 - \rho(A)}{2}$). On choisit alors la norme N telle que précédemment. Par sous-multiplicativité,

$$\forall k \in \mathbb{N}^*, N(A^k) \leq N(A)^k \leq (\rho(A) + \varepsilon)^k$$

Puisque $0 \leq \rho(A) + \varepsilon < 1$, $\lim_{k \rightarrow +\infty} (\rho(A) + \varepsilon)^k = 0$ puis $\lim_{k \rightarrow +\infty} N(A^k) = 0$ i.e. (A^k) converge vers la matrice nulle.

Réciproquement supposons que (A^k) converge vers la matrice nulle. On se donne N une norme sous-multiplicative sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ (par exemple la norme $\|\cdot\|_\infty$). D'après la question 16

$$\forall k \in \mathbb{N}, 0 \leq \rho(A^k) \leq N(A^k)$$

On en déduit avec la question 15 que

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \rho(A)^k = \lim_{k \rightarrow +\infty} \rho(A^k) = 0$$

Ceci implique que $\rho(A) < 1$.

21 La matrice A étant symétrique réelle, elle est diagonalisable et ses sous-espaces propres sont orthogonaux.

22 Supposons que $r = 0$. Alors 0 est l'unique valeur propre de A . A étant diagonalisable, A est semblable à la matrice nulle : A est donc nulle. On en déduit par l'absurde que $r > 0$.

23 Comme A est symétrique réelle, il existe une base orthonormée (X_1, \dots, X_n) de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ formée de vecteurs propres de A . On note alors λ_k la valeur propre associée au vecteur propre X_k . Soit $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ unitaire. Alors $X = \sum_{k=1}^n (X_k | X) X_k$. Comme (X_1, \dots, X_n) est orthonormée,

$$X^T A X = \sum_{k=1}^n \lambda_k (X_k | X)^2 \leq \sum_{k=1}^n \mu (X_k | X)^2 = \mu \|X\|_2^2 = \mu$$

24 Supposons qu'on ait égalité dans l'inégalité précédente. Alors

$$\sum_{k=1}^n (\mu - \lambda_k) (X | X_k)^2 = 0$$

Les termes de cette somme étant positifs, $(\mu - \lambda_k) (X | X_k)^2 = 0$ pour tout $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$. On en déduit que $(\mu - \lambda_k) (X | X_k) = 0$ pour tout $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$. Alors

$$A X = \sum_{k=1}^n \lambda_k (X | X_k) X_k = \sum_{k=1}^n \mu (X | X_k) X_k = \mu X$$

25 Soit $X \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ unitaire. D'après la question 1

$$|X^T A X| \leq |X^T| |A| |X| = |X|^T A |X|$$

car A est positive. De plus,

$$\|X\|_2^2 = \sum_{k=1}^n |X_k|^2 = \sum_{k=1}^n X_k^2 = \|X\|_2^2 = 1$$

donc $|X|$ est également unitaire. D'après la question 23, $|X|^T A |X| \leq \mu$.

26 Soit λ une valeur propre de A . Notons X un vecteur propre unitaire associé à λ . D'après la question précédente,

$$|\lambda| = |X^T A X| \leq \mu$$

De plus, la question précédente montre aussi que $\mu \geq 0$. Ainsi, pour tout $\lambda \in \text{Sp}(A)$, $|\lambda| \leq \mu = |\mu|$. On en déduit que $r = \mu$.

27 Soit X un vecteur propre de A unitaire associé à la valeur propre r . D'après la question 25 et la question précédente,

$$r = |r| = |X^T A X| \leq |X|^T A |X| \leq \mu = r$$

On en déduit notamment que $|X|^T A |X| = r = \mu$. D'après la question 24, $|X|$ est donc un vecteur propre associé à la valeur propre r .

Comme $A > 0$ et $|X| \geq 0$, la question 1 montre que $A|X| = r|X| > 0$. On en déduit que $|X| > 0$.

28 On a de plus, $|AX| = |rX| = r|X| = A|X|$. Soit $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$. On a donc

$$\left| \sum_{j=1}^n A_{i,j} X_j \right| = \sum_{j=1}^n A_{i,j} |X_j| = \sum_{j=1}^n |A_{i,j} X_j|$$

D'après la question 4,

$$\exists \theta \in \mathbb{R}, \forall j \in \llbracket 1, n \rrbracket, A_{i,j} X_j = e^{i\theta} |A_{i,j} X_j| = e^{i\theta} A_{i,j} |X_j|$$

Comme $A > 0$, les $A_{i,j}$ ne sont jamais nuls. Ainsi

$$\forall j \in \llbracket 1, n \rrbracket, X_j = e^{i\theta} |X_j|$$

Notamment, $e^{i\theta} = \frac{X_1}{|X_1|} = \pm 1$. On en déduit que $X = \pm |X|$.

29 Supposons que $\dim \text{Ker}(A - rI_n) > 1$. On peut donc trouver deux vecteurs unitaires orthogonaux X et Y dans $\text{Ker}(A - rI_n)$. Les deux questions précédentes montrent que les coefficients de X sont tous strictement positifs ou tous strictement négatifs, de même que ceux de Y . On en déduit que $(X | Y) = \sum_{k=1}^n X_k Y_k \neq 0$, ce qui contredit le fait que X et Y sont orthogonaux. Ainsi $\dim \text{Ker}(A - rI_n) = 1$.

30 Comme A est diagonalisable, la multiplicité de r est égale à la dimension du sous-espace propre $\text{Ker}(A - rI_n)$, à savoir 1. Notons X un vecteur directeur unitaire de $\text{Ker}(A - rI_n)$.

Supposons que $-r \in \text{Sp}(A)$. Soit alors un vecteur unitaire $Y \in \text{Ker}(A + rI_n)$. Alors $AY = -rY$. Puis, comme $A > 0$, $A|Y| = |AY| = |rY| = r|Y|$. On en déduit que $|Y| \in \text{Ker}(A - rI_n) = \text{vect}(X)$. Comme $|Y|$ et X sont unitaires et positifs, $|Y| = X$. On montre comme à la question 28 que $Y = \pm |Y|$. On en déduit que $Y = \pm X \in \text{Ker}(A - rI_n)$. Comme $r \neq -r$, $X \in \text{Ker}(A - rI_n) \cap \text{Ker}(A + rI_n) = \{0\}$, ce qui est absurde. Ainsi $-r \notin \text{Sp}(A)$.

REMARQUE. Je ne vois pas l'intérêt de parler de la multiplicité au début de la question mais peut-être ai-je raté quelque chose.

31 Considérons $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$. Alors $\chi_A = X^2 - 1$ donc $\text{Sp}(A) = \{-1, 1\}$.

32 r^p est la plus grande valeur propre de A^p et A^p est strictement positive donc $\text{Ker}(A^p - r^p I_n)$ est de dimension 1, engendré par un vecteur strictement positif d'après les questions 28 et 29. Comme A et I_n commutent, $A^p - r^p I_n = B(A - rI_n)$ avec $B = \sum_{k=0}^{p-1} r^{p-1-k} A^k$. Ainsi $\text{Ker}(A - rI_n) \subset \text{Ker}(A^p - r^p I_n)$. Comme $\text{Ker}(A - rI_n)$ n'est pas nul, ces deux noyaux sont égaux.

33 Supposons p impair. Si $-r$ était valeur propre de A , alors $(-r)^p = -r^p$ serait valeur propre de A^p , ce qui contredirait le fait que r^p est la seule valeur propre de A^p de module égal à r^p . Ainsi $-r$ n'est pas valeur propre de A . Si p est pair, $-r$ et r sont deux racines distinctes de $X^p - r^p$ donc $(X - r)(X + r)$ divise $X^p - r^p$. De plus, $X - r$ et $X + r$ sont premiers entre eux donc, d'après le lemme des noyaux,

$$\text{Ker}(A - rI_n) \oplus \text{Ker}(A + rI_n) \subset \text{Ker}(A^p - r^p I_n)$$

Comme $\text{Ker}(A - rI_n)$ et $\text{Ker}(A^p - r^p I_n)$ sont de dimension 1, $\dim \text{Ker}(A + rI_n) = 0$ i.e. $-r$ n'est pas valeur propre de A . Quel que soit le cas de figure, r est l'unique valeur propre de A de module égal à r .

34 Soit $\lambda \in \text{Sp}(A)$. Il existe donc $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{C})$ non nul tel que $AX = \lambda X$. Soit $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ tel que $|X_i| = \|X\|_\infty$. Alors

$$\sum_{j=1}^n A_{i,j} X_j = \lambda X_i$$

ou encore

$$(\lambda - A_{i,i})X_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{i,j} X_j$$

Par inégalité triangulaire

$$|\lambda - A_{i,i}| |X_i| \leq \sum_{j=1, j \neq i}^n |A_{i,j}| |X_j|$$

Par définition de i ,

$$|\lambda - A_{i,i}| \|X\|_\infty \leq \sum_{j=1, j \neq i}^n |A_{i,j}| \|X\|_\infty$$

Comme $X \neq 0$, $\|X\|_\infty > 0$ de sorte que

$$|\lambda - A_{i,i}| \leq \sum_{j=1, j \neq i}^n |A_{i,j}|$$

ce qui conclut.

35 On procède comme indiqué dans l'énoncé. Soit $\lambda \in \text{Sp}(A) = \text{Sp}(D^{-1}AD)$. Posons $C = D^{-1}AD$. Alors $C_{i,j} = X_i^{-1} A_{i,j} X_j$ pour tout $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$. On applique alors la question précédente à C . Il existe donc $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ tel que

$$|\lambda - C_{i,i}| \leq \sum_{j=1, j \neq i}^n |C_{i,j}|$$

Ceci s'écrit encore

$$|\lambda - A_{i,i}| \leq \sum_{j=1, j \neq i}^n X_i^{-1} |A_{i,j}| X_j$$

On en déduit que

$$|\lambda - A_{i,i}| \leq X_i^{-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{i,j} X_j$$

Or $BX = \rho(B)X$ donc, en particulier,

$$\sum_{j=1}^n B_{i,j} X_j = \rho(B) X_i$$

ou encore

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n B_{i,j} X_j = (\rho(B) - B_{i,i}) X_i$$

En reportant dans la dernière inégalité,

$$|\lambda - A_{i,i}| \leq \rho(B) - B_{i,i}$$

ce qui conclut.