Devoir à la maison n°05

- Le devoir devra être rédigé sur des copies *doubles*.
- Les copies ne devront comporter ni rature, ni renvoi, ni trace d'effaceur.
- Toute copie ne satisfaisant pas à ces exigences devra être intégralement récrite.

Problème 1

Partie I –

I.1 **I.1.a** Puisque $\sum u_n$ converge, la suite (R_n) converge vers 0. Par opérations, la suite de terme général $\alpha_n = \dfrac{1}{\sqrt{R_{n-1}}+\sqrt{R_n}}$ diverge vers $+\infty$.
De plus, $R_{n-1} - R_n = u_n \geq 0$ donc (R_n) est décroissante. Par croissance de la racine carrée, la suite de terme général $\sqrt{R_{n-1}}+\sqrt{R_n}$ est également décroissante et α est donc croissante.
Enfin,

$$\alpha_n u_n = \frac{u_n}{\sqrt{R_{n-1}}+\sqrt{R_n}} = \frac{u_n(\sqrt{R_{n-1}}-\sqrt{R_n})}{R_{n-1}-R_n} = \sqrt{R_{n-1}}-\sqrt{R_n}$$

La série $\sum \alpha_n u_n$ est donc une série télescopique convergente puisque la suite de terme général $\sqrt{R_n}$ converge vers 0.

I.1.b On pose cette fois-ci $\alpha_n = \dfrac{1}{\sqrt{S_n}+\sqrt{S_{n-1}}}$. Puisque $\sum u_n$ est une série à termes positifs divergente, la suite (S_n) diverge vers $+\infty$. Par opérations, la suite α converge vers 0.
De plus, $S_n - S_{n-1} = u_n \geq 0$ donc (S_n) est croissante. Par croissance de la racine carrée, la suite de terme général $\sqrt{S_{n-1}}+\sqrt{S_n}$ est également croissante et α est donc décroissante.
Enfin,

$$\alpha_n u_n = \frac{u_n}{\sqrt{S_n}+\sqrt{S_{n-1}}} = \frac{u_n(\sqrt{S_n}-\sqrt{S_{n-1}})}{S_n-S_{n-1}} = \sqrt{S_n}-\sqrt{S_{n-1}}$$

La série $\sum \alpha_n u_n$ est donc une série télescopique convergente puisque la suite de terme général $\sqrt{S_n}$ converge vers 0.

I.2 **I.2.a** Comme α est majorée, $\alpha_k|u_k| \underset{k\to+\infty}{=} \mathcal{O}(|u_k|)$. Comme $u \in S_{AC}$, $\sum |u_n|$ est une série à termes positifs convergente. Par conséquent, $\sum \alpha_n|u_n|$ converge (absolument) et $N_\alpha(u)$ est bien définie.
Comme α est positive, N_α est à valeurs dans $\mathbb{R}_+$.
Soient $u \in S_{AC}$ et $\lambda \in \mathbb{C}$.

$$N_\alpha(\lambda u) = \sum_{n=0}^{+\infty} \alpha_n|\lambda u_n| = |\lambda|\sum_{n=0}^{+\infty}\alpha_n|u_n| = |\lambda|N_\alpha(u)$$

Soit $(u,v) \in S_{AC}^2$. Par inégalité triangulaire, $|u_n+v_n| \leq |u_n|+|v_n|$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. Comme α est positive, $\alpha_n|u_n+v_n| \leq \alpha_n|u_n| + \alpha_n|v_n|$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. Par conséquent

$$N_\alpha(u+v) = \sum_{n=0}^{+\infty}\alpha_n|u_n+v_n| \leq \sum_{n=0}\alpha_n|u_n|+\alpha_n|v_n| = \sum_{n=0}^{+\infty}\alpha_n|u_n| + \sum_{n=0}^{+\infty}\alpha_n|v_n| = N_\alpha(u)+N_\alpha(v)$$

Enfin, soit $u \in S_{AC}$ tel que $N_\alpha(u) = 0$. On a donc $\sum_{n=0}^{+\infty}\alpha_n|u_n| = 0$. Comme tous les termes sont positifs, $\alpha_n|u_n| = 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. Or α est strictement positive donc ne s'annule pas. Ainsi $u_n = 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}$ i.e. $u = 0$.
Tout ce qui précède montre que N_α est bien une norme sur S_{AC}.

I.2.b On a clairement $\mathrm{N}_\alpha(\delta^p) = \alpha_p$.

I.2.c D'après la question précédente, $\mathrm{N}_\alpha(\delta^p) = \dfrac{1}{2^p}$ et $\mathrm{N}_\beta(\delta^p) = \dfrac{1}{p!}$. Par conséquent, $\lim\limits_{n\to+\infty} \dfrac{\mathrm{N}_\alpha(\delta_p)}{\mathrm{N}_\beta(\delta_p)} = +\infty$ par comparaison de suites usuelles. Les normes N_α et N_β ne sont donc pas équivalentes.

I.2.d On va montrer que N_α et N_β sont équivalentes si et seulement si il existe deux réels strictement positifs m et M tels que $m\alpha_n \leq \beta_n \leq \mathrm{M}\alpha_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.
Supposons que N_α et N_β soient équivalentes. Alors il existe des réels strictement positifs m et M tels que $m\mathrm{N}_\alpha \leq \mathrm{N}_\beta \leq \mathrm{M}\mathrm{N}_\alpha$. Notamment, pour tout $p \in \mathbb{N}$, $m\mathrm{N}_\alpha(\delta^p) \leq \mathrm{N}_\beta(\delta^p) \leq \mathrm{M}\mathrm{N}_\alpha(\delta^p)$ i.e. $m\alpha_p \leq \beta_p \leq \mathrm{M}\alpha_p$.
Réciproquement, supposons qu'il existe des réels strictement positifs m et M tels que $m\alpha_n \leq \beta_n \leq \mathrm{M}\alpha_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. Soit $u \in \mathrm{S}_{\mathrm{AC}}$. Alors

$$\forall n \in \mathbb{N},\ m\alpha_n|u_n| \leq \beta_n|u_n| \leq \mathrm{M}\alpha_n|u_n|$$

Puis

$$\sum_{n=0}^{+\infty} m\alpha_n|u_n| \leq \sum_{n=0}^{+\infty} \beta_n|u_n| \leq \sum_{n=0}^{+\infty} \mathrm{M}\alpha_n|u_n|$$

ou encore $m\mathrm{N}_\alpha(u) \leq \mathrm{N}_\beta(u) \leq \mathrm{M}\mathrm{N}_\alpha(u)$. Ceci étant vrai pour tout $u \in \mathrm{S}_{\mathrm{AC}}$, $m\mathrm{N}_\alpha \leq \mathrm{N}_\beta \leq \mathrm{M}\mathrm{N}_\alpha$. Les normes N_α et N_β sont donc équivalentes.

Partie II –

II.1 **II.1.a** Pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\mathrm{R}_n = \sum_{k=n+1}^{+\infty} q^k = q^{n+1}\sum_{k=0}^{+\infty} q^k = \frac{q^{n+1}}{1-q} = \frac{q}{1-q}\cdot q^n$$

II.1.b La suite (R_n) est également géométrique de raison q avec $|q| < 1$. La série $\sum \mathrm{R}_n$ est donc convergente. De plus,

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \mathrm{R}_n = \frac{q}{1-q}\sum_{n=0}^{+\infty} q^n = \frac{q}{(1-q)^2}$$

II.2 **II.2.a**

$$\begin{aligned}
\frac{1}{(n-1)^{\alpha-1}} - \frac{1}{n^{\alpha-1}} &= (n-1)^{1-\alpha} - n^{1-\alpha}\\
&= n^{1-\alpha}\left(\left(1-\frac{1}{n}\right)^{1-\alpha} - 1\right)\\
&\underset{n\to+\infty}{\sim} n^{1-\alpha}\cdot\frac{\alpha-1}{n}\\
&\underset{n\to+\infty}{\sim} (\alpha-1)n^{-\alpha} = \frac{\alpha-1}{n^\alpha}
\end{aligned}$$

II.2.b Comme $\sum \dfrac{1}{n^\alpha}$ est une série à termes positifs convergente, on obtient par sommation de la relation d'équivalence précédente :

$$\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{(k-1)^{\alpha-1}} - \frac{1}{k^\alpha} \underset{n\to+\infty}{\sim} \sum_{k=n+1} \frac{\alpha-1}{k^\alpha} = (\alpha-1)\mathrm{R}_n$$

Le membre de gauche est le reste d'une série télescopique et $\lim\limits_{k\to+\infty} \dfrac{1}{k^\alpha} = 0$ donc

$$\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{(k-1)^{\alpha-1}} - \frac{1}{k^\alpha} = \frac{1}{n^{\alpha-1}}$$

Finalement,

$$\mathrm{R}_n \underset{n\to\infty}{\sim} \frac{\alpha-1}{n^{\alpha-1}}$$

II.2.c Comme $\sum \dfrac{1}{n^{\alpha-1}}$ est une série à termes positifs, les séries $\sum \mathrm{R}_n$ et $\sum \dfrac{1}{n^{\alpha-1}}$ sont de même nature. Connaissant les résultats sur les séries de Riemann, $\sum \mathrm{R}_n$ converge si et seulement si $\alpha - 1 > 1$ i.e. $\alpha > 2$.

II.2.d Supposons donc $\alpha > 2$. Tout d'abord, les $v_{k,n}$ sont positifs : on peut donc appliquer le théorème de Fubini positif.

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \mathrm{R}_n = \sum_{n=0}^{+\infty}\sum_{k=1}^{+\infty} v_{k,n} = \sum_{k=1}^{+\infty}\sum_{n=0}^{+\infty} v_{k,n} = \sum_{k=1}^{+\infty}\sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{k^\alpha} = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^{\alpha-1}}$$

II.3 **II.3.a** On reconnaît une série exponentielle. Ainsi $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n = e^a$.

II.3.b On va utiliser le théorème de Fubini positif.

$$\begin{aligned}\sum_{(k,n)\in\mathbb{N}^*\times\mathbb{N}} |v_{k,n}| &= \sum_{k=1}^{+\infty}\sum_{n=0}^{+\infty} |v_{k,n}| \\ &= \sum_{k=1}^{+\infty}\sum_{n=0}^{k-1} \frac{|a|^k}{k!} \\ &= \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{k|a|^k}{k!} \\ &= |a|\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{|a|^k}{k!} = |a|e^{|a|} < +\infty\end{aligned}$$

Ainsi la famille $(v_{k,n})_{(k,n)\in\mathbb{N}^*\times\mathbb{N}}$ est sommable. Le théorème de Fubini permet alors d'affirmer que

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \mathrm{R}_n = \sum_{n=0}^{+\infty}\sum_{k=1}^{+\infty} v_{k,n} = \sum_{k=1}^{+\infty}\sum_{n=0}^{+\infty} v_{k,n} = \sum_{k=1}^{+\infty}\sum_{n=0}^{k-1} \frac{a^k}{k!} = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{a^k}{(k-1)!} = a\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{a^k}{k!} = ae^a$$

II.4 **II.4.a** Pour la culture, il s'agit du principe de sommation d'Abel.

$$\begin{aligned}\sum_{k=1}^{n} ku_k &= \sum_{k=1}^{n} k(\mathrm{R}_{k-1} - \mathrm{R}_k) \\ &= \sum_{k=1}^{n} k\mathrm{R}_{k-1} - \sum_{k=1}^{n} k\mathrm{R}_k \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} (k+1)\mathrm{R}_k - \sum_{k=1}^{n} k\mathrm{R}_k \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} (k+1)\mathrm{R}_k - \sum_{k=1}^{n} k\mathrm{R}_k \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \mathrm{R}_k - n\mathrm{R}_n\end{aligned}$$

II.4.b Comme u est positive, $(n\mathrm{R}_n)$ également. Ainsi, d'après l'égalité précédente,

$$\sum_{k=1}^{n} ku_k \leq \sum_{k=0}^{n-1} \mathrm{R}_k$$

Or $\sum \mathrm{R}_n$ est une série à termes positifs convergente donc

$$\sum_{k=1}^{n} ku_k \leq \sum_{k=0}^{+\infty} \mathrm{R}_k$$

La suite de terme général $\sum_{k=1}^{n} ku_k$ est donc croissante (puisque les u_k sont positifs) et majorée : elle converge. Par conséquent, la série $\sum nu_n$ converge.
On constate maintenant que

$$0 \leq n\mathrm{R}_n = n\sum_{k=n+1}^{+\infty} u_k \leq \sum_{k=n+1}^{+\infty} ku_k$$

Or le membre de droite est le reste de rang n de la série convergente $\sum nu_n$: il converge donc vers 0. D'après le théorème des gendarmes, la suite $(n\mathrm{R}_n)$ converge vers 0.

Partie III –

III.1 **III.1.a** Soit $(i,j) \in [\![1,n]\!]^2$. Alors

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

Par conséquent, $\mathrm{N}(\mathrm{AB}) \leq n\mathrm{N}(\mathrm{A})\mathrm{N}(\mathrm{B})$.

III.1.b Récurrence évidente. Faites la quand même.

III.1.c Pour tout $p \in \mathbb{N}^*$

$$0 \leq \mathrm{N}\left(\frac{\mathrm{A}^p}{p!}\right) = \frac{\mathrm{N}(\mathrm{A}^p)}{p!} \leq \frac{n^{p-1}\mathrm{N}(\mathrm{A})^p}{p!} = \frac{1}{n} \cdot \frac{(n\mathrm{N}(\mathrm{A}))^p}{p!}$$

Or $\sum \frac{(n\mathrm{N}(\mathrm{A}))^p}{p!}$ est une série convergente (série exponentielle ou règle de d'Alembert) donc $\sum \mathrm{N}\left(\frac{\mathrm{A}^p}{p!}\right)$ converge également. Autrement dit $\sum \frac{\mathrm{A}^p}{p!}$ converge absolument. Comme $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ est de dimension finie, $\sum \frac{\mathrm{A}^p}{p!}$ converge.

III.2 **III.2.a** Un calcul montre que $\mathrm{A}^2 = 4\mathrm{A} - 3\mathrm{I}$.

III.2.b $\mathrm{P} = \mathrm{X}^2 - 4\mathrm{X} + 3$ est un polynôme annulateur de A. On effectue alors la division euclidienne de X^p par P : il existe deux polynômes P et Q dans $\mathbb{R}[\mathrm{X}]$ tels que

$$\mathrm{X}^p = \mathrm{PQ} + \mathrm{R} \qquad \text{et} \qquad \deg(\mathrm{R}) < \deg(\mathrm{P}) = 2$$

En évaluant cette égalité en les racines de P, à savoir 1 et 3, on obtient $\mathrm{R}(1) = 1$ et $\mathrm{R}(3) = 3^p$. Comme $\deg \mathrm{R} < 2$, il existe $(\alpha_p, \beta_p) \in \mathbb{R}^2$ tel que $\mathrm{R} = \alpha_p\mathrm{X} + \beta_p$. On trouve $\alpha_p = \frac{3^p - 1}{2}$ et $\beta_p = \frac{3 - 3^p}{2}$. Par conséquent,

$$\mathrm{A}^p = \mathrm{P}(\mathrm{A})\mathrm{Q}(\mathrm{A}) + \mathrm{R}(\mathrm{A}) = \mathrm{R}(\mathrm{A}) = \alpha_p\mathrm{A} + \beta_p\mathrm{I}$$

III.2.c

$$\exp(\mathrm{A}) = \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{\mathrm{A}^p}{p!} = \left(\sum_{p=0}^{+\infty} \frac{\alpha_p}{p!}\right)\mathrm{A} + \left(\sum_{p=0}^{+\infty} \frac{\beta_p}{p!}\right)\mathrm{I} = \frac{e^3 - e}{2}\mathrm{A} + \frac{3e - e^3}{2}\mathrm{I}$$

III.2.d Notons $a_p = \sum_{k=p+1}^{+\infty} \frac{\alpha_p}{p!}$ et $b_p = \sum_{k=p+1}^{+\infty} \frac{\beta_p}{p!}$. D'après la question **II.3.b**, les séries $\sum a_p$ et $\sum b_p$ converge et

$$\sum_{p=0}^{+\infty} a_p = \frac{3e^3 - e}{2} \qquad\qquad \sum_{p=0}^{+\infty} b_p = \frac{3e - 3e^3}{2}$$

Comme $\mathrm{R}_p = a_p\mathrm{A} + b_p\mathrm{I}$, la série $\sum \mathrm{R}_p$ converge et

$$\sum_{p=0}^{+\infty} \mathrm{R}_p = \left(\sum_{p=0}^{+\infty} a_p\right)\mathrm{A} + \left(\sum_{p=0}^{+\infty} b_p\right)\mathrm{I} = \frac{3e^3 - e}{2}\mathrm{A} + \frac{3e - 3e^3}{2}\mathrm{I}$$