

Feuille d'exercices n° 4

SÉRIES DE FONCTIONS

Exercice 1. Convergence simple, normale et uniforme

Étudier la convergence simple, la convergence normale puis la convergence uniforme de la série de fonctions $\sum_{n \in \mathbb{N}} f_n$

dans les cas suivants :

1. $f_n : x \mapsto \frac{x^n}{1+x^n}$ sur $[0, +\infty[$, puis sur $[0, 1[$, puis sur $[0, a]$ avec $a \in]0, 1[$,
2. $f_n : x \mapsto \frac{x^2}{n^3 + x^3}$, sur $[0, +\infty[$ puis sur $[0, a]$ avec $a > 0$,
3. $f_n : x \mapsto \frac{x}{n^3 + x^{3/2}}$ sur $[0, +\infty[$.

Exercice 2. Convergence simple, uniforme et normale

Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, on considère la fonction $f_n : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ définie pour tout $x \in \mathbb{R}$ par $f_n(x) = \frac{(-1)^n x^2}{x^4 + n}$.

1. Étudier la convergence simple de la série de fonctions $\sum_{n \geq 1} f_n$ sur \mathbb{R} .
2. Montrer que la série de fonctions $\sum_{n \geq 1} f_n$ est uniformément convergente sur \mathbb{R} .
3. Montrer qu'il n'existe aucune partie de \mathbb{R}^* sur laquelle elle converge normalement.

Exercice 3. Série de fonctions et intégrale, et dérivée

On considère la série de fonctions $\sum_{n \geq 1} f_n$ où pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, pour tout $x \in \mathbb{R}$, $f_n(x) = \frac{\sin(nx)}{n^3}$.

1. Montrer que cette série de fonctions converge simplement sur \mathbb{R} .
2. Montrer que sa somme $f = \sum_{n=1}^{+\infty} f_n$ est une fonction continue sur \mathbb{R} .
3. Montrer que $\int_0^\pi f(x) dx = 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{(2n-1)^4}$.
4. Montrer que f est dérivable sur \mathbb{R} , et donner une expression de $f'(x)$ sous forme de série pour tout $x \in \mathbb{R}$.

Exercice 4. Pour $x \in \mathbb{R}^+$, on pose (lorsque cela a un sens)

$$\varphi(x) = \sum_{n=2}^{+\infty} \left(\frac{1}{n-x} - \frac{1}{n+x} \right).$$

1. Déterminer le domaine de définition de la fonction φ .
2. Justifier l'existence de l'intégrale suivante et la calculer explicitement :

$$I = \int_0^1 \varphi(x) dx.$$

Exercice 5. Classe \mathcal{C}^∞

On pose, pour tout $x \in \mathbb{R}^+$, $f(x) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{x+n}$. Montrer que f est bien définie et qu'elle est de classe \mathcal{C}^∞ sur \mathbb{R}^+ .

Exercice 6. On pose $u_n(x) = \frac{2x}{x^2+n^2}$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$ et pour tout $x \in \mathbb{R}$.

1. Étudier la convergence simple de la série de fonctions $\sum u_n$.
2. Sa somme est-elle continue?
3. Étudier le comportement en $+\infty$ de sa somme S définie par $S(x) = \sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x)$ pour tout $x \in \mathbb{R}$.

Exercice 7. Règle d'Abel uniforme

Soit I un intervalle inclus dans \mathbb{R} . Soit $(f_n)_{n \geq 0}$ une suite de fonctions définies sur I telle que pour tout $x \in I$, $f_n(x) = a_n(x)b_n(x)$ avec $(a_n)_{n \geq 0}$ une suite de fonctions réelles, $(b_n)_n$ une suite de fonctions complexes vérifiant

- (i). $\forall x \in I$, la suite $(a_n(x))_{n \geq 0}$ est positive et décroissante,
- (ii). la suite de fonctions $(a_n)_n$ converge uniformément vers la fonction nulle sur I ,
- (iii). il existe $M > 0$ tel que pour tout $n \geq 0$, $\left\| \sum_{k=0}^n b_k \right\|_\infty \leq M$, i.e pour tout $x \in I$, $\left| \sum_{k=0}^n b_k(x) \right| \leq M$.

1. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, posons $B_n = \sum_{k=0}^n b_k(x)$ et B_{-1} la fonction nulle. Pour tout $x \in I$, pour tout $n \in \mathbb{N}$, exprimer $b_n(x)$ en fonction des B_k .
2. Soient $n, p \in \mathbb{N}$, $p \geq 1$. Montrer que pour tout $x \in I$, on a $\left| \sum_{k=n+1}^{n+p} f_k(x) \right| \leq 2a_{n+1}(x)M$.
3. En déduire que la série de fonctions $\sum f_n$ converge uniformément sur I .

Exercice 8. Règle d'Abel uniforme (II)

On considère la série de fonctions $\sum_{n \geq 1} f_n$ où pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, $f_n(x) = \frac{\sin(nx)}{n+x}$ pour tout $x \in [\pi, \pi/2]$.

1. En utilisant la règle d'Abel uniforme, montrer que $\sum_{n \geq 1} f_n$ converge uniformément sur $[\pi, \pi/2]$.
2. Montrer que $\sum_{n \geq 1} f_n$ ne converge pas normalement sur $[\pi, \pi/2]$.

Exercice 9. On considère la série de fonctions $\sum f_n$ où

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad \forall t \in \mathbb{R}, \quad f_n(t) = \frac{(-1)^n e^{-nt}}{n+1}.$$

1. (a) Montrer que la série de fonctions $\sum f_n$ converge simplement sur $E_s = [0, +\infty[$.
 (b) Montrer que la série de fonctions $\sum f_n$ converge absolument sur $E_a =]0, +\infty[$.
 (c) Montrer que la série $\sum f_n$ converge uniformément sur E_s .
 (d) La série converge-t-elle normalement sur E_s ? Et sur E_a ? Justifier.
2. Soit S la fonction somme de la série de fonctions $\sum f_n$. Montrer que lorsque t tend vers $+\infty$, $S(t)$ tend vers 1.
3. Soit A une partie non vide de \mathbb{R} . Trouver une condition nécessaire et suffisante sur $\inf(A)$ pour que la série de fonctions $\sum f_n$ converge normalement sur A .

Exercice 10. Soit $\alpha \in \mathbb{R}$. On considère pour tout $n \in \mathbb{N}^*$ la fonction

$$\begin{aligned} f_n : \mathbb{R}^+ &\longrightarrow \mathbb{R} \\ x &\longmapsto n^\alpha x e^{-nx^2/2} \end{aligned}$$

1. Montrer que la suite de fonctions $(f_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ converge simplement sur \mathbb{R}^+ vers la fonction nulle.
2. La convergence est-elle uniforme sur \mathbb{R}^+ ? On discutera suivant les valeurs de α .
3. Montrer que pour tout $h > 0$, $(f_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ converge uniformément sur $[h; +\infty[$ vers la fonction nulle.
4. On se place maintenant dans le cas particulier où $\alpha = 1$ et on considère maintenant la série de fonctions de terme général f_n .
 - (a) Montrer qu'elle converge simplement sur \mathbb{R}^+ et que sa somme $S : [0, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}$ est continue sur $]0; +\infty[$.
 - (b) Calculer, pour $x \geq 0$ et $m \in \mathbb{N}^*$, $S_m(x) = \sum_{n=1}^m f_n(x)$, puis expliciter $S(x)$ pour $x \geq 0$.
 - (c) La fonction S est-elle continue en 0?

Exercice 11. Pour x réel, on pose

$$f(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} e^{-x\sqrt{n}}.$$

1. Déterminer le domaine de définition de f , noté D_f .
2. Étudier la continuité de f sur D_f .
3. Montrer que la fonction f est strictement décroissante.
4. Étudier la limite de f en $+\infty$.
5. Déterminer un équivalent simple de $f(x)$ quand $x \rightarrow 0^+$.