



Devoir surveillé 4* - Correction

Exercice 1

E3A PSI 2013 maths B

à partir d'un corrigé de C. Devulder

Partie A.

1. Pour tout $x > 0$, $f_n(x) = O_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right)$ est, par comparaison, le terme général d'une série absolument convergente.

Finalement, $\sum f_n$ converge simplement sur \mathbb{R}^* .

2. La fonction f_n est décroissante et positive sur $]0, +\infty[$ donc :

$$\|f_n\|_{\infty,]0, +\infty[} = \lim_{x \rightarrow 0} f_n(x) = \frac{1}{n}.$$

La série harmonique $\sum \frac{1}{n}$ donc $\sum f_n$ ne converge pas normalement sur $]0, +\infty[$;

3. Si $0 < x \leq y$ alors pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, $f_n(x) \geq f_n(y)$. En sommant, de 1 à N et en passant à la limite quand $N \rightarrow +\infty$, on obtient $f(x) \geq f(y)$ ainsi

f est ainsi décroissante sur $]0, +\infty[$.

4. On utilise le théorème de dérivation terme à terme des séries de fonctions.

- $\forall n \in \mathbb{N}^*$, $f_n \in \mathcal{C}^1(]0, +\infty[)$ et $f'_n : x \mapsto -\frac{2n^2x}{(1 + (nx)^2)^2}$.
- $\sum f_n$ converge simplement sur $]0, +\infty[$.
- $\forall [a, b] \subset]0, +\infty[$, $\forall x \in [a, b]$, $\forall n \in \mathbb{N}^*$, $|f'_n(x)| \leq \frac{2n^2b}{(1 + (na)^2)^2}$.

Ainsi $\|f'_n\|_{\infty, [a, b]} \leq \frac{2n^2b}{(1 + (na)^2)^2} = O_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right)$ est le terme général d'une série absolument convergente ce qui nous indique que $\sum f'_n$ converge normalement (et donc uniformément) sur tout segment de $]0, +\infty[$.

Le théorème s'applique et indique que f est de classe \mathcal{C}^1 sur tout $[a, b] \subset]0, +\infty[$. Elle l'est donc sur $]0, +\infty[$ avec

$$\forall x > 0, \quad f'(x) = -2x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{(1 + (nx)^2)^2}.$$

Remarque : on obtient ainsi que f' est négative sur $]0, +\infty[$ ce qui redonne la décroissance.

5. On veut maintenant utiliser le théorème de double limite.

- Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, on a $\lim_{x \rightarrow +\infty} f_n(x) = 0$.
- $\forall n \in \mathbb{N}^*$, on a $\forall x \geq 1$, $|f_n(x)| \leq \frac{1}{1 + n^2}$. Ainsi $\|f_n\|_{\infty, [1, +\infty[} \leq \frac{1}{1 + n^2}$ est le terme général d'une série absolument convergente ce qui nous indique que $\sum f_n$ converge normalement sur $[1, +\infty[$ et donc au voisinage de $+\infty$.

On conclut que $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$.

6. (a) Fixons $x > 0$. La fonction $g_x : t \mapsto \frac{1}{1+t^2x^2}$ est décroissante sur \mathbb{R}^{+*} . En particulier,

$$\forall p \geq 1, \forall t \in [p, p+1], g_x(p+1) \leq g_x(t) \leq g_x(p)$$

En intégrant cette inégalité sur $[p, p+1]$, on obtient

$$\forall p \in \mathbb{N}^*, \frac{1}{1+(p+1)^2x^2} \leq \int_p^{p+1} \frac{dt}{1+t^2x^2} \leq \frac{1}{1+p^2x^2}.$$

(b) Fixons $x > 0$ et sommions ces inégalités pour $p = 1, \dots, n$:

$$\forall n \geq 1, \sum_{p=1}^n \frac{1}{1+(p+1)^2x^2} \leq \int_1^{n+1} \frac{dt}{1+t^2x^2} \leq \sum_{p=1}^n \frac{1}{1+p^2x^2}$$

L'application $t \mapsto \frac{1}{1+t^2x^2}$ a pour primitive sur \mathbb{R} la fonction $t \mapsto \frac{1}{x} \text{Arctan}(tx)$. Les quantités précédentes admettent une limite quand $n \rightarrow +\infty$ et ce passage à la limite donne

$$f(x) - \frac{1}{1+x^2} \leq \frac{\pi}{2x} - \frac{\text{Arctan}(x)}{x} \leq f(x)$$

ou encore

$$\frac{\pi}{2x} - \frac{\text{Arctan}(x)}{x} \leq f(x) \leq \frac{1}{1+x^2} + \frac{\pi}{2x} - \frac{\text{Arctan}(x)}{x}$$

(c) Majorant et minorant étant tous deux équivalents à $\frac{\pi}{2x}$ quand $x \rightarrow 0$, on en déduit que $f(x) \underset{x \rightarrow 0}{\sim} \frac{\pi}{2x}$.

7. L'allure de la courbe de f est celle d'une branche d'hyperbole sur $]0, +\infty[$.

Partie B.

8. Soit $x > 0$ fixé.

L'application $u_x : t \mapsto \frac{\sin(t)}{e^{xt} - 1}$ est continue sur \mathbb{R}^{+*} , prolongeable par continuité en 0 (par la valeur $1/x$) et dominée par $1/t^2$ au voisinage de $+\infty$ (car $x > 0$ et par croissances comparées entre puissance et exponentielle puisque $|u_x(t)| \leq \frac{1}{e^{xt} - 1} \sim e^{-xt}$). Ainsi, u_x est donc intégrable sur \mathbb{R}^+ et donc

Pour tout $x > 0$, $\varphi(x)$ existe.

9. (a) L'application $t \mapsto e^{-kxt} \sin(t)$ est continue sur $[0, +\infty[$ et $|e^{-kxt} \sin(t)| \leq e^{-kxt}$. Or $t \mapsto e^{-kxt}$ est intégrable sur $[0, +\infty[$ (car $kx > 0$) donc par comparaison, l'intégrale J_k est convergente.

(b) On a

$$\int_0^{+\infty} e^{-kxt} \sin(t) dt = \text{Im} \left(\int_0^{+\infty} e^{(i-kx)t} dt \right) = \text{Im} \left(\left[\frac{e^{(i-kx)t}}{i-kx} \right]_0^{+\infty} \right)$$

On obtient (limite à justifier) : $J_k = -\text{Im} \left(\frac{1}{i-kx} \right) = \frac{1}{1+k^2x^2}$.

(c) On a (somme géométrique de raison $e^{-xt} \in [0, 1[$)

$$\forall x > 0, \forall t > 0, \frac{\sin(t)}{e^{xt} - 1} = \sin(t) e^{-xt} \sum_{k=0}^{\infty} e^{-kxt} = \sum_{k=1}^{\infty} \sin(t) e^{-kxt}$$

Le paramètre réel $x > 0$ étant **fixé**, on veut pouvoir intégrer terme à terme (par rapport à la variable t). On utilise le théorème de convergence dominée pour les séries de fonctions.

- On pose $h_k(t) = \sin(t)e^{-kxt}$.

Par construction, $\sum h_k$ converge simplement sur $I = \mathbb{R}^{+*}$ vers $t \mapsto \frac{\sin(t)}{e^{xt} - 1}$ qui est continue par morceaux sur \mathbb{R}^{+*} .

- Les fonctions h_k sont elles aussi continues par morceaux sur \mathbb{R}^{+*} .
- On a pour tout $n \in \mathbb{N}^*$ et tout $t > 0$:

$$\begin{aligned} \left| \sum_{k=1}^n h_k(t) \right| &= \left| \sin(t) \sum_{k=1}^n e^{-kxt} \right| = |\sin(t)e^{-xt}| \left| \frac{1 - e^{-nxt}}{1 - e^{-xt}} \right| \\ &\leq |\sin(t)| \left| \frac{e^{-xt}}{1 - e^{-xt}} \right| \\ &\leq \frac{|\sin(t)|}{e^{xt} - 1} \end{aligned}$$

et on a vu que la fonction majorante est intégrable sur \mathbb{R}^{+*} .

On peut ainsi appliquer le théorème de convergence dominée pour obtenir

$$\forall x > 0, \quad \varphi(x) = \sum_{k \geq 1} J_k = f(x).$$

Problème 1

Centrale 2019 PSI (extraits)

un corrigé de L. Cozar

I Premiers résultats

Q 1. Soit \mathcal{B} une base de E et u un endomorphisme de E , notons $M = \text{Mat}_{\mathcal{B}}(u)$. Si u est nilpotent d'indice 1, cela signifie d'après l'énoncé que $M^1 = M = 0$, donc que $u = 0$. En conclusion :

il y a donc un unique endomorphisme nilpotent d'indice de nilpotence égal à 1 et c'est l'endomorphisme nul.

I.A - Réduction d'une matrice de $\mathcal{M}_2(\mathbb{C})$ nilpotente d'indice 2

Q 2. Avec les notations de la question 1, puisque $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u^k) = M^k$ pour tout entier naturel k , le fait que u soit nilpotent d'indice p signifie que M l'est donc que $M^p = 0$ et, par minimalité de p , $M^{p-1} \neq 0, \dots, M \neq 0$. Ainsi, $u^p = 0$ et $u^{p-1} \neq 0$. Comme $u^{p-1} \neq 0$, on en déduit (par définition de ce qu'est l'endomorphisme nul)

l'existence d'un vecteur x de E tel que $u^{p-1}(x) \neq 0$.

Q 3. Soit une famille de scalaires $(\lambda_k)_{0 \leq k \leq p-1} \in \mathbb{C}^p$ telle que $\sum_{k=0}^{p-1} \lambda_k u^k(x) = 0$ (*).

Si on avait $(\lambda_0, \dots, \lambda_{p-1}) \neq (0, \dots, 0)$, on pourrait définir l'entier $i = \min(\{0 \leq k \leq p-1 \mid \lambda_k \neq 0\})$ de sorte que $\lambda_0 = \dots = \lambda_{i-1} = 0$ et $\lambda_i \neq 0$. En composant la relation (*) par u^{p-1-i} (on le peut car $p-1-i \geq 0$ par construction),

on aurait donc, par linéarité de u , $\sum_{k=0}^{p-1} \lambda_k u^{p-1-i+k}(x) = u(0) = 0$, d'où

$$\sum_{k=i}^{p-1} \lambda_k u^{p-1-i+k}(x) = 0.$$

Comme $u^p = 0$, il ne reste dans cette somme que $\lambda_i u^{p-1}(x) = 0$. C'est impossible puisque $\lambda_i \neq 0$ et $u^{p-1}(x) \neq 0$ d'après la question 2. On conclut ce raisonnement par l'absurde : $(\lambda_0, \dots, \lambda_{p-1}) = (0, \dots, 0)$. Ainsi,

$$(u^k(x))_{0 \leq k \leq p-1} \text{ est libre.}$$

Cette famille libre admet p vecteurs dans l'espace E de dimension $n = 2$. On sait d'après le cours que le nombre de vecteurs de cette famille est inférieur à la dimension de l'espace : $p \leq 2$. Or par hypothèse, $p \geq 2$, d'où

$$p = 2.$$

Q 4. Comme u est nilpotent d'indice 2 d'après la question précédente, $u \neq 0$ et $u^2 = u \circ u = 0$, on sait d'après le cours qu'alors $\text{Im}(u) \subset \text{Ker}(u)$ donc $\dim(\text{Im}(u)) = \text{rg}(u) \leq \dim(\text{Ker}(u))$. Or, d'après la formule du rang appliquée à l'endomorphisme u de \mathbb{R}^2 , il vient $2 = \dim(\text{Im}(u)) + \dim(\text{Ker}(u))$. Puisque $\text{rg}(u) > 0$ car $u \neq 0$, on ne peut avoir que $\dim(\text{Im}(u)) = \dim(\text{Ker}(u)) = 1$. Par inclusion et égalité des dimensions, on peut conclure que

$$\text{Im}(u) = \text{Ker}(u).$$

Q 5. D'après les questions 2 et 3, il existe un vecteur x de E tel que $(x, u(x))$ soit libre dans E de dimension 2, le cours nous apprend alors que $\mathcal{B} = (x, u(x))$ est une base de E .

En posant $y = u(x)$, on a $u(x) = y$ et $u(y) = u(u(x)) = u^2(x) = 0$, la matrice de u dans la base \mathcal{B} vérifie donc

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = J_2.$$

Q 6. (\implies) Soit $A \in \mathcal{M}_2(\mathbb{C})$ nilpotente et u l'endomorphisme de \mathbb{C}^2 canoniquement associé à A . Comme A , u est nilpotent d'indice $p \in \mathbb{N}^*$. On traite les deux cas des questions précédentes avec $E = \mathbb{C}^2$.

- Si $p = 1$, d'après la question 1, $u = 0$ donc $A = 0$ et on a bien $\text{tr}(A) = \det(A) = 0$.
- Si $p \geq 2$, on a vu en question 5 qu'il existait une base \mathcal{B} de \mathbb{C}^2 telle que $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u) = J_2$. Comme A et J_2 représentent le même endomorphisme dans deux bases différentes, elles sont semblables (plus précisément si on note P la matrice de passage de la base canonique de \mathbb{C}^2 à \mathcal{B} , on a $A = PJ_2P^{-1}$) donc elles ont même trace et même déterminant. Comme $\text{tr}(J_2) = \det(J_2) = 0$, on a encore $\text{tr}(A) = \det(A) = 0$.

(\impliedby) Soit $A \in \mathcal{M}_2(\mathbb{C})$ telle que $\text{tr}(A) = \det(A) = 0$. On sait d'après le cours que $\chi_A = X^2 - \text{tr}(A)X + \det(A) = X^2$. D'après le théorème de Cayley-Hamilton, on a donc $A^2 = 0$ car χ_A annule A : A est bien nilpotente d'indice $p \leq 2$.

Par conséquent, on conclut par double implication que

$$A \in \mathcal{M}_2(\mathbb{C}) \text{ est nilpotente} \iff (\text{tr}(A) = \det(A) = 0).$$

I.B - Réduction d'une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ nilpotente d'indice 2

Q 7. À nouveau, comme u est nilpotent d'indice 2, on a $u^2 = u \circ u = 0$ donc $\text{Im}(u) \subset \text{Ker}(u)$.

Il vient donc $\text{rg}(u) \leq \dim(\text{Ker}(u))$. On ajoute $\text{rg}(u)$ de part et d'autre de cette inégalité pour avoir, avec la formule du rang, l'inégalité

$$2 \text{rg}(u) = \boxed{2r \leq n} = \dim(E) = \text{rg}(u) + \dim(\text{Ker}(u)).$$

Q 8. Comme $\text{Im}(u)$ est de dimension $r = \text{rg}(u)$, il existe une base (w_1, \dots, w_r) de $\text{Im}(u)$. Par définition de l'image, il existe des vecteurs e_1, \dots, e_r tels que $u(e_1) = w_1, \dots, u(e_r) = w_r$.

Vérifions que $\mathcal{B} = (e_1, u(e_1), e_2, u(e_2), \dots, e_r, u(e_r))$ est une base de E . Soit $(\lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2, \dots, \lambda_r, \mu_r) \in \mathbb{C}^{2r}$ telle que

$$\lambda_1 e_1 + \mu_1 u(e_1) + \lambda_2 e_2 + \mu_2 u(e_2) + \dots + \lambda_r e_r + \mu_r u(e_r) = 0 \quad (*).$$

On compose (*) par u donc, comme $u^2 = 0$, il vient $\lambda_1 w_1 + \lambda_2 w_2 + \dots + \lambda_r w_r = 0$. Mais on sait que (w_1, \dots, w_r) est libre donc $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_r = 0$. Il ne reste donc plus dans (*) que $\mu_1 w_1 + \mu_2 w_2 + \dots + \mu_r w_r = 0$ qui amène encore la

conclusion $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_r = 0$ car (w_1, \dots, w_r) est libre. On vient de prouver que \mathcal{B} est libre.

Or $\dim(E) = n = 2r = \text{rg}(u) + \dim(\text{Ker}(u))$ par la formule du rang donc \mathcal{B} admet autant de vecteurs que la dimension de E . On peut conclure que

$$\mathcal{B} = (e_1, u(e_1), e_2, u(e_2), \dots, e_r, u(e_r)) \text{ est une base de } E.$$

Q 9. Pour k tel que $1 \leq k \leq r$, $u(u(e_k)) = u^2(e_k) = 0$ donc, par construction de \mathcal{B} , la matrice de u dans \mathcal{B} vaut

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u) = \text{diag}(J_2, \dots, J_2) \in \mathcal{M}_{2r}(\mathbb{C}).$$

Q 10. On raisonne comme en question 8. Comme $\text{rg}(u) = r$, il existe une base (w_1, \dots, w_r) de $\text{Im}(u)$, puis des vecteurs e_1, \dots, e_r tels que $u(e_1) = w_1, \dots, u(e_r) = w_r$. Comme $\text{Im}(u) \subset \text{Ker}(u)$, (w_1, \dots, w_r) est une famille libre de vecteurs de $\text{Ker}(u)$. D'après le théorème de la base incomplète, comme $\dim(\text{Ker}(u)) = \dim(E) - \text{rg}(u) = n - r \geq r$ par la formule du rang, on peut trouver des vecteurs v_1, \dots, v_{n-2r} dans $\text{Ker}(u)$ pour compléter (w_1, \dots, w_r) en une base $\mathcal{B}' = (w_1, \dots, w_r, v_1, \dots, v_{n-2r})$ de $\text{Ker}(u)$. Vérifions que $\mathcal{B} = (e_1, u(e_1), e_2, u(e_2), \dots, e_r, u(e_r), v_1, \dots, v_{n-2r})$ est une base de E . Soit $(\lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2, \dots, \lambda_r, \mu_r, \eta_1, \dots, \eta_{n-2r}) \in \mathbb{C}^{2r}$ telle que

$$\lambda_1 e_1 + \mu_1 u(e_1) + \lambda_2 e_2 + \mu_2 u(e_2) + \dots + \lambda_r e_r + \mu_r u(e_r) + \eta_1 v_1 + \dots + \eta_{n-2r} v_{n-2r} = 0 (*).$$

On compose (*) par u pour obtenir $\lambda_1 w_1 + \lambda_2 w_2 + \dots + \lambda_r w_r = 0$. Or (w_1, \dots, w_r) est libre donc $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_r = 0$. Il ne reste donc plus dans (*) que $\mu_1 w_1 + \mu_2 w_2 + \dots + \mu_r w_r + \eta_1 v_1 + \dots + \eta_{n-2r} v_{n-2r} = 0$ qui amène encore la conclusion $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_r = \eta_1 = \dots = \eta_{n-2r} = 0$ car \mathcal{B}' est libre (c'est une base de $\text{Ker}(u)$). Ainsi, \mathcal{B} est libre.

Comme \mathcal{B} admet autant de vecteurs que la dimension de E . On peut conclure que

$$\mathcal{B} = (e_1, u(e_1), e_2, u(e_2), \dots, e_r, u(e_r), v_1, \dots, v_{n-2r}) \text{ est une base de } E.$$

Q 11. Pour k tel que $1 \leq k \leq r$, on a $u(u(e_k)) = u^2(e_k) = 0$. Pour k tel que $1 \leq k \leq n - 2r$, on a $u(v_k) = 0$ car $v_k \in \text{Ker}(u)$ donc, par construction de \mathcal{B} , la matrice de u dans \mathcal{B} vaut

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u) = \text{diag}(J_2, \dots, J_2, 0_{n-2r}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}).$$

I.C - Valeurs propres, polynôme caractéristique, polynômes annulateurs d'une matrice nilpotente

Q 12. Les valeurs propres de A sont les racines de χ_A d'après le cours. Comme tout polynôme complexe admet au moins une racine d'après le théorème de d'Alembert-Gauss, le spectre de A n'est pas vide.

Soit $\lambda \in \mathbb{C}$ une valeur propre de A . Il existe donc $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{C})$ tel que $X \neq 0$ et $AX = \lambda X$. Soit $i \in \mathbb{N}$ tel que $A^i X = \lambda^i X$, alors $A^{i+1} X = (A A^i) X = A(A^i X) = \lambda^i A X = \lambda^{i+1} X$. On a donc établi par récurrence (initialisation $A X = \lambda X$) que pour tout entier $i \in \mathbb{N}^*$, on a $A^i = \lambda^i X$.

Pour $i = p$, on obtient $A^p X = 0 X = 0 = \lambda^p X$ car $A^p = 0$. Or $X \neq 0$ donc $\lambda^p = 0$ ce qui prouve que $\lambda = 0$.

$$\text{Si } A \text{ est nilpotente, alors } 0 \text{ est l'unique valeur propre de } A.$$

Q 13. Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ telle que A est nilpotente et diagonalisable. On vient de voir que $\text{Sp}(A) = \{0\}$. Mais on sait que si A est diagonalisable, $\prod_{\lambda \in \text{Sp}(A)} (X - \lambda)$ est annulateur de A , ce qui donne ici X annulateur de A d'où $A = 0$.

Réciproquement, la matrice nulle est à la fois nilpotente et diagonalisable (toute base est une base de vecteurs propres).

$$\text{La seule matrice } A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}) \text{ à la fois nilpotente et diagonalisable est la matrice nulle.}$$

Q 14. (\implies) Si $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ est nilpotente, alors $\text{Sp}(A) = \{0\}$ d'après la question 12. La seule valeur propre de A est donc 0 et elle est forcément de multiplicité n dans χ_A puisque $\deg(\chi_A) = n$. Ainsi, $\chi_A = X^n$.

(\Leftarrow) Si $\chi_A = X^n$, d'après le théorème de Cayley-Hamilton, $\chi_A(A) = 0$ donc $A^n = 0$ et A est bien nilpotente. Par double implication, on vient de montrer que pour $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$,

$$A \text{ est nilpotente} \iff \chi_A = X^n.$$

Q 15. Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ dont 0 est l'unique valeur propre. Comme à la question précédente, l'ordre de multiplicité de 0 dans χ_A ne peut être que n donc $\chi_A = X^n$ ce qui justifie que $\chi_A = X^n$ donc que A est nilpotente d'après la question 14. On a donc avec 12 et 15, pour $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$:

$$A \text{ est nilpotente} \iff \text{Sp}(A) = \{0\}.$$

Q 16. Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ une matrice triangulaire à diagonale nulle. Pour $\lambda \in \mathbb{C}$, la matrice $\lambda I_n - A$ est aussi triangulaire avec des λ sur la diagonale donc $\chi_{\lambda I_n - A}(\lambda) = \lambda^n$ ce qui justifie que $\chi_A = X^n$. D'après la question 14, la matrice A est donc nilpotente.

$$A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}) \text{ triangulaire à diagonale nulle est nilpotente.}$$

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ nilpotente. On sait d'après le cours que A est trigonalisable car $\chi_A = X^n$ est scindé dans $\mathbb{C}[X]$. La matrice A est donc semblable à une matrice triangulaire inférieure (par exemple) avec les valeurs propres sur la diagonale. Mais comme 0 est la seule valeur propre de A ,

$$A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}) \text{ nilpotente est semblable à une matrice triangulaire à diagonale nulle.}$$

Q 17. Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ nilpotente d'indice p et $P = X^p Q \in \mathbb{C}[X]$ avec $Q \in \mathbb{C}[X]$. Alors, comme $P(A) = A^p Q(A)$ et que $A^p = 0$, on a bien $P(A) = 0$. Par conséquent,

$$\text{si } P \in \mathbb{C}[X] \text{ est multiple de } X^p \text{ et } A \text{ nilpotente d'indice } p, \text{ alors } P(A) = 0.$$

Q 18. Comme P est un polynôme annulateur de A , on sait d'après le cours que toute valeur propre de A est racine de P . Or 0 est la seule valeur propre de A nilpotente d'après la question 12. Ainsi,

$$\text{Si } A \text{ est nilpotente et } P \text{ annulateur de } A, \text{ alors } 0 \text{ est racine de } P.$$

Q 19. D'après le théorème de d'Alembert-Gauss, on peut écrire $Q = \prod_{k=1}^q (X - \lambda_k)^{m_k}$ où $\lambda_1, \dots, \lambda_q$ sont les différentes racines de Q et m_1, \dots, m_q leurs multiplicités respectives. Comme $Q(0) \neq 0$, aucune de ces racines n'est nulle. Par conséquent, $Q(A) = \prod_{k=1}^q (A - \lambda_k I_n)^{m_k}$ d'après les relations sur les polynômes de matrice.

Or, pour k tel que $1 \leq k \leq q$, le complexe λ_k n'est pas valeur propre de A puisque $\text{Sp}(A) = \{0\}$ d'après la question 12, ainsi la matrice $A - \lambda_k I_n$ est inversible. En tant que produit de puissances de matrices inversibles (autrement dit $GL_n(\mathbb{C})$ est stable par produit, c'est même un groupe pour la loi \times),

$$Q(A) \text{ est inversible.}$$

Comme $P(A) = A^m Q(A) = 0$, en multipliant à droite par $Q(A)^{-1}$, on obtient $A^m = 0$. Mais par définition de l'indice de nilpotence de A , $A \neq 0, A^2 \neq 0, \dots, A^{p-1} \neq 0$ et $A^p = 0$, ce qui justifie que $m \geq p$. Ainsi,

$$P = X^m Q = X^p (X^{m-p} Q) \text{ est bien un multiple de } X^p.$$

Réciproquement, même si ce n'est pas demandé, si $P = X^p Q$ avec $Q \in \mathbb{C}[X]$, on a $P(A) = A^p Q(A) = 0 \times Q(A) = 0$ donc P annule A . Par double implication, on a montré l'équivalence suivante,

$$\boxed{\text{si } A \text{ est nilpotente d'indice } p \text{ et } P \in \mathbb{C}[X], P(A) = 0 \iff X^p \text{ divise } P.}$$

Autrement dit, même si la notion est hors programme, le polynôme minimal de A nilpotente d'indice p est X^p .

I.D - Racines carrées de matrices nilpotentes

Q 20. Comme les deux dernières colonnes de A sont respectivement 3 fois et -7 fois la première qui est non nulle, on a $\text{rg}(A) = 1$. Il vient donc

$$\boxed{\text{rg}(A) = 1 \text{ et } \text{tr}(A) = 1 + 6 - 7 = 0.}$$

D'après le cours, on sait que l'ordre de multiplicité de 0 dans χ_A est supérieur ou égal à $\dim(E_0(A)) = \dim(\text{Ker}(A))$ or $\dim(\text{Ker}(A)) = 3 - \text{rg}(A) = 3 - 1 = 2$ par la formule du rang. Ainsi, $(X - 0)^2 = X^2$ divise χ_A . Par conséquent, comme χ_A est de degré 3 et unitaire, on a $\chi_A = X^3 + aX^2$. De plus, le cours nous apprend que $a = -\text{tr}(A) = 0$ car $\chi_A = X^3 - \text{tr}(A)X^2 + \dots - \det(A)$. Finalement,

$$\boxed{\chi_A = X^3.}$$

Par le théorème de Cayley-Hamilton, $A^3 = 0$ donc A est nilpotente. Un calcul élémentaire montre que $A^2 = 0$. On pouvait aussi dire que $A = XY^T$ avec $X = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$ et $Y = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ -7 \end{pmatrix}$ donc $A^2 = XY^T XY^T = (Y|X)XY^T = (X|Y)A$ car $(Y|X) = Y^T X$. Comme $(X|Y) = 1 \times 1 + 2 \times 3 + 1 \times (-7) = 0$, on a à nouveau $A^2 = 0$, d'où

$$\boxed{A \text{ est nilpotente d'indice } 2.}$$

Q 21. On cherche à montrer que A est semblable à $\text{diag}(J_2, J_1) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = T$ ce qui revient, par la formule de

changement de base, à trouver une base $\mathcal{B} = (v_1, v_2, v_3)$ de \mathbb{C}^3 telle que $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u) = T$.

Il s'agit donc de trouver v_1, v_2, v_3 linéairement indépendants tels que $u(v_1) = v_2$, $u(v_2) = u(v_3) = 0$.

Procédons par ordre :

- on cherche v_2 tel que $v_2 = u(v_1) \neq 0$ or, comme $\text{rg}(u) = 1$ et $\text{Im}(u) = \text{vect}(X)$, il suffit de prendre $v_2 = X = (1, 2, 1)$.
- on cherche v_1 tel que $u(v_1) = v_2$ ce qui nous conduit à prendre $v_1 = e_1 = (1, 0, 0)$ d'après la matrice A .
- on cherche v_3 tel que $u(v_3) = 0$ donc $v_3 \in \text{Ker}(u)$ qui est le plan d'équation $x + 3y - 7z = 0$ d'après la matrice A , il suffit de prendre n'importe quel vecteur de ce plan qui n'est pas colinéaire à v_2 , par exemple $v_3 = (3, -1, 0)$.

Réciproquement, $\mathcal{B} = (v_1, v_2, v_3)$ est bien une base de \mathbb{C}^3 car en posant $P = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ qui est la matrice de la famille

\mathcal{B} dans la base canonique de \mathbb{C}^3 , on a $\det(P) = 1 \neq 0$ donc P est inversible.

Par construction, $u(v_1) = v_2$, $u(v_2) = u(v_3) = 0$ donc $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u) = T$. Comme A est la matrice de u dans la base canonique, A et T représentent le même endomorphisme dans deux bases différentes donc elles sont semblables. Plus précisément, la matrice P définie ci-dessus étant la matrice de passage de la base canonique à \mathcal{B} , on a

$$\boxed{A = PTP^{-1} \text{ avec } T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \text{diag}(J_2, J_1); \text{ de plus } P^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & -7 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 2 \end{pmatrix}}$$

car on a clairement $e_1 = v_1$, $e_2 = 3v_1 - v_3$ et $e_3 = v_2 - 2e_2 - e_1 = v_2 + 2v_3 - 6v_1 - v_1 = -7v_1 + v_2 + 2v_3$.

Q 22. Si $R^2 = A$, comme $A^2 = 0$, il vient $R^4 = (R^2)^2 = A^2 = 0$ donc R est nilpotente. Puisque $R^2 = A$, on a $\rho^2 = u$. Ainsi, $\rho \circ u = \rho^3 = u \circ \rho$ donc ρ et u commutent. On sait d'après le cours qu'alors

$$\boxed{\text{Im}(u) \text{ et } \text{Ker}(u) \text{ sont stables par } \rho \text{ et } \rho \text{ est nilpotent car } R \text{ l'est.}}$$

Q 23. Soit toujours $R \in \mathcal{M}_3(\mathbb{C})$ telle que $R^2 = A$, posons $R' = P^{-1}RP$ comme proposé par l'énoncé avec la matrice P de la question 21. Par la formule de changement de base, R' est la matrice de ρ dans la base \mathcal{B} .

- Comme $\text{Im}(u)$ est stable par ρ , il existe $d \in \mathbb{C}$ tel que $\rho(v_2) = dv_2$.
- Comme $\text{Ker}(u)$ est stable par ρ , il existe $(e, f) \in \mathbb{C}^2$ tel que $\rho(v_3) = ev_2 + fv_3$.
- Il existe aussi $(a, b, c) \in \mathbb{C}^3$ tel que $\rho(v_1) = av_1 + bv_2 + cv_3$.

Ainsi, $R' = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ b & d & e \\ c & 0 & f \end{pmatrix}$. Soit $\lambda \in \mathbb{C}$, en développant le déterminant $\chi_{R'}(\lambda) = \det(\lambda I_3 - R')$ par rapport à la première ligne, on obtient directement $\chi_{R'}(\lambda) = (\lambda - a)(\lambda - d)(\lambda - f)$ donc $\chi_{R'} = (X - a)(X - d)(X - f)$. Mais comme R' est nilpotente, car ρ l'est, d'après la question 22, on a $\chi_R = X^3$ d'après la question 14. Par conséquent : $a = d = f = 0$ d'où $R' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & e \\ c & 0 & 0 \end{pmatrix}$. On calcule alors $R'^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ ce & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$. Comme $R^2 = A$ équivaut à $R'^2 = P^{-1}R^2P = P^{-1}AP = T$, la

condition $R^2 = A$ se traduit par $ce = 1$. On obtient donc $R' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & 1/c \\ c & 0 & 0 \end{pmatrix}$ avec $b \in \mathbb{C}$ et $c \in \mathbb{C}^*$.

Réciproquement, si R' est de la forme précédente, alors $R'^2 = T$ (par calcul) donc $R^2 = PR'^2P^{-1} = PTP^{-1} = A$. Ainsi, par double implication, pour $R \in \mathcal{M}_3(\mathbb{C})$, on a l'équivalence :

$$R^2 = A \iff R' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & 1/c \\ c & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ avec } b \in \mathbb{C} \text{ et } c \in \mathbb{C}^*.$$

Comme $R = PR'P^{-1}$, on a la nouvelle équivalence grâce à la question 21, toujours pour $R \in \mathcal{M}_3(\mathbb{C})$:

$$R^2 = A \iff R = \begin{pmatrix} b + 3c & 3b + 9c - (1/c) & (2/c) - 7b - 21c \\ 2b - c & 6b - 3c - (2/c) & (4/c) - 14b + 7c \\ b & 3b - (1/c) & (2/c) - 7b \end{pmatrix} \text{ avec } b \in \mathbb{C} \text{ et } c \in \mathbb{C}^*.$$

Q 24. Soit $R \in \mathcal{M}_3(\mathbb{C})$ telle que $R^2 = J_3$, alors $R^4 = (R^2)^2 = J_3^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = E_{3,1}$ (matrice élémentaire) donc

$R^6 = R^4R^2 = J_3E_{3,1} = 0$. Comme R est nilpotente, $\chi_R = X^3$ d'après la question 14, donc $R^3 = 0$ d'après le théorème de Cayley-Hamilton. On en déduit que $R^4 = R^3R = 0$ ce qui est incompatible avec $R^4 = E_{3,1}$.

Il n'existe donc aucune solution de l'équation $R^2 = J_3$ dans $\mathcal{M}_3(\mathbb{C})$.

Q 25. On raisonne par l'absurde en considérant une matrice $R \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ telle que $R^2 = V$. Comme $V^p = 0$, on a $R^{2p} = (R^2)^p = V^p = 0$ donc R est nilpotente. À nouveau, d'après la question 14, $\chi_R = X^n$ donc $R^n = 0$ (toujours Cayley-Hamilton). Or, par hypothèse, on a $2p - 1 > n$ donc $2p - 2 \geq n$. Mais V est nilpotente d'indice p donc $V^{p-1} = (R^2)^{p-1} = R^{2p-2} \neq 0$. Ceci est impossible car $2p - 2 - n \geq 0$ et $R^{2p-2} = R^n R^{2p-2-n} = 0 \times R^{2p-2-n} = 0$.

Si $V \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ est nilpotente d'indice p tel que $2p - 1 > n$, V n'a pas de racine carrée dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$.

Q 26. Soit $n \geq 3$, grâce à la question 23, on pose $V = \text{diag}(J_2, J_1, \dots, J_1) = \text{diag}(T, 0_{n-3}) = E_{2,1} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. Les calculs qui précèdent montrent que si on pose $R_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ (en prenant $b = 0$ et $c = 1$ dans la question 23 par exemple)

et $R = \text{diag}(R_3, 0_{n-3})$, on a $R^2 = \text{diag}(R_3^2, 0_{n-3}) = \text{diag}(T, 0_{n-3}) = V$. De plus, V est nilpotente d'ordre $p = 2 \geq 2$ car $V \neq 0$ et $V^2 = \text{diag}(T^2, 0_{n-3}) = 0$. Ainsi, si $n \geq 3$,

$$V = E_{2,1} \text{ est nilpotente d'indice } p = 2 \text{ et elle admet pour racine carrée } R = E_{2,3} + E_{3,1}.$$

On pouvait le vérifier directement en se rappelant que les matrices élémentaires vérifient la relation $E_{i,j}E_{k,l} = \delta_{j,k}E_{i,l}$ ce qui justifie que $E_{2,1}^2 = 0$ et que $(E_{2,3} + E_{3,1})^2 = E_{2,3}E_{2,3} + E_{2,3}E_{3,1} + E_{3,1}E_{2,3} + E_{3,1}E_{3,1} = 0 + E_{2,1} + 0 + 0 = E_{2,1}$.

II Deuxième partie

II.A - Réduction des matrices nilpotentes

Q 27. Soit $y \in \text{Im}(u)$, par définition, il existe $x \in E$ tel que $y = u(x)$. Ainsi, $u(y) = u(u(x)) \in \text{Im}(u)$ d'où

$$\text{le sous-espace } \text{Im}(u) \text{ est stable par } u.$$

Cette stabilité de $\text{Im}(u)$ par u nous permet d'induire l'endomorphisme u sur $\text{Im}(u)$, et on note $v = u|_{\text{Im}(u)}$ cet endomorphisme induit par u sur $\text{Im}(u)$, c'est-à-dire $v : \text{Im}(u) \rightarrow \text{Im}(u)$ défini par $v(y) = u(y)$ si $y \in \text{Im}(u)$.

Comme $u^p = 0$, pour $y \in \text{Im}(u)$, toujours avec $x \in E$ tel que $y = u(x)$, on a $v^{p-1}(y) = u^{p-1}(u(x)) = u^p(x) = 0$ donc

$$v^{p-1} = 0 \text{ et } v \text{ est nilpotent d'indice } q \leq p - 1 \text{ (par minimalité de } q).$$

Comme $u^{p-1} \neq 0$, il existe par définition un vecteur x de E tel que $u^{p-1}(x) \neq 0$. En posant $y = u(x) \in \text{Im}(u)$, il vient $v^{p-2}(y) = u^{p-2}(u(x)) = u^{p-1}(x) \neq 0$ donc $v^{p-2} \neq 0$. On en déduit que $q \geq p - 1$. Au final,

$$\text{l'endomorphisme } v \text{ induit par } u \text{ sur } \text{Im}(u) \text{ est nilpotent d'indice } p - 1.$$

Q 28. $C_u(x)$ est, par construction, un sous-espace vectoriel de E en tant que sous-espace engendré par une famille de vecteurs. Soit $y \in C_u(x)$, par définition, il existe un entier m et des scalaires $(\lambda_0, \dots, \lambda_m) \in \mathbb{C}^{m+1}$ tels que $y = \sum_{k=0}^m \lambda_k u^k(x)$.

Ainsi, par linéarité de u , $u(y) = u\left(\sum_{k=0}^m \lambda_k u^k(x)\right) = \sum_{k=0}^m \lambda_k u^{k+1}(x) \in C_u(x)$ ce qui prouve que

$$C_u(x) \text{ est stable par } u.$$

Posons $A = \{k \in \mathbb{N} \mid u^k(x) = 0\}$. Comme $p \in A$ car $u^p = 0$, A est une partie non vide de \mathbb{N} et $0 \notin A$ car $u^0 = \text{id}_E$. La propriété fondamentale de \mathbb{N} permet de conclure que A admet un minimum, noté $s(x) \geq 1$. Par conséquent,

$$\text{il existe un entier } s(x) \geq 1 \text{ tel que } u^{s(x)}(x) = 0 \text{ et } u^{s(x)-1}(x) \neq 0.$$

Q 29. D'après la question précédente et la définition de $s(x)$, pour tout entier $k \geq s(x)$, on a $u^k(x) = 0$. La famille $(u^k(x))_{k \in \mathbb{N}}$ engendre donc le même sous-espace de E que la famille $(x, u(x), \dots, u^{s(x)-1}(x))$. On obtient $C_u(x) = \text{vect}(u^k(x) \mid k \in \mathbb{N}) = \text{vect}(x, u(x), \dots, u^{s(x)-1}(x))$ et $\mathcal{B}_x = (x, u(x), \dots, u^{s(x)-1}(x))$ est déjà une famille génératrice de $C_u(x)$. Comme en question 3, on peut montrer que celle-ci est aussi libre. Re commençons :

Soit $(\lambda_k)_{0 \leq k \leq s(x)-1} \in \mathbb{C}^{s(x)}$ telle que $\sum_{k=0}^{s(x)-1} \lambda_k u^k(x) = 0$ (*). Si on avait $(\lambda_0, \dots, \lambda_{s(x)-1}) \neq (0, \dots, 0)$, on pourrait définir

l'entier $i_x = \min(\{0 \leq k \leq s(x) - 1 \mid \lambda_k \neq 0\})$ de sorte que $\lambda_0 = \dots = \lambda_{i_x-1} = 0$ et $\lambda_{i_x} \neq 0$. En composant la relation (*) par $u^{s(x)-1-i_x}$ (on le peut car $s(x) - 1 - i_x \geq 0$), on aurait donc, par linéarité de u , $\sum_{k=0}^{s(x)-1} \lambda_k u^{s(x)-1-i_x+k}(x) = u(0) = 0$,

d'où $\sum_{k=i_x}^{s(x)-1} \lambda_k u^{s(x)-1-i_x+k}(x) = 0$. Comme $u^{s(x)}(x) = 0$, il ne reste dans cette somme que $\lambda_{i_x} u^{s(x)-1}(x) = 0$. C'est

impossible puisque $\lambda_{i_x} \neq 0$ et $u^{s(x)-1}(x) \neq 0$. On conclut ce raisonnement par l'absurde : $(\lambda_0, \dots, \lambda_{s(x)-1}) = (0, \dots, 0)$. Ainsi, \mathcal{B}_x est aussi libre. Finalement, comme la matrice dans cette base de l'endomorphisme $u|_{C_u(x)}$ est facile à obtenir puisque $u(u^{s(x)-1}(x)) = u^{s(x)}(x) = 0$,

$$\mathcal{B}_x = (x, u(x), \dots, u^{s(x)-1}(x)) \text{ est une base de } C_u(x) \text{ et } \text{Mat}_{\mathcal{B}_x}(u|_{C_u(x)}) = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 1 & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = J_{s(x)}.$$

Q 30. Pour tout entier $p \in \mathbb{N}^*$, définissons

$$H_p = \text{'' si } u \in \mathcal{L}(E) \text{ nilpotente d'indice } p \text{ et } E \text{ } \mathbb{C}\text{-ev de dimension finie, } \exists t \in \mathbb{N}^*, \exists (x_1, \dots, x_t) \in E^t, E = \bigoplus_{i=1}^t C_u(x_i).$$

• **Initialisation** : pour $p = 1$, si u est un endomorphisme nilpotent d'indice $p = 1$ d'un \mathbb{C} -espace E , alors u est l'endomorphisme nul de E . En posant $t = \dim(E)$, on choisit une base quelconque (x_1, \dots, x_t) de E et, comme $C_u(x_i) = \text{vect}(x_i)$ puisque $s(x_i) = 1$ pour tout $1 \leq i \leq t$, on a bien $E = \text{vect}(x_1, \dots, x_t) = \bigoplus_{i=1}^t \text{vect}(x_i) = \bigoplus_{i=1}^t C_u(x_i)$.

• **Hérédité** : soit $p \geq 1$, supposons H_p vérifiée et montrons H_{p+1} . Prenons donc un \mathbb{C} -espace vectoriel E et u un endomorphisme de E nilpotent d'indice $p + 1$. Comme $p + 1 \geq 2$, la question 27 nous apprend que l'endomorphisme $v = u|_{\text{Im}(u)}$ est nilpotent d'indice p dans le \mathbb{C} -espace $\text{Im}(u)$. L'hypothèse H_p s'applique à v et fournit l'existence d'un entier $t \geq 1$ et de t vecteurs y_1, \dots, y_t de $\text{Im}(u)$ tels que

$$\text{Im}(u) = \bigoplus_{i=1}^t C_v(y_i).$$

Si $1 \leq i \leq t$, il existe $x_i \in E$ tel que $y_i = u(x_i)$. Comme $v^k(y_i) = v^k(u(x_i)) = u^{k+1}(x_i)$ pour $k \in \mathbb{N}$, $s(x_i) = s(y_i) + 1$ (avec les notations de la question 28). Ainsi, $C_v(y_i) = \text{vect}(y_i, \dots, v^{s(y_i)-1}(y_i)) = \text{vect}(u(x_i), \dots, u^{s(x_i)-1}(x_i))$ donc

$$C_u(x_i) = \text{vect}(x_i, u(x_i), \dots, u^{s(x_i)-1}(x_i)) = \text{vect}(x_i) + \text{vect}(u(x_i), \dots, u^{s(x_i)-1}(x_i)) = \text{vect}(x_i) + C_v(y_i).$$

Or $x_i \notin \text{vect}(u(x_i), \dots, u^{s(x_i)-1}(x_i))$ puisque la famille $\mathcal{B}_{x_i} = (x_i, u(x_i), \dots, u^{s(x_i)-1}(x_i))$ est une base de $C_u(x_i)$ d'après la question 29, on en déduit donc que $C_u(x_i) = \text{vect}(x_i) \oplus C_v(y_i)$ d'où

$$\forall i \in \llbracket 1, t \rrbracket, \dim(C_u(x_i)) = \dim(C_v(y_i)) + 1.$$

Vérifions que $\sum_{i=1}^t C_u(x_i)$ est une somme directe, ce qui revient, en posant $\mathcal{F} = (\mathcal{B}_{x_1}, \dots, \mathcal{B}_{x_t})$ la famille formée en concaténant les bases des sous-espaces $C_u(x_i)$, à montrer que \mathcal{F} est libre. Soit $(\lambda_{i,j})_{\substack{1 \leq i \leq t \\ 0 \leq j \leq s(x_i)-1}} \in \mathbb{C}^{s(x_1)+\dots+s(x_t)}$ une famille de scalaires telle que

$$\sum_{i=1}^t \sum_{j=0}^{s(x_i)-1} \lambda_{i,j} u^j(x_i) = 0 \quad (1).$$

On applique u à cette relation et on obtient, puisque $u^{s(x_i)}(x_i) = 0$ pour $1 \leq i \leq t$ d'après la question 28 :

$$\sum_{i=1}^t \sum_{j=0}^{s(x_i)-2} \lambda_{i,j} u^{j+1}(x_i) = \sum_{i=1}^t \sum_{\ell=1}^{s(x_i)-1} \lambda_{i,\ell-1} u^\ell(x_i) = 0.$$

Puisque $\text{Im}(u) = \bigoplus_{i=1}^t C_v(y_i) = \bigoplus_{i=1}^t \text{vect}(u(x_i), \dots, u^{s(x_i)-1}(x_i))$ par hypothèse, la relation ci-dessus n'est possible que si tous les scalaires de cette combinaison linéaire sont nuls. Il ne reste donc dans la relation (1) que

$$\sum_{i=1}^t \lambda_{i,s(x_i)-1} u^{s(x_i)-1}(x_i) = 0.$$

Or, si $1 \leq i \leq t$, $u^{s(x_i)-1}(x_i)$ appartient à $C_v(y_i)$ et, encore une fois, on a la somme directe $\text{Im}(u) = \bigoplus_{i=1}^t C_v(y_i)$, ce qui permet de conclure que $\lambda_{1,s(x_1)-1} = \dots = \lambda_{t,s(x_t)-1} = 0$. Au final,

la famille \mathcal{F} est bien libre et $\sum_{i=1}^t C_u(x_i) = \bigoplus_{i=1}^t C_u(x_i)$.

À nouveau, si $1 \leq i \leq t$, $u^{s(x_i)}(x_i) = 0$ donc $u^{s(x_i)-1}(x_i) \in \text{Ker}(u)$. La famille $\mathcal{K} = (u^{s(x_i)-1}(x_i), \dots, u^{s(x_t)-1}(x_t))$ est donc une famille libre (en tant que sous-famille de la famille libre \mathcal{F}) formée de vecteurs de $\text{Ker}(u)$.

Or, en posant $n = \dim(E)$ et $r = \text{rg}(u)$, la formule du rang appliquée à u prouve que

$$\dim(\text{Ker}(u)) = \dim(E) - \text{rg}(u) = n - r.$$

Le théorème de la base incomplète, puisque \mathcal{K} est de cardinal t , justifie qu'on peut trouver $n - r - t$ vecteurs e_1, \dots, e_{n-r-t} dans $\text{Ker}(u)$, tels que $\mathcal{B}' = (u^{s(x_i)-1}(x_i), \dots, u^{s(x_t)-1}(x_t), e_1, \dots, e_{n-r-t})$ est une base de $\text{Ker}(u)$.

Posons $F = \bigoplus_{i=1}^t C_u(x_i)$ qui admet pour base la famille \mathcal{F} et $G = \text{vect}(e_1, \dots, e_{n-r-t})$ de base $\mathcal{G} = (e_1, \dots, e_{n-r-t})$ (sous-famille de la famille libre \mathcal{B}'). Vérifions que F et G sont en somme directe. Considérons donc des scalaires $(\lambda_{i,j})_{\substack{1 \leq i \leq t \\ 0 \leq j \leq s(x_i)-1}} \in \mathbb{C}^{s(x_1)+\dots+s(x_t)}$ et $(\mu_k)_{1 \leq k \leq n-r-t} \in \mathbb{C}^{n-r-t}$ tels que

$$\sum_{i=1}^t \sum_{j=0}^{s(x_i)-1} \lambda_{i,j} u^j(x_i) + \sum_{k=1}^{n-r-t} e_k = 0 \quad (2).$$

Comme avant, on applique u à cette relation pour avoir $\sum_{i=1}^t \sum_{\ell=1}^{s(x_i)-1} \lambda_{i,\ell-1} u^\ell(x_i) = 0$. Les scalaires de cette combinaison

linéaire sont nuls car $\text{Im}(u) = \bigoplus_{i=1}^t C_v(y_i)$. Il ne reste donc dans (2) que $\sum_{i=1}^t \lambda_{i,s(x_i)-1} u^{s(x_i)-1}(x_i) + \sum_{k=1}^{n-r-t} e_k = 0$ et, là encore, la liberté de la famille \mathcal{B}' montre que tous ces scalaires sont nuls. En conclusion, F et G sont en somme directe.

De plus, comme $F = \bigoplus_{i=1}^t C_u(x_i)$ et $\mathcal{G} = (e_1, \dots, e_{n-r-t})$,

$$\dim(F + G) = \dim(F) + \dim(G) = \left(\sum_{i=1}^t \dim(C_u(x_i)) \right) + n - r - t,$$

d'où, comme $\dim(C_u(x_i)) = \dim(C_v(y_i)) + 1$ si $1 \leq i \leq t$ et $r = \text{rg}(u) = \sum_{i=1}^t \dim(C_v(y_i))$ car $\text{Im}(u) = \bigoplus_{i=1}^t C_v(y_i)$:

$$\dim(F + G) = \left(\sum_{i=1}^t (\dim(C_v(y_i)) + 1) \right) + n - r - t = r + t + n - r - t = n = \dim(E).$$

Comme $F + G \subset E$, l'égalité des dimensions de $F + G$ et de E implique l'égalité $E = F \oplus G$. Enfin, comme $u(e_k) = 0$ si $1 \leq k \leq n - r - t$, $s(e_k) = 1$, $C_u(e_k) = \text{vect}(e_k)$ et $G = \text{vect}(e_1, \dots, e_{n-r-t}) = \bigoplus_{k=1}^{n-r-t} \text{vect}(e_k) = \bigoplus_{k=1}^{n-r-t} C_u(e_k)$ donc

$$E = \left(\bigoplus_{i=1}^t C_u(x_i) \right) \oplus \left(\bigoplus_{k=1}^{n-r-t} C_u(e_k) \right)$$

et la propriété H_{p+1} est démontrée.

Le principe de récurrence permet de conclure que H_p est vraie pour tout entier $p \in \mathbb{N}^*$. Ainsi,

si E est un \mathbb{C} -espace de dimension finie et $u \in \mathcal{L}(E)$ nilpotent, $\exists t \in \mathbb{N}^*$, $\exists (x_1, \dots, x_t) \in E^t$, $E = \bigoplus_{i=1}^t C_u(x_i)$.

Q 31. Dans une base adaptée à la décomposition $E = \bigoplus_{i=1}^t C_u(x_i)$, c'est-à-dire dans une base $\mathcal{B} = (\mathcal{B}_{x_1}, \dots, \mathcal{B}_{x_t})$ obtenue en concaténant les bases \mathcal{B}_{x_i} de $C_u(x_i)$ vues à la question 29, la matrice de u se trouve directement avec les résultats prouvés dans cette même question :

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u) = \text{diag}(J_{s(x_1)}, \dots, J_{s(x_t)}).$$

II.C - Applications

Q 42. Soit une matrice $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ nilpotente et u l'endomorphisme canoniquement associé à M . On sait d'après la question 31 qu'il existe une base $\mathcal{B} = (\mathcal{B}_{x_1}, \dots, \mathcal{B}_{x_k})$ (avec $\mathcal{B}_{x_i} = (x_i, \dots, u^{s(x_i)-1}(x_i))$) adaptée à la décomposition $E = \bigoplus_{i=1}^k C_u(x_i)$ de la question 30 telle que $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u) = N_{\sigma} = \text{diag}(J_{s(x_1)}, \dots, J_{s(x_k)})$ où $\sigma = (s(x_1), \dots, s(x_k)) \in \Gamma_n$.

D'après le cours et la formule de changement de bases pour les matrices d'endomorphisme, on sait que deux matrices sont semblables si et seulement si elles représentent le même endomorphisme dans deux bases différentes. Il suffit donc dans cette question de montrer que $2M$ et M^T sont des matrices de u dans d'autres bases que \mathcal{B} .

- Posons, pour $1 \leq i \leq k$, la nouvelle base $\mathcal{B}'_{x_i} = (x_i, 2u(x_i), \dots, 2^{s(x_i)-1}u^{s(x_i)-1}(x_i))$ de $C_u(x_i)$ (on n'a fait que multiplier les vecteurs par des scalaires non nuls). Alors $\mathcal{B}' = (\mathcal{B}'_{x_1}, \dots, \mathcal{B}'_{x_k})$ obtenue à nouveau en concaténant les bases \mathcal{B}'_{x_i} de $C_u(x_i)$ est une base de E et on vérifie sans peine que $\text{Mat}_{\mathcal{B}'}(u) = \text{diag}(2J_{s(x_1)}, \dots, 2J_{s(x_k)}) = 2M$.

- Soit, pour $1 \leq i \leq k$, la nouvelle base $\mathcal{B}''_{x_i} = (u^{s(x_i)-1}(x_i), \dots, u(x_i), x_i)$ de $C_u(x_i)$ (on ne fait que prendre les vecteurs dans le sens contraire). Alors $\mathcal{B}'' = (\mathcal{B}''_{x_1}, \dots, \mathcal{B}''_{x_k})$ encore obtenue en concaténant les bases \mathcal{B}''_{x_i} de $C_u(x_i)$ est une base de E et on a $\text{Mat}_{\mathcal{B}''}(u) = \text{diag}(J_{s(x_1)}^T, \dots, J_{s(x_k)}^T) = M^T$.

En conclusion, ce qui précède justifie bien que

si M est nilpotente, les matrices M , $2M$ et M^T sont semblables.

On peut montrer en généralisant (en un sens à préciser) la décomposition de Frobenius de la question 30 à toutes les matrices (pas seulement les matrices nilpotentes) qu'une matrice carrée et sa transposée sont toujours semblables.

Q 43. Soit $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ telle que M et $2M$ sont semblables. Notons λ la valeur propre de M de module maximal. Il existe donc un vecteur X non nul tel que $MX = \lambda X$. Alors $2MX = 2\lambda X$ donc 2λ est valeur propre de $2M$. Mais comme M et $2M$ sont semblables, elles ont même rang, même spectre, même polynôme caractéristique, même trace.... En particulier 2λ est une valeur propre de M . Ainsi, par maximalité du module de λ , on a $|2\lambda| \leq |\lambda|$, ce qui impose $|\lambda| = 0$. Par conséquent, M ne peut pas avoir d'autre valeur propre que 0. Mais M admet au moins une valeur propre puisque χ_M est scindé dans $\mathbb{C}[X]$. Ainsi, $\text{Sp}(M) = \{0\}$, et on conclut avec la question 15 que

si M et $2M$ sont semblables, alors M est nilpotente.