

PROBLÈMES CORRIGÉS MP

Corrigé Devoir Libre
CCP 2012, MP

PR. GILBERT

Partie I

① (a.) La série de fonctions $\sum f_n$ converge normalement sur I si et seulement si la série numérique $\sum \|f_n\|_\infty$ converge sur \mathbb{R}_+ , où $\|f\|_\infty = \text{Sup}\{|f(x)| / x \in I\}$, appelée norme de la convergence uniforme.

(pour que cette définition ait un sens, il faut que les fonctions soient bornées sur I , de manière à pouvoir parler de la norme infinie)

(b.) $\forall x \in I, 0 \leq |f_n(x)| \leq \|f_n\|_\infty$ et par comparaison de séries à termes positifs, on en déduit que si $\sum f_n$ converge normalement, alors pour tout x de I , la série $\sum |f_n(x)|$ converge, i.e. la série $\sum f_n$ converge absolument

② Pour x dans I notons $R_n(x) = \sum_{k=n+1}^{+\infty} f_k(x)$. Alors $|R_n(x)| \leq$

$\sum_{k=n+1}^{+\infty} \|f_k\|_\infty$. La série $\sum f_n$ convergeant normalement, la suite

$\left(\sum_{k=n+1}^{+\infty} \|f_k\|_\infty \right)_n$ converge vers 0 indépendamment de x , ce

qui prouve que la suite des restes $(R_n(x))_n$ converge uniformément vers 0 sur I , i.e. la série $\sum f_n$ converge uniformément

sur I .

③ Pour x fixé dans $I = [0, 1]$, $|f_n(x)| = \frac{x^2}{n} + \frac{1}{n}$ et donc la suite $(|f_n(x)|)_n$ décroît et converge vers 0. Le CSSA est applicable, ce qui prouve que la série $\sum f_n$ converge simplement sur $I = [0, 1]$.

Le CSSA nous dit que, pour tout x de I , $|R_n(x)| \leq |f_{n+1}(x)| = \frac{x^2}{(n+1)^2} + \frac{1}{n} \leq \frac{1}{(n+1)^2} + \frac{1}{n}$.

$\lim \frac{1}{(n+1)^2} + \frac{1}{n} = 0$ donc la suite $(R_n(x))_{n \in \mathbb{N}^*}$ converge uniformément vers 0, c'est à dire la série $\sum f_n$ converge uniformément sur $I = [0, 1]$.

Enfin, pour x fixé, $|f_n(x)| = \frac{x^2}{n^2} + \frac{1}{n}$. La série $\sum \frac{x^2}{n^2}$ converge (série de Riemann) mais la série $\sum \frac{1}{n}$ diverge (série harmonique), et donc la série $\sum |f_n(x)|$ diverge, i.e. la série $\sum f_n$ ne converge pas absolument sur I .

④ Considérons la fonction f_n définie sur $I = [0, 1[$ par $f_n(x) = x^n$. Pour x dans I , la série $\sum |f_n(x)| = \sum x^n$ converge vers $\frac{1}{1-x}$. Cette série $\sum f_n$ converge absolument sur $I = [0, 1[$.

Alors $R_n(x) = \sum_{k=n+1}^{+\infty} f_k(x) = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{x^{k+1}}{1-x}$. Montrons que cette suite de fonctions $(R_n(x))$ ne converge pas uniformément vers 0. En effet $R_n(1 - \frac{1}{n}) = n \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n+1} = ne^{(n+1)\ln(1-\frac{1}{n})} \sim \frac{n}{e}$ qui tend vers $+\infty$ avec n . Donc la suite (R_n) ne converge pas uniformément vers 0, et ainsi la série $\sum f_n$ est une série qui converge absolument sur $I = [0, 1[$ mais qui ne converge pas uniformément sur I . **Partie II**

⑤ La suite (α_n) décroît et est positive, donc $\forall n, 0 \leq \alpha_n \leq \alpha_0$. La suite $(\alpha_n)_n$ est donc bornée. Soit $x \in I$. La série $\sum x^n$ converge (série géométrique de raison x avec $0 \leq x < 1$) et donc la série $\sum \alpha_0(1-x)x^n$ converge (linéarité). $\forall n \geq 1, \forall x \in I, 0 \leq \alpha_n x^n(1-x) \leq \alpha_0(1-x)x^n$. Ainsi, par comparaison de séries à termes positifs, on conclut que la série $\sum f_n$ converge simplement sur I .

⑥ (a.) $\forall x \in I, f'_n(x) = \alpha_n(nx^{n-1} - (n+1)x^n) = \alpha_n x^{n-1}(n - x(n+1))$. En construisant le tableau de variations de f_n on établit que la fonction f_n positive admet sur I un maximum (absolu) au point $\frac{n}{n+1}$ qui vaut

$$f_n\left(\frac{n}{n+1}\right) = \alpha_n \frac{n^n}{(n+1)^{n+1}}. \text{ Donc } \|f_n\|_\infty = \alpha_n \frac{n^n}{(n+1)^{n+1}}.$$

$$(b.) \|f_n\|_\infty = \frac{\alpha_n}{n} \cdot \left(\frac{n}{n+1}\right)^{n+1}.$$

Or $\left(\frac{n}{n+1}\right)^{n+1} = \left(1 - \frac{1}{n+1}\right)^{n+1} = e^{(n+1)\ln(1-\frac{1}{n+1})}$, et $(n+1)\ln(1-\frac{1}{n+1}) \sim (n+1)\left(-\frac{1}{n+1}\right) \sim -1$. Donc $\lim \left(\frac{n}{n+1}\right)^{n+1} = e^{-1}$. Ainsi, $\|f_n\|_\infty \sim \frac{\alpha_n}{ne}$; de plus $\|f_n\| \geq 0$ et donc, par comparaison de séries positives,

$$\sum \|f_n\|_\infty \text{ converge} \iff \sum \frac{\alpha_n}{n} \text{ converge.}$$

⑦ (a.)
$$\sum_{k=n+1}^{+\infty} x^k = \frac{x^{n+1}}{1-x}.$$

(b.) On sait que la suite (α_n) décroît. Donc pour $k \geq n+1, \alpha_k \leq \alpha_{n+1}$. Alors $\forall k \geq n+1, \alpha_k x^k(1-x) \leq \alpha_{n+1}(1-x)x^k$, et donc par inégalités sur les séries convergentes,

$$0 \leq \sum_{k=n+1}^{+\infty} \alpha_k x^k(1-x) \leq \alpha_{n+1}(1-x) \sum_{k=n+1}^{+\infty} x^k = \alpha_{n+1}(1-x) \frac{x^{n+1}}{1-x} = \alpha_{n+1} x^{n+1} \leq \alpha_{n+1}.$$

La suite des restes $R_n(x) = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \alpha_k x^k(1-x)$ est donc positive et majorée par une suite qui ne dépend pas de x et qui

converge vers 0, ce qui prouve que la série $\sum f_n$ converge uniformément.

(c.) La suite (α_n) décroît et est minorée par 0, donc elle converge vers une limite positive ou nulle. Si cette limite ℓ est non nulle, alors pour tout n , $\alpha_n \geq \ell > 0$.

Dans ces conditions pour tout x dans I , $R_n(x) = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \alpha_k x^k (1-x) \geq \ell(1-x) \sum_{k=n+1}^{\infty} x^k = \ell x^{n+1}$.

Mais alors, $R_n(1 + \frac{1}{n+1}) \geq \ell(1 - \frac{1}{n+1})^{n+1}$ qui converge vers $\frac{\ell}{e}$ (voir question 6.a.) donc ne converge pas vers 0, c'est à dire que la suite des restes ne converge pas uniformément vers la fonction nulle, ce qui contredit l'hypothèse.

Donc $\sum f_n$ converge uniformément sur I , si et seulement si la suite $(\alpha_n)_{n \geq 1}$ converge vers 0.

⑧ (a.) Avec $\alpha_n = \frac{1}{n}$, la question 6.b. montre que la série $\sum f_n$ converge normalement (car $\frac{\alpha_n}{n} = \frac{1}{n^2}$ et la série $\sum \frac{1}{n^2}$ converge)

(b.) Il suffit de prendre $\alpha_n = 1$: la suite est constante, donc elle décroît (au sens large), et elle ne converge pas vers 0. Si on veut absolument une suite strictement décroissante, il suffit de prendre $\alpha_n = \frac{1}{2} + \frac{1}{n}$

(c.) Il nous faut trouver une suite $(\alpha_n)_n$ positive décroissante, convergeant vers 0, mais telle que la série $\sum \frac{\alpha_n}{n}$ diverge.

La suite définie par $\alpha_n = \frac{1}{\ln(n)}$ pour $n \geq 2$ et $\alpha_1 = \alpha_2$ convient (elle est bien définie pour $n \geq 1$). Cette suite est décroissante et converge vers 0. Il reste à montrer que la série $\sum \frac{\alpha_n}{n}$ diverge.

La fonction $g : x \rightarrow \frac{2}{x \ln(x)}$ décroît sur $[2, +\infty[$ et est positive.

La série $\sum_{n \geq 2} g(n)$ est donc de même nature que l'intégrale

$\int_2^{\infty} g(x) dx$. Or $\int_1^M g(x) dx = \int_1^M \frac{1}{x \ln(x)} dx = [\ln(\ln x)]_2^M = \ln(\ln M) - \ln(\ln 2)$ qui a pour limite $+\infty$ quand M tend vers $+\infty$.

L'intégrale diverge, donc la série $\sum \frac{\alpha_n}{n}$ diverge, et donc

$\sum_{n \geq 1} f_n$ converge uniformément sur I mais ne converge pas normalement sur I .

⑨ CV Normale \Rightarrow CV Absolue \Rightarrow CV simple (\mathbb{R} est complet)
 CV Normale \Rightarrow CV Uniforme \Rightarrow CV simple.
 Aucune des réciproques n'est vraie. Et de plus :
 CV absolue $\not\Rightarrow$ CV uniforme, et de même :
 CV uniforme $\not\Rightarrow$ CV absolue