

SÉRIES ET FAMILLES SOMMABLES

Nature de séries

Solution 1

- On suppose $0 < b \leq 1$. Dans ce cas, $b^n = o(2^{\sqrt{n}})$ puis $2^{\sqrt{n}} + b^n \sim 2^{\sqrt{n}}$. Finalement $u_n \sim a^n$. On en déduit que $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$ converge pour $0 < a < 1$ et diverge vers $+\infty$ sinon.
- On suppose $b > 1$. Dans ce cas, $2^{\sqrt{n}} = o(b^n)$ et donc $2^{\sqrt{n}} + b^n \sim b^n$. Finalement, $u_n \sim \left(\frac{a}{b}\right)^n 2^{\sqrt{n}}$. Posons $v_n = \left(\frac{a}{b}\right)^n 2^{\sqrt{n}}$. Alors

$$\frac{v_{n+1}}{v_n} = \frac{a}{b} 2^{\sqrt{n+1} - \sqrt{n}} = \frac{a}{b} 2^{\frac{1}{\sqrt{n+1} + \sqrt{n}}} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \frac{a}{b}$$

D'après la règle de d'Alembert

- si $a < b$, $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$ converge ;
- si $a > b$, $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$ diverge (grossièrement).

Enfin, si $a = b$, $u_n \sim 2^{\sqrt{n}}$ donc $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$ diverge grossièrement.

Solution 2

Supposons que la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$ converge. Alors (S_n) converge vers la somme $S > 0$ de cette série. On a donc $\frac{u_n}{S_n} \sim \frac{u_n}{S}$. La série $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{u_n}{S_n}$ converge donc.

Supposons que la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$ diverge. Puisque cette série est à termes positifs, elle diverge donc vers $+\infty$. Si $\frac{u_n}{S_n}$ ne tend pas vers 0 lorsque n tend vers $+\infty$, $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{u_n}{S_n}$ diverge grossièrement. Sinon, $\ln\left(1 - \frac{u_n}{S_n}\right) \sim -\frac{u_n}{S_n}$ donc les séries de terme général $\frac{u_n}{S_n}$ et $\ln\left(1 - \frac{u_n}{S_n}\right)$ sont de même nature. Or

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \ln\left(1 - \frac{u_n}{S_n}\right) &= \sum_{n=1}^N \ln \frac{S_{n-1}}{S_n} \\ &= \sum_{n=1}^N (\ln S_{n-1} - \ln S_n) = \ln S_0 - \ln S_N \end{aligned}$$

Or $S_N \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} +\infty$ puisque $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$ diverge vers $+\infty$. Ainsi $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \ln\left(1 - \frac{u_n}{S_n}\right)$ diverge de même que $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{u_n}{S_n}$.

Les deux séries $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$ et $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{u_n}{S_n}$ sont donc toujours de même nature.

Solution 3

- Soit $N \in \mathbb{N}$ tel que $\frac{u_{n+1}}{u_n} \leq \frac{v_{n+1}}{v_n}$ pour $n \geq N$. Par télescopage, on obtient, $\frac{u_n}{u_N} \leq \frac{v_n}{v_N}$ i.e. $u_n \leq \frac{u_N}{v_N} v_n$ pour tout $n \geq N$. On a donc $u_n = \mathcal{O}(v_n)$.

2. a. Soit β tel que $1 < \beta < \alpha$ et posons $v_n = \frac{1}{n^\beta}$ pour $n \in \mathbb{N}^*$. On a alors

$$\begin{aligned}\frac{v_{n+1}}{v_n} &= \frac{n^\beta}{(n+1)^\beta} \\ &= \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{-\beta} \\ &= 1 - \frac{\beta}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)\end{aligned}$$

Ainsi $\frac{v_{n+1}}{v_n} - \frac{u_{n+1}}{u_n} \sim \frac{\alpha - \beta}{n}$. Puisque $\alpha - \beta > 0$, on a donc $\frac{u_{n+1}}{u_n} \leq \frac{v_{n+1}}{v_n}$ à partir d'un certain rang. D'après la première question, $u_n = \mathcal{O}(v_n)$. La série $\sum_{n \in \mathbb{N}} v_n$ converge car $\beta > 1$ et, comme elle est à termes positifs, sa convergence entraîne celle de $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$.

- b. Cette fois-ci, on se donne β tel que $\alpha < \beta < 1$ et on pose à nouveau $v_n = \frac{1}{n^\beta}$ pour $n \in \mathbb{N}^*$. On montre comme précédemment que $v_n = \mathcal{O}(u_n)$. La divergence de $\sum_{n \in \mathbb{N}} v_n$ entraîne la divergence de $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$.
- c. Si on pose $u_n = \frac{1}{n}$ pour $n \in \mathbb{N}^*$, on a $\frac{u_{n+1}}{u_n} = 1 - \frac{1}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)$ et $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} u_n$ diverge.

Si on pose maintenant $u_n = \frac{1}{n \ln^2 n}$ pour $n \geq 2$, on a à nouveau $u_n = 1 - \frac{1}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)$. Mais la fonction $x \mapsto \frac{1}{x \ln^2 x}$ étant décroissante, la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$ et l'intégrale $\int_2^{+\infty} \frac{dt}{t \ln^2 t}$ sont de même nature. Or une primitive de $t \mapsto \frac{1}{t \ln^2 t}$ est $t \mapsto -\frac{1}{\ln t}$, ce qui prouve la convergence de l'intégrale précédente et par conséquent celle de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$.

3. On a

$$\begin{aligned}\frac{u_{n+1}}{u_n} &= \frac{2n+2}{2n+3} = \frac{1 + \frac{1}{n}}{1 + \frac{3}{2n}} \\ &= 1 - \frac{1}{2n} + o\left(\frac{1}{n}\right)\end{aligned}$$

Autrement dit, $\alpha = \frac{1}{2} < 1$ avec les notations précédentes. La série de terme général u_n diverge.

REMARQUE. Le critère de Raabe-Duhamel permet de conclure (sauf si $\alpha = 1$) dans les cas où le critère de d'Alembert ne le permet pas ($\frac{u_{n+1}}{u_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 1$).

Solution 4

1. On sait que $\tan x = x + \mathcal{O}(x^2)$ donc $\tan\left(\frac{1}{n}\right) - \frac{1}{n} = \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right)$. Puisque $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{n^2}$ converge et est à termes positifs, il en est de même de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \left(\tan\left(\frac{1}{n}\right) - \frac{1}{n}\right)$.

2. Puisque $e^x = 1 + x + o(x)$,

$$\sqrt[3]{3} = e^{\frac{\ln 3}{3}} = 1 + \frac{\ln 3}{3} + o\left(\frac{1}{n}\right)$$

et

$$\sqrt[3]{2} = e^{\frac{\ln 2}{3}} = 1 + \frac{\ln 2}{3} + o\left(\frac{1}{n}\right)$$

On en déduit que

$$\sqrt[3]{3} - \sqrt[3]{2} \sim \frac{\ln\left(\frac{3}{2}\right)}{3}$$

Puisque $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{n}$ diverge, il en est de même de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \left(\sqrt[3]{3} - \sqrt[3]{2}\right)$.

3. Puisque $\cos x \underset{x \rightarrow 0}{=} 1 - \frac{x^2}{2} + o(x^2)$

$$\cos\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \frac{1}{2n} + o\left(\frac{1}{n}\right)$$

De plus, $\ln(1+u) \underset{u \rightarrow 0}{\sim} u$ donc

$$\ln\left(\cos\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right)\right) \sim -\frac{1}{2n}$$

Puisque $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{n}$ diverge, il en est de même de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \ln\left(\cos\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right)\right)$.

4. Puisque $\operatorname{ch} x \underset{x \rightarrow 0}{=} 1 + \frac{x^2}{2} + \mathcal{O}(x^4)$

$$\operatorname{ch}\left(\frac{1}{\sqrt{3n}}\right) = 1 + \frac{1}{6n} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right)$$

Puisque $\operatorname{sh} x \underset{x \rightarrow 0}{=} x + \frac{x^3}{6} + \mathcal{O}(x^5)$

$$\operatorname{sh}\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right)\sqrt{n} = 1 + \frac{1}{6n} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right)$$

Ainsi

$$\operatorname{ch}\left(\frac{1}{\sqrt{3n}}\right) - \operatorname{sh}\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right)\sqrt{n} = \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right)$$

Puisque $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{n^2}$ converge et est à termes positifs, il en est de même de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \left(\operatorname{ch}\left(\frac{1}{\sqrt{3n}}\right) - \operatorname{sh}\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right)\sqrt{n}\right)$.

Solution 5

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, notons $u_n = \frac{1}{\binom{2n}{n}}$. On a

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = \frac{(n+1)^2}{(2n+2)(2n+1)}$$

d'où

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{u_{n+1}}{u_n} \right| = \frac{1}{4} < 1$$

La série $\sum u_n$ est donc convergente d'après la règle de D'Alembert.

Solution 6

Puisque la suite (u_n) est à valeurs strictement positives, on peut écrire :

$$\ln(u_{n+1}) - \ln(u_n) = a \left[(n+1)^2 - n^2 \right] + (n+1)^3 \ln\left(1 - \frac{a}{n+1}\right) - n^3 \ln\left(1 - \frac{a}{n}\right)$$

En utilisant le développement limité de $u \mapsto \ln(1+u)$ à l'ordre 3 en 0, on trouve

$$\begin{aligned} (n+1)^3 \ln\left(1 - \frac{a}{n+1}\right) &= -a(n+1)^2 - a^2(n+1) - a^3 + o(1) \\ n^3 \ln\left(1 - \frac{a}{n}\right) &= -an^2 - a^2n - a^3 + o(1) \end{aligned}$$

Finalement $\ln(u_{n+1}) - \ln(u_n) = -a^2 + o(1)$ et donc $\frac{u_{n+1}}{u_n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\longrightarrow} e^{-a^2}$. Si $a \neq 0$, $e^{-a^2} < 1$ et le critère de d'Alembert permet de conclure à la convergence de la série de terme général u_n . Si $a = 0$, il suffit de voir que $u_n = 1$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$ pour conclure à la divergence de cette même série.

Solution 7

1. Si $\beta \geq 0$, alors $0 \leq u_n \leq \frac{1}{n^\alpha}$ pour $n \geq 3$. Or la série de Riemann $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^\alpha}$ converge puisque $\alpha > 1$. On en déduit que $\sum_{n \geq 2} u_n$ converge.
Si $\beta < 0$, donnons-nous $\gamma \in]1, \alpha[$. Alors $(\ln n)^{-\beta} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(n^{\alpha-\gamma})$ par croissances comparées. Ceci signifie que $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o\left(\frac{1}{n^\gamma}\right)$. Or la série de Riemann $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^\gamma}$ est à termes positifs et converge puisque $\gamma > 1$. On en déduit que $\sum_{n \geq 2} u_n$ converge.
2. Si $\beta \leq 0$, alors $0 \leq \frac{1}{n^\alpha} \leq u_n$ pour $n \geq 3$. Or $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^\alpha}$ diverge donc $\sum_{n \geq 2} u_n$ diverge.
Si $\beta > 0$, donnons-nous $\gamma \in]\alpha, 1[$. Alors $(\ln n)^\beta \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(n^{\gamma-\alpha})$ par croissances comparées. Ceci signifie que $\frac{1}{n^\gamma} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(u_n)$. Or la série $\sum_{n \geq 2} u_n$ est à termes positifs et la série de Riemann $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^\gamma}$ diverge puisque $\gamma < 1$. On en déduit que $\sum_{n \geq 2} u_n$ diverge.
3. On a alors $0 \leq \frac{1}{n} \leq u_n$ pour $n \geq 3$. Or la série harmonique $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n}$ diverge. On en déduit que $\sum_{n \geq 2} u_n$ diverge.
4. Posons $f(x) = \frac{1}{x(\ln x)^\beta}$ pour $x > 1$. f est décroissante sur $]1, +\infty[$ de sorte que

$$\int_2^{n+1} f(x) \, dx \leq \sum_{k=2}^n u_k \leq \frac{1}{(\ln 2)^\beta} + \int_2^n f(x) \, dx$$

Si $\beta \neq 1$, alors $x \mapsto \frac{(\ln x)^{1-\beta}}{1-\beta}$ est une primitive de f de sorte que

$$\frac{(\ln(n+1))^{1-\beta}}{1-\beta} - \frac{(\ln 2)^{1-\beta}}{1-\beta} \leq \sum_{k=2}^n u_k \leq \frac{1}{(\ln 2)^\beta} + \frac{(\ln n)^{1-\beta}}{1-\beta} - \frac{(\ln 2)^{1-\beta}}{1-\beta}$$

Le théorème de minoration nous permet d'affirmer que la série $\sum u_n$ diverge si $\beta < 1$. Par contre, si $\beta > 1$, la suite des sommes partielles de la série $\sum_{n \geq 2} u_n$ est croissante (puisque la série est à termes positifs) et majorée par une suite convergente donc elle converge en vertu du théorème de la limite monotone. On peut donc affirmer que $\sum_{n \geq 2} u_n$ converge.

Si $\beta = 1$, alors $x \mapsto \ln(\ln x)$ est une primitive de f de sorte que

$$\ln(\ln(n+1)) - \ln(\ln 2) \leq \sum_{k=2}^n u_k$$

On conclut à la divergence de $\sum_{n \geq 2} u_n$ via le théorème de minoration.

Solution 8

1. Soit $q \in]\ell, 1[$. Par définition de la limite, il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $0 \leq \sqrt[n]{u_n} \leq q$ pour $n \geq N$. Ainsi $0 \leq u_n \leq q^n$ pour $n \geq N$. Puisque la série $\sum q^n$ converge, il en est de même de la série $\sum u_n$.
2. Soit $q \in]1, \ell[$. Par définition de la limite, il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $0 \leq q \leq \sqrt[n]{u_n}$ pour $n \geq N$. Ainsi $0 \leq q^n \leq u_n$ pour $n \geq N$. Puisque la série $\sum q^n$ diverge, il en est de même de la série $\sum u_n$.
3. Posons $u_n = 1$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. Alors $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{u_n} = 1$ et $\sum u_n$ diverge.
Posons $u_n = \frac{1}{n^2}$. Alors $\sqrt[n]{u_n} = \exp\left(-\frac{2 \ln n}{n}\right)$ d'où $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{u_n} = 1$ et $\sum u_n$ converge.

Solution 9

1. L'inegalité est clairement vraie pour $n = 0$. Supposons la vraie pour un certain $n \in \mathbb{N}$. Alors

$$|x_{n+2} - x_{n+1}| = |f(x_{n+1}) - f(x_n)| \leq k|x_{n+1} - x_n| \leq k^{n+1}|x_1 - x_0|$$

Par récurrence, l'inégalité est donc vraie pour tout $n \in \mathbb{N}$.

2. D'après la question précédente $x_{n+1} - x_n = \mathcal{O}(k^n)$ avec $k \in [0, 1[$ donc la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} x_{n+1} - x_n$ converge (absolument). Ceci signifie que la suite (x_n) converge.

3. Notons ℓ la limite de (x_n) . Puisque f est continue (car lipschitzienne), $\ell = f(\ell)$ donc ℓ est un point fixe de f . Soit ℓ' un point fixe de f . Alors

$$|\ell - \ell'| = |f(\ell) - f(\ell')| \leq k|\ell - \ell'|$$

ou encore

$$(1 - k)|\ell - \ell'| \leq 0$$

Puisque $1 - k > 0$, $|\ell - \ell'| = 0$ i.e. $\ell = \ell'$.
 f admet donc un unique point fixe.

Solution 10

Pour tout entier $n \geq 3$,

$$\begin{aligned} \frac{nu_n}{(n-1)u_{n-1}} &= \frac{n}{n-1} \left(2 - e^{\frac{1}{n}}\right) \\ &= \frac{1}{1 - \frac{1}{n}} \left(2 - e^{\frac{1}{n}}\right) \\ &= \left(1 + \frac{1}{n} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right)\right) \left(1 - \frac{1}{n} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right)\right) \\ &= 1 + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right) \end{aligned}$$

Ainsi $v_n = \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right)$. Par conséquent $\sum v_n$ converge.

Mais comme $v_n = \ln(nu_n) - \ln((n-1)u_{n-1})$, on peut affirmer grâce au lien entre suite et série télescopique que la suite $(\ln(nu_n))$ converge.

Notons ℓ sa limite. Ainsi $\lim_{n \rightarrow +\infty} nu_n = e^\ell$ i.e. $u_n \sim_{n \rightarrow +\infty} \frac{e^\ell}{n}$. Comme la série à termes positifs $\sum \frac{1}{n}$ diverge, il en est de même de la série $\sum u_n$.

Solution 11

1. La fonction $f : x \mapsto \int_x^1 \frac{e^t}{t} dt$ est strictement décroissante sur $]0, 1]$ (elle est dérivable et sa dérivée est $x \mapsto -\frac{e^x}{x}$). Comme $\frac{e^t}{t} \underset{t \rightarrow 0^+}{\sim} \frac{1}{t}$, $\int_0^1 \frac{e^t}{t} dt$ diverge. Puisque $t \mapsto \frac{e^t}{t}$ est positive, $\lim_{0^+} f = +\infty$. Par ailleurs, $f(1) = 0$. Enfin, f est continue sur $]0, 1]$ donc, d'après le théorème des valeurs intermédiaires, pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, il existe un unique $u_n \in]0, 1]$ tel que $f(u_n) = n$.

2. D'après la question précédente, f induit une bijection strictement décroissante de $]0, 1]$ sur $[0, +\infty[$. Sa bijection réciproque est donc également strictement décroissante. Comme $u_n = f^{-1}(n)$, (u_n) est strictement décroissante. de plus, $\lim_{0^+} f = +\infty$ donc $\lim_{+\infty} f^{-1} = 0$. Par conséquent, (u_n) converge vers 0.

3. Remarquons que

$$v_n = \int_{u_n}^1 \frac{e^t}{t} dt - \int_{u_n}^1 \frac{dt}{t} = \int_{u_n}^1 \frac{e^t - 1}{t} dt$$

Comme $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{e^t - 1}{t} = 1$, l'intégrale $\int_0^1 \frac{e^t - 1}{t} dt$ converge. Comme (u_n) converge vers 0,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} v_n = \int_0^1 \frac{e^t - 1}{t} dt$$

4. Posons $I = \int_0^1 \frac{e^t - 1}{t} dt$. Ainsi $\ln(u_n) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} -n + I + o(1)$ puis $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{e^I}{n}$. On en déduit que $\sum u_n$ diverge.

Solution 12

On va raisonner par récurrence. Notons \mathcal{P}_p l'assertion

Pour tout $n \in \llbracket 2^p, 2^{p+1} - 1 \rrbracket$, a_n est défini et $a_n = 2^{\lfloor \log_2(n) \rfloor} = 2^p$

\mathcal{P}_0 est évidemment vraie. Supposons \mathcal{P}_p vraie pour un certain $p \in \mathbb{N}^*$. Soit alors $n \in \llbracket 2^{p+1}, 2^{p+2} - 1 \rrbracket$. Alors $\lfloor n/2 \rfloor \in \llbracket 2^p, 2^{p+1} - 1 \rrbracket$ donc a_n est bien défini et

$$a_n = 2a_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} = 2 \cdot 2^p = 2^{p+1} = 2^{\lfloor \log_2(n) \rfloor}$$

de sorte que \mathcal{P}_{p+1} est vraie.

Ainsi \mathcal{P}_p est vraie pour tout $p \in \mathbb{N}^*$.

Comme la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{a_n^2}$ est à termes positifs, elle converge ou diverge vers $+\infty$. Il suffit donc de considérer une suite extraite de la suite (S_n) de ses sommes partielles pour déterminer sa nature et sa somme éventuelle.

$$\forall p \in \mathbb{N}, S_{2^{p+1}-1} = \sum_{k=0}^p \sum_{j=2^k}^{2^{k+1}-1} \frac{1}{a_j^2} = \sum_{k=0}^p \sum_{j=2^k}^{2^{k+1}-1} \frac{1}{(2^k)^2} = \sum_{k=0}^p \frac{2^k}{(2^k)^2} = \sum_{k=0}^p \frac{1}{2^k}$$

Ainsi $S_{2^{p+1}-1}$ est la somme partielle de rang p de la série géométrique $\sum_{k \in \mathbb{N}} \frac{1}{2^k}$. On en déduit que $\lim_{p \rightarrow +\infty} S_{2^{p+1}-1} = \frac{1}{1 - \frac{1}{2}} = 3$. On en déduit

que $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{a_n^2}$ converge et que sa somme est 3.

REMARQUE. On aurait aussi pu utiliser le théorème de sommation par paquets à la famille $(a_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ et à la partition $\mathbb{N}^* = \bigsqcup_{p \in \mathbb{N}} \llbracket 2^p, 2^{p+1} - 1 \rrbracket$.

Calculs de sommes

Solution 13

Considérons la fraction rationnelle $F = \frac{X}{X^4 + X^2 + 1}$. Elle admet une décomposition en éléments simples sur \mathbb{R} du type

$$F = \frac{aX + b}{X^2 - X + 1} + \frac{cX + d}{X^2 + X + 1}$$

L'imparité de F donne $a = c$ et $b = -d$. En considérant la limite de $x F(x)$ lorsque x tend vers $\pm\infty$, on trouve $a + c = 0$ et donc $a = c = 0$.

On trouve alors facilement $b = \frac{1}{2}$ et $d = -\frac{1}{2}$ d'où

$$F = \frac{1}{2(X^2 - X + 1)} - \frac{1}{2(X^2 + X + 1)}$$

On remarque alors que $X^2 - X + 1 = X^2 - (X - 1)$ et que $X^2 + X + 1 = (X + 1)^2 - X$. Ainsi pour $p \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^p \frac{n}{n^4 + n^2 + 1} &= \frac{1}{2} \sum_{n=0}^p \frac{1}{n^2 - (n - 1)} - \frac{1}{(n + 1)^2 - n} \\ &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{(p + 1)^2 - p} \right) \text{ par télescopage} \\ &\xrightarrow{p \rightarrow +\infty} \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Ainsi la série de l'énoncé converge bien et sa somme vaut $\frac{1}{2}$.

Solution 14

Pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\begin{aligned}\frac{1}{\binom{n+p}{n}} &= \frac{p!}{(n+p)(n+p-1)\dots(n+1)} \\ &= \frac{p!}{p-1} \frac{(n+p) - (n+1)}{(n+p)(n+p-1)\dots(n+1)} \\ &= \frac{p!}{p-1} \left(\frac{1}{(n+p-1)\dots(n+1)} - \frac{1}{(n+p)\dots(n+2)} \right)\end{aligned}$$

Donc pour tout $N \in \mathbb{N}$, on a par télescopage

$$\begin{aligned}\sum_{n=0}^N \frac{1}{\binom{n+p}{n}} &= \frac{p!}{p-1} \sum_{n=0}^N \left(\frac{1}{(n+p-1)\dots(n+1)} - \frac{1}{(n+p)\dots(n+2)} \right) \\ &= \frac{p!}{p-1} \left(\frac{1}{(p-1)\dots 1} - \frac{1}{(N+p)\dots(N+2)} \right) \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} \frac{p!}{(p-1)(p-1)!} = \frac{p}{p-1}\end{aligned}$$

Ainsi la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{1}{\binom{n+p}{n}}$ converge et sa somme vaut $\frac{p}{p-1}$.

Solution 15

1. On reconnaît le développement de Taylor en 0 de \exp .

Soient $x \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}$. \exp est de classe \mathcal{C}^∞ sur \mathbb{R} donc, a fortiori, de classe \mathcal{C}^{n+1} sur le segment d'extrémités 0 et x . De plus, la dérivée d'ordre $n+1$ de \exp est encore \exp pour tout t compris entre 0 et x , $|e^t| = e^t \leq M$ avec $M = \max(e^x, 1)$ (pour éviter de distinguer suivant le signe de x). En appliquant l'inégalité de Taylor-Lagrange entre 0 et x à l'ordre n , on a

$$\left| e^x - \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} \right| \leq \frac{M|x|^{n+1}}{(n+1)!}$$

Remarquons que M est indépendant de n donc l'inégalité précédente est valable pour tout $n \in \mathbb{N}$. Par comparaison des suites de référence, $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{|x|^{n+1}}{(n+1)!} = 0$ et donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} = e^x$ par encadrement. La série $\sum_{n \geq 0} \frac{x^n}{n!}$ converge donc et sa somme est e^x .

2. On reconnaît les développements de Taylor en 0 de \cos et \sin .

Soient $x \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}$. \cos et \sin sont de classe \mathcal{C}^∞ sur \mathbb{R} donc, a fortiori, de classe \mathcal{C}^{n+1} sur le segment d'extrémités 0 et x . Une récurrence évidente montre que $\cos^{(2n+1)} = (-1)^{n+1} \sin$ et $\sin^{(2n+2)} = (-1)^{n+1} \cos$. Il est alors évident que $\cos^{(2n+1)}$ et $\sin^{(2n+2)}$ sont majorées en valeur absolue par 1 sur \mathbb{R} . En appliquant l'inégalité de Taylor-Lagrange à \cos entre 0 et x à l'ordre $2n$, on a

$$\left| \cos x - \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k x^{2k}}{(2k)!} \right| \leq \frac{|x|^{2n+1}}{(2n+1)!}$$

En appliquant l'inégalité de Taylor-Lagrange à \sin entre 0 et x à l'ordre $2n+1$, on a

$$\left| \sin x - \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k x^{2k+1}}{(2k+1)!} \right| \leq \frac{|x|^{2n+2}}{(2n+2)!}$$

Par comparaison des suites de référence,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|x|^{2n+1}}{(2n+1)!} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|x|^{2n+2}}{(2n+2)!} = 0$$

Ceci permet de conclure que les séries $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{(-1)^n x^{2n}}{(2n)!}$ et $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{(2n+1)!}$ convergent et ont respectivement pour sommes $\cos x$ et $\sin x$.

REMARQUE. On peut, en reprenant la preuve de la première question, montrer que la série $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(ix)^n}{n!}$ converge et a pour somme e^{ix} .

On obtient la convergence et la somme des séries $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{(-1)^n x^{2n}}{(2n)!}$ et $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{(2n+1)!}$ en passant à la partie réelle et imaginaire.

3. On reconnaît le développement de Taylor en 0 de $x \mapsto \ln(1+x)$.

Soient $x \in [0, 1]$ et $n \in \mathbb{N}^*$. $f : t \mapsto \ln(1+t)$ est de classe \mathcal{C}^∞ sur $] -1, +\infty[$ donc, a fortiori, de classe \mathcal{C}^{n+1} sur $[0, x]$. Une récurrence évidente montre que $f^{(n+1)}(t) = \frac{(-1)^n n!}{(1+t)^{n+1}}$ pour tout $t \in] -1, +\infty[$. Ainsi pour tout $t \in [0, x]$,

$$|f^{(n+1)}(t)| \leq n!$$

En appliquant l'inégalité de Taylor-Lagrange entre 0 et x à l'ordre n , on a

$$\left| \ln(1+x) - \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k-1} x^k}{k} \right| \leq \frac{x^{n+1} n!}{(n+1)!} = \frac{x^{n+1}}{n+1} \leq \frac{1}{n+1}$$

car $x \in [0, 1]$. Par encadrement, $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^{k+1} x^k}{k} = \ln(1+x)$. La série $\sum_{n \geq 1} \frac{(-1)^{n+1} x^n}{n}$ converge donc et sa somme vaut $\ln(1+x)$.

Solution 16

Soit $n \in \mathbb{N}^*$.

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k-1}}{k} &= \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \int_0^1 t^{k-1} dt \\ &= \int_0^1 \sum_{k=0}^{n-1} (-t)^k dt \\ &= \int_0^1 \frac{1 - (-t)^n}{1+t} dt \\ &= \int_0^1 \frac{dt}{1+t} + (-1)^{n+1} \int_0^1 \frac{t^n}{1+t} dt \\ &= \ln(2) + (-1)^{n+1} \int_0^1 \frac{t^n}{1+t} dt \end{aligned}$$

On a pour tout $t \in [0, 1]$

$$0 \leq \frac{t^n}{1+t} \leq t^n$$

et par croissance de l'intégrale

$$0 \leq \int_0^1 \frac{t^n}{1+t} dt \leq \frac{1}{n+1}$$

Ainsi $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^1 \frac{t^n}{1+t} dt = 0$ puis

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k-1}}{k} = \ln(2)$$

On en déduit que $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{(-1)^{n-1}}{n}$ converge et que sa somme est $\ln(2)$.

Solution 17

On sait, du moins j'espère, que

$$u_n = \frac{1}{6} n(n+1)(2n+1)$$

Par une décomposition en éléments simples

$$\frac{1}{u_n} = 6 \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n+1} - \frac{4}{2n+1} \right)$$

On pose $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$. On montre classiquement qu'il existe $\gamma \in \mathbb{R}$ tel que

$$H_n = \ln(n) + \gamma + o(1)$$

Ainsi

$$\begin{aligned}
 \sum_{k=1}^n \frac{1}{u_k} &= 6 \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{k+1} - \sum_{k=1}^n \frac{4}{2k+1} \right) \\
 &= 6 \left(H_n + H_{n+1} - 1 - 4 \left(\sum_{k=1}^{2n+1} \frac{1}{2k+1} - \sum_{k=1}^n \frac{1}{2k} \right) \right) \\
 &= 6 \left(H_n + H_{n+1} - 1 - 4 \left(H_{2n+1} - 1 - \frac{1}{2} H_n \right) \right) \\
 &= 6(3H_n + H_{n+1} - 4H_{2n+1} + 3) \\
 &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} 6(3 \ln(n) + 3\gamma + \ln(n+1) + \gamma - 4 \ln(2n+1) - 4\gamma + 3 + o(1)) \\
 &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} 6 \left(\ln \left(\frac{n^3(n+1)}{(n+1/2)^4} \right) + 3 - 4 \ln(2) + o(1) \right) \\
 &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} 6(3 - 4 \ln(2)) + o(1)
 \end{aligned}$$

car $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n^3(n+1)}{(n+1/2)^4} = 1$. On en déduit que $\sum \frac{1}{u_n}$ converge et que

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{u_n} = 6(3 - 4 \ln(2))$$

On peut vérifier avec Python.

```

>>> from math import log
>>> def somme(n):
...     s=0
...     S=0
...     for k in range(1,n+1):
...         s += k**2
...         S += 1/s
...     return S
>>> somme(1000), 6*(3-4*log(2))
(1.364466169557005, 1.3644676665613131)

```

Solution 18

1. C'est du cours.

2. a. Supposons $\lambda \neq 0$. Si $\lambda \in \mathbb{R}^*$, $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\lambda}{n}$ et $\sum u_n$ diverge. Si $\lambda \in \{-\infty, +\infty\}$, $\frac{1}{n} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(u_n)$ et (u_n) est de signe constant à partir d'un certain rang donc $\sum u_n$ diverge.
Par l'absurde, $\lambda = 0$.

b. Remarquons que (u_n) est positive puisqu'elle est décroissante de limite nulle.

Notons $S_n = \sum_{k=0}^n u_k$. Par décroissance de (u_n) ,

$$0 \leq 2nu_{2n} = 2 \sum_{k=n+1}^{2n} u_{2n} \leq 2 \sum_{k=n+1}^{2n} u_k = 2(S_{2n} - S_n)$$

Comme $\sum u_n$ converge, $(S_{2n} - S_n)$ converge vers 0 puis $(2nu_{2n})$ également via le théorème des gendarmes. Par ailleurs,

$$0 \leq (2n+1)u_{2n+1} \leq (2n+1)u_{2n} = 2nu_{2n} + u_{2n}$$

A nouveau, $((2n+1)u_{2n+1})$ converge vers 0 par le théorème des gendarmes. On peut alors conclure que (nu_n) converge vers 0 puisque c'est le cas pour ses suites extraites $(2nu_{2n})$ et $((2n+1)u_{2n+1})$.

c. Remarquons que

$$n(u_n - u_{n+1}) = (nu_n - (n+1)u_{n+1}) + u_{n+1}$$

Puisque la suite (nu_n) converge, la série télescopique $\sum nu_n - (n+1)u_{n+1}$ converge. De plus, $\sum u_{n+1}$ converge par hypothèse. Ainsi, $\sum n(u_n - u_{n+1})$ converge comme somme de deux séries convergentes. On peut rajouter que

$$\sum_{n=0}^{+\infty} n(u_n - u_{n+1}) = \sum_{n=0}^{+\infty} (nu_n - (n+1)u_{n+1}) + \sum_{n=0}^{+\infty} u_{n+1} = \sum_{n=1}^{+\infty} u_n$$

Solution 19

Pour simplifier l'exercice, on remarquera que, via le changement de variable $u = \tan x$,

$$\forall n \in \mathbb{N}, I_n = \int_0^1 \frac{u^n}{1+u^2} du$$

1. Pour tout $u \in [0, 1]$, $0 \leq \frac{u^n}{1+u^2} \leq u^n$ donc

$$0 \leq I_n \leq \int_0^1 u^n du = \frac{1}{n+1}$$

D'après le théorème des gendarmes, (I_n) converge vers 0.

2. Il est clair que

$$I_n + I_{n+2} = \int_0^1 u^n du = \frac{1}{n+1}$$

3. Remarquons que

$$(-1)^n I_{2n} + (-1)^n I_{2n+2} = \frac{(-1)^n}{2n+1}$$

donc en posant $v_n = (-1)^n I_{2n}$,

$$v_n - v_{n+1} = \frac{(-1)^n}{2n+1}$$

La série télescopique $\sum v_n - v_{n+1}$ converge puisque (v_n) converge vers 0. On en déduit que $\sum \frac{(-1)^n}{2n+1}$ converge et que

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} = \sum_{n=0}^{+\infty} v_n - v_{n+1} = v_0 - \lim_{n \rightarrow +\infty} v_n = \frac{\pi}{4} - 0 = \frac{\pi}{4}$$

REMARQUE. On aurait aussi pu utiliser le critère spécial des séries alternées pour montrer que $\sum \frac{(-1)^n}{2n+1}$ converge.

4. Pour tout $u \in [0, 1]$,

$$\frac{u^n}{1+u^2} \leq \frac{u^{n+1}}{1+u^2}$$

donc $I_{n+1} \leq I_n$. La suite (I_n) converge vers 0 en décroissant donc la série $\sum (-1)^n I_n$ converge d'après le critère spécial des séries alternées.

Posons $S_n = \sum_{k=0}^n (-1)^k I_k$. Alors

$$\begin{aligned} S_n &= \int_0^1 \frac{\sum_{k=0}^n (-1)^k u^k}{1+u^2} du && \text{par linéarité de l'intégrale} \\ &= \int_0^1 \frac{1 - (-1)^{n+1} u^{n+1}}{(1+u)(1+u^2)} du && \text{somme des termes d'une suite géométrique} \\ &= \int_0^1 \frac{du}{(1+u)(1+u^2)} + (-1)^{n+1} \int_0^1 \frac{u^{n+1}}{(1+u)(1+u^2)} du \end{aligned}$$

On prouve comme précédemment que

$$0 \leq \int_0^1 \frac{u^{n+1}}{(1+u)(1+u^2)} du \leq \int_0^1 u^{n+1} du = \frac{1}{n+2}$$

donc

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^1 \frac{u^{n+1}}{(1+u)(1+u^2)} du = 0$$

On en déduit que

$$\sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n I_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = \int_0^1 \frac{du}{(1+u)(1+u^2)}$$

Par une décomposition en éléments simples,

$$\frac{1}{(1+u)(1+u^2)} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-u}{1+u^2} + \frac{1}{1+u} \right)$$

donc

$$\int_0^1 \frac{du}{(1+u)(1+u^2)} = \frac{1}{2} \left[\arctan u - \frac{1}{2} \ln(1+u^2) + \ln(1+u) \right]_0^1 = \frac{\pi}{8} + \frac{1}{4} \ln 2$$

Finalement

$$\sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n I_n = \frac{\pi}{8} + \frac{1}{4} \ln 2$$

On vérifie avec Python.

```
>>> from numpy import pi, log
>>> from scipy.integrate import quad
>>> I=lambda n:quad(lambda u:u**n/(1+u**2),0,1)[0]
>>> S=sum([(-1)**n*I(n) for n in range(1000)])
>>> S, pi/8+log(2)/4
(0.565735752089146, 0.5659858768387105)
```

Comparaison série/intégrale

Solution 20

On posera $S_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^\alpha}$ et $R_n = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^\alpha}$ lorsque $\alpha > 1$.

Première méthode : comparaison à une intégrale.

Il faut prendre garde au sens de variation de $t \mapsto 1/t^\alpha$ pour encadrer.

- Supposons $\alpha \leq 0$. Par comparaison à une intégrale

$$\int_0^n \frac{dt}{t^\alpha} \leq S_n \leq \int_1^{n+1} \frac{dt}{t^\alpha}$$

ou encore

$$\frac{n^{1-\alpha}}{1-\alpha} \leq S_n \leq \frac{(n+1)^{1-\alpha}}{1-\alpha} - \frac{1}{1-\alpha}$$

On en déduit $S_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{n^{1-\alpha}}{1-\alpha}$.

- Supposons $0 < \alpha \leq 1$. Par comparaison à une intégrale

$$\int_1^{n+1} \frac{dt}{t^\alpha} \leq S_n \leq 1 + \int_1^n \frac{dt}{t^\alpha}$$

Si $0 < \alpha < 1$, on en déduit

$$\frac{(n+1)^{1-\alpha}}{1-\alpha} - \frac{1}{1-\alpha} \leq S_n \leq 1 + \frac{n^{1-\alpha}}{1-\alpha} - \frac{1}{1-\alpha}$$

On en déduit à nouveau $S_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{n^{1-\alpha}}{1-\alpha}$.

Si $\alpha = 1$,

$$\ln(n+1) \leq S_n \leq 1 + \ln n$$

et donc $S_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln n$.

- Supposons $\alpha > 1$. On compare à nouveau à une intégrale. Pour des entiers n et N tels que $1 \leq n < N$

$$\int_{n+1}^{N+1} \frac{dt}{t^\alpha} \leq \sum_{k=n+1}^N \frac{1}{k^\alpha} \leq \int_n^N \frac{dt}{t^\alpha}$$

ou encore

$$\frac{1}{\alpha-1} \left(\frac{1}{(n+1)^{\alpha-1}} - \frac{1}{(N+1)^{\alpha-1}} \right) \leq \sum_{k=n+1}^N \frac{1}{k^\alpha} \leq \frac{1}{\alpha-1} \left(\frac{1}{n^{\alpha-1}} - \frac{1}{N^{\alpha-1}} \right)$$

En faisant tendre N vers $+\infty$, on obtient

$$\frac{1}{\alpha-1} \frac{1}{(n+1)^{\alpha-1}} \leq R_n \leq \frac{1}{\alpha-1} \frac{1}{n^{\alpha-1}}$$

On en déduit que $R_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{\alpha-1} \frac{1}{n^{\alpha-1}}$.

Deuxième méthode : utilisation de séries télescopiques.

Plaçons-nous dans le cas $\alpha \neq 1$. Comme $t \mapsto \frac{1}{t^\alpha}$ admet pour primitive $t \mapsto \frac{t^{1-\alpha}}{1-\alpha}$, on peut conjecturer que $S_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{n^{1-\alpha}}{1-\alpha}$ si $\alpha < 1$ et

$R_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{n^{1-\alpha}}{\alpha-1}$ dans le cas convergent.

$$n^{1-\alpha} - (n-1)^{1-\alpha} = n^{1-\alpha} \left(1 - \left(1 - \frac{1}{n} \right)^{1-\alpha} \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n^{1-\alpha} \cdot \frac{1-\alpha}{n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1-\alpha}{n^\alpha}$$

- Si $\alpha < 1$, $\sum \frac{1}{n^\alpha}$ est une série à termes positifs divergente donc

$$\sum_{k=1}^n k^{1-\alpha} - (k-1)^{1-\alpha} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} S_n$$

ou encore

$$S_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{n^{1-\alpha}}{1-\alpha}$$

- Si $\alpha > 1$, $\sum \frac{1}{n^\alpha}$ est une série à termes positifs convergente donc

$$\sum_{k=n}^{+\infty} k^{1-\alpha} - (k-1)^{1-\alpha} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} S_n$$

ou encore

$$S_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{(n+1)^{1-\alpha}}{\alpha-1} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{n^{1-\alpha}}{\alpha-1}$$

Reste le cas $\alpha = 1$. Cette fois, \ln est une primitive de $t \mapsto 1/t$ donc on est amené à considérer l'équivalent suivant

$$\ln(n) - \ln(n-1) = -\ln\left(1 - \frac{1}{n}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n}$$

Comme $\sum \frac{1}{n}$ est une série à termes positifs divergente,

$$\sum_{k=2}^n \ln(k) - \ln(k-1) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} = S_n - 1$$

ou encore, comme (S_n) diverge vers $+\infty$,

$$S_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} S_n - 1 \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln(n)$$

Solution 21

1. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. On a évidemment $u_n = \sum_{k=1}^n \ln k$. La fonction \ln étant croissante sur \mathbb{R}_+^* ,

$$\int_1^n \ln(t) \, dt \leq u_n \leq \int_1^{n+1} \ln(t) \, dt$$

ou encore

$$n \ln(n) - n + 1 \leq u_n \leq (n+1) \ln(n+1) - n$$

On a clairement $1 = o(n \ln n)$, $n = o(n \ln n)$ donc $n \ln n - n + 1 \sim n \ln n$.

De plus,

$$(n+1) \ln(n+1) - n = n \ln n + n \ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) + \ln n + \ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) - n$$

On a clairement $n = o(n \ln n)$ et $\ln n = o(n \ln n)$.

Par ailleurs, $\ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ donc $\ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) = o(n \ln n)$.

On en déduit également que $n \ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) = o(n)$ et a fortiori $n \ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) = o(n \ln n)$.

Finalement, $(n+1) \ln(n+1) - n \sim n \ln n$.

Le théorème des gendarmes assure alors que $u_n \sim n \ln n$.

2. D'après la question précédente, $\frac{1}{u_n^2} \sim \frac{1}{n^2 (\ln n)^2}$. On en déduit par exemple que $\frac{1}{u_n^2} = \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right)$, ce qui assure la convergence de la série

$$\sum_{n \geq 2} \frac{1}{u_n^2}.$$

3. Soit $(x, y) \in]1, +\infty[$ tel que $x \leq y$. Alors $0 \leq \ln x \leq \ln y$ donc $0 \leq \frac{1}{\ln y} \leq \frac{1}{\ln x}$. Puisque $0 < \frac{1}{y} \leq \frac{1}{x}$, on en déduit que $0 \leq f(y) \leq f(x)$.

Ainsi f est décroissante sur $]1, +\infty[$.

4. Soit $n \geq 2$. Puisque la fonction f est décroissante sur $]1, +\infty[$

$$\int_2^{n+1} f(t) \, dt \leq \sum_{k=2}^n f(k)$$

ou encore

$$\ln(\ln(n+1)) - \ln(\ln 2) \leq \sum_{k=2}^n \frac{1}{u_k}$$

Par théorème de minoration, la série $\sum_{n \geq 2} \frac{1}{u_n}$ diverge (vers $+\infty$).

Solution 22

1. Pour tout $n \geq 2$, $u_n \geq \ln 2$ donc (u_n) ne converge pas vers 0 et $\sum u_n$ converge.
2. Il suffit de constater que la fonction $t \mapsto \ln(t)^2$ est croissante sur $[1, +\infty[$ et de procéder à une comparaison série/intégrale classique.
3. Soit $x \geq 1$. Par intégration par parties

$$\begin{aligned} \int_1^x \ln(t)^2 \, dt &= [t \ln(t)^2]_1^x - 2 \int_1^x \ln(t) \, dt \\ &= x \ln(x)^2 - 2[t \ln(t) - t]_1^x \\ &= x \ln(x)^2 - 2x \ln(x) + x + 1 \\ &\underset{x \rightarrow +\infty}{\sim} x \ln(x)^2 \end{aligned}$$

4. D'après la question précédente,

$$\int_1^n (\ln(t))^2 dt \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n \ln(n)^2$$

De même,

$$\int_1^{n+1} (\ln(t))^2 dt \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} (n+1) \ln(n+1)^2$$

Or $n+1 \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n$ et

$$\ln(n+1) = \ln(n) + \ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \ln(n) + o(1)$$

A fortiori, $\ln(n+1) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln(n)$ puis

$$\int_1^{n+1} (\ln(t))^2 dt \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n \ln(n)^2$$

Or

$$\int_1^n (\ln(t))^2 dt \leq u_n \leq \int_2^{n+1} (\ln(t))^2 dt \leq \int_1^{n+1} (\ln(t))^2 dt$$

donc $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n \ln(n)^2$ puis $\frac{1}{u_n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n \ln(n)^2}$.

Procédons à nouveau à une comparaison série/intégrale. La fonction $t \mapsto \frac{1}{t \ln(t)^2}$ est décroissante sur $[2, +\infty[$ donc

$$\sum_{n=3}^{+\infty} \frac{1}{n \ln(n)^2} \leq \int_2^{+\infty} \frac{dt}{t \ln(t)^2} = \left[-\frac{1}{\ln(t)} \right]_2^{+\infty} = \frac{1}{\ln 2}$$

REMARQUE. On peut écrire cette somme infinie puisqu'elle est à termes positifs. De même, on peut écrire cette intégrale impropre puisque son intégrande est positive. L'inégalité a lieu dans $[0, +\infty[$ a priori.

Par conséquent, $\sum \frac{1}{n \ln(n)^2}$ converge. Puisque cette série est à termes positifs et que $\frac{1}{u_n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n \ln(n)^2}$, $\sum \frac{1}{u_n}$ converge également.

Séries alternées

Solution 23

1. Il suffit d'appliquer le critère spécial des séries alternées.

2. On sait que la suite (R_n) converge vers 0 et que R_n est du signe de $\frac{(-1)^{n+1}}{n+1}$ i.e. de $(-1)^{n+1}$. Il suffit donc de montrer que la suite $(|R_n|)$ est décroissante pour conclure à la convergence de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} R_n$ à nouveau grâce au critère spécial des séries alternées. Puisque R_n est du signe de $(-1)^{n+1}$,

$$|R_{n+1}| - |R_n| = (-1)^{n+2} R_{n+1} - (-1)^{n+1} R_n = (-1)^n (R_n + R_{n+1})$$

Or, par changement d'indice,

$$R_n + R_{n+1} = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{k} + \sum_{k=n+2}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{k} = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{k} + \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{k+1} = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{k(k+1)}$$

Ainsi $R_n + R_{n+1}$ est lui-même le reste de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{(-1)^n}{n(n+1)}$, qui vérifie encore le critère des séries alternées. On en déduit que

$R_n + R_{n+1}$ est du signe de $\frac{(-1)^{n+1}}{(n+1)(n+2)}$, c'est-à-dire de $(-1)^{n+1}$. Finalement, $|R_{n+1}| - |R_n| = (-1)^n (R_n + R_{n+1})$ est du signe de $(-1)^n (-1)^{n+1} = -1$, c'est-à-dire négatif. La suite $(|R_n|)$ est donc bien décroissante : on peut appliquer le critère spécial des séries alternées de sorte que la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} R_n$ converge.

Solution 24

1. On a $b_{2n} = \sum_{k=1}^n \sqrt{2k} - \sqrt{2k-1}$. Or

$$\sqrt{2k} - \sqrt{2k-1} \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{2\sqrt{2}\sqrt{k}}$$

Or la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{\sqrt{n}}$ est une série à termes positifs divergente donc

$$b_{2n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{2\sqrt{2}} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{k}}$$

Mais on peut alors classiquement écrire que

$$\sqrt{k} - \sqrt{k-1} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{2\sqrt{k}}$$

donc, en utilisant le même théorème,

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{2\sqrt{k}} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{k=1}^n \sqrt{k} - \sqrt{k-1} = \sqrt{n}$$

On en déduit finalement que $b_{2n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sqrt{n/2}$.

On remarque ensuite que $b_{2n+1} = b_{2n} - \sqrt{2n+1}$. D'une part, $b_{2n} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \sqrt{n/2} + o(\sqrt{n})$ et, d'autre part, $\sqrt{2n+1} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sqrt{2n}$ donc $\sqrt{2n+1} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \sqrt{2n} + o(\sqrt{n})$. Finalement, $b_{2n+1} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} -\sqrt{n/2} + o(\sqrt{n})$ i.e. $b_{2n+1} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} -\sqrt{n/2}$.

Un équivalent de b_n est donc $\frac{(-1)^n}{2} \sqrt{n}$. En effet, les équivalents précédents permettent de montrer qu'en posant $u_n = \frac{b_n}{(-1)^n \sqrt{n}}$,

les suites (u_{2n}) et (u_{2n+1}) convergent toutes deux vers $\frac{1}{2}$. Il en est donc de même de la suite (u_n) , ce qui fournit l'équivalent de (b_n) annoncée.

2. On voit que pour tout $n \in \mathbb{N}^*$:

$$\begin{aligned} b_n + b_{n+1} &= \sum_{k=1}^n (-1)^k \sqrt{k} + \sum_{k=1}^{n+1} (-1)^k \sqrt{k} \\ &= \sum_{k=1}^n (-1)^k \sqrt{k} + \sum_{k=0}^n (-1)^{k+1} \sqrt{k+1} \\ &= -1 - \sum_{k=1}^n (-1)^k (\sqrt{k+1} - \sqrt{k}) \end{aligned}$$

Notons $S_n = \sum_{k=1}^n (-1)^k (\sqrt{k+1} - \sqrt{k})$. S_n est la somme partielle d'une série qui converge en vertu du critère des séries alternées puisque la suite de terme général $\sqrt{k+1} - \sqrt{k} = \frac{1}{\sqrt{k+1} + \sqrt{k}}$ est décroissante. Notons S la somme de cette série. Le premier terme

de la somme définissant S est $1 - \sqrt{2} \leq 0$. On en déduit donc que $1 - \sqrt{2} \leq S \leq 0$. Ainsi $(b_n + b_{n+1})$ converge vers $\ell = -1 - S$ et $\ell = -1 - S \leq \sqrt{2} - 2 < 0$.

REMARQUE. On a donc $b_n + b_{n-1} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \ell + o(1)$. Comme $b_n + b_{n-1} = 2b_n - (-1)^n \sqrt{n}$, on obtient $b_n = \frac{(-1)^n}{2} \sqrt{n} + \frac{\ell}{2} + o(1)$. On en déduit que

$$b_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{(-1)^n}{2} \sqrt{n}$$

On retrouve donc l'équivalent de la première question.

3. Remarquons que

$$\begin{aligned}
\frac{1}{b_n} & \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{1}{\frac{(-1)^n}{2} \sqrt{n} + \frac{\ell}{2} + o(1)} \\
& \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{2(-1)^n}{\sqrt{n}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{(-1)^n \ell}{\sqrt{n}} + o\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right)} \\
& \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{2(-1)^n}{\sqrt{n}} \left(1 + \frac{(-1)^{n+1} \ell}{2\sqrt{n}} + o\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right) \right) \\
& \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{2(-1)^n}{\sqrt{n}} - \frac{2\ell}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right) \\
& = a_n - b_n
\end{aligned}$$

avec $a_n = \frac{2(-1)^n}{\sqrt{n}}$ et $b_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{2\ell}{n}$. D'une part, $\sum a_n$ converge d'après le critère spécial des séries alternées. D'autre part, $\sum b_n$ diverge par comparaison à une série de Riemann. Ainsi $\sum \frac{1}{b_n}$ diverge.

Solution 25

1. Puisque \cos est bornée, $v_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \mathcal{O}\left(\frac{1}{n}\right)$. En particulier, (v_n) converge vers 0. Par conséquent, $(\cos(v_{n-1}))$ converge vers 1 puis $v_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n}$. Puisque la série harmonique est une série à termes positifs divergente, la série $\sum v_n$ diverge également.
2. Il suffit de constater que cette série vérifie le critère des séries alternées.
3. Il nous faut un développement asymptotique de (v_n) . On remarque que $v_n - \frac{1}{n} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \mathcal{O}\left(\frac{v_{n-1}^2}{n}\right)$. Or $v_{n-1} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n-1} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n}$ donc $v_n - \frac{1}{n} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^3}\right)$. Par conséquent, $(-1)^n v_n = \frac{(-1)^n}{n} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^3}\right)$. Puisque la série $\sum \frac{(-1)^n}{n}$ converge et que la série $\sum \frac{1}{n^3}$ est une série à termes positifs convergente, la série $\sum (-1)^n v_n$ converge également.

Solution 26

Pour $n \in \mathbb{N}^*$,

$$\ln\left(\frac{n}{n+1}\right) = -\ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} -\frac{1}{n} + \frac{1}{2n^2} - \frac{1}{3n^3} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^4}\right)$$

Par conséquent

$$\begin{aligned}
u_n & \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \cos\left(-n\pi + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3n} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right)\right) \\
& \underset{n \rightarrow +\infty}{=} (-1)^n \sin\left(-\frac{\pi}{3n} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right)\right) \\
& = \frac{(-1)^{n+1}\pi}{3n} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^2}\right)
\end{aligned}$$

Or la série $\sum \frac{(-1)^{n+1}\pi}{3n}$ converge en vertu du critère spécial des séries alternées et la série de Riemann $\sum \frac{1}{n^2}$ converge donc $\sum u_n$ converge en tant que somme de deux séries convergentes.

Solution 27

Remarquons que

$$\begin{aligned}
 \sin(\pi\sqrt{n^2+1}) &= \sin\left(n\pi\left(1+\frac{1}{n^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \\
 &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} \sin\left(n\pi\left(1+\frac{1}{2n^2}+\mathcal{O}\left(\frac{1}{n^4}\right)\right)\right) \\
 &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} \sin\left(n\pi+\frac{\pi}{2n}+\mathcal{O}\left(\frac{1}{n^3}\right)\right) \\
 &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} (-1)^n \sin\left(\frac{\pi}{2n}+\mathcal{O}\left(\frac{1}{n^3}\right)\right) \\
 &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{(-1)^n\pi}{2n}+\mathcal{O}\left(\frac{1}{n^3}\right) \\
 &= \frac{(-1)^n\pi}{2n}+u_n
 \end{aligned}$$

avec $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^3}\right)$. La série $\sum \frac{(-1)^n\pi}{2n}$ converge en vertu du critère spécial des séries alternées et la série $\sum u_n$ converge par comparaison à une série de Riemann. La série $\sum_{n \in \mathbb{N}} \sin(\pi\sqrt{n^2+1})$ converge donc comme somme de deux séries convergentes.

Solution 28

$$\begin{aligned}
 \frac{(-1)^n}{n+(-1)^n} &= \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} \cdot \frac{1}{1+\frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}} \\
 &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} \left(1 - \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n}\right)\right) \\
 &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} - \frac{1}{n} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^{\frac{3}{2}}}\right) \\
 &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} - \frac{1}{n} + u_n
 \end{aligned}$$

avec $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^{\frac{3}{2}}}\right)$. La série $\sum \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}$ converge en vertu du critère spécial des séries alternées, la série $\sum u_n$ converge par comparaison à une série de Riemann mais la série $\sum \frac{1}{n}$ diverge. Par conséquent, la série $\sum \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}+(-1)^n}$ diverge.

REMARQUE. Pourtant, $\frac{(-1)^n}{\sqrt{n}+(-1)^n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}$. La condition de positivité est donc nécessaire pour le critère de convergence par équivalence.

Solution 29

1. Puisque (a_n) converge vers 0,

$$\ln(1+a_n) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} a_n - \frac{a_n^2}{2} + \mathcal{O}(a_n)^3 \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} - \frac{1}{2n} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{n^{\frac{3}{2}}}\right)$$

La série $\sum \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}$ vérifie le critère spécial des séries alternées donc converge. La série $\sum \frac{1}{n^3}$ converge. Enfin la série harmonique $\sum \frac{1}{n}$ diverge vers $+\infty$. On en déduit que la série $\sum \ln(1+a_n)$ diverge vers $-\infty$.

2. Par propriété du logarithme

$$\ln \left(\prod_{k=2}^n (1 + a_k) \right) = \sum_{k=2}^n \ln(1 + a_k) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$$

Par passage à l'exponentielle,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\prod_{k=2}^n (1 + a_k) \right) = 0$$

Solution 30

1. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. La fonction $f_n : x \mapsto x^n + x\sqrt{n} - 1$ est continue et strictement croissante sur $[0, 1]$. De plus, $f_n(0) = -1 > 0$ et $f_n(1) = \sqrt{n} > 0$ donc f_n s'annule une unique fois sur $[0, 1]$. L'équation $x^n + x\sqrt{n} - 1 = 0$ admet donc une unique solution u_n dans $[0, 1]$.

2. Remarquons que $u_n = \frac{1 - u_n^n}{\sqrt{n}}$. Comme (u_n) est à valeurs dans $[0, 1]$, $0 \leq u_n \leq \frac{1}{\sqrt{n}}$ donc (u_n) converge vers 0 d'après le théorème des gendarmes.

3. Comme (u_n) converge vers 0, (u_n^n) également. Ainsi

$$u_n = \frac{1}{\sqrt{n}} - \frac{u_n^n}{\sqrt{n}} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{1}{\sqrt{n}} + o\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{\sqrt{n}}$$

Par comparaison à une série de Riemann, $\sum u_n$ diverge.

4. Comme (u_n) converge vers 0, $0 \leq u_n \leq 1/2$ à partir d'un certain rang de sorte que $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \mathcal{O}(1/2^n)$. Ainsi

$$\begin{aligned} (-1)^n u_n &= \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} - \frac{(-1)^n u_n^n}{\sqrt{n}} \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{2^n \sqrt{n}}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{2^n}\right) \end{aligned}$$

La série $\sum \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}$ converge d'après le critère des séries alternées et la série géométrique à termes positifs $\sum 1/2^n$ converge également.

On en déduit la convergence de la série $\sum (-1)^n u_n$.

Sommation de relations de comparaison

Solution 31

1. Puisque $\ell \neq 0$, on peut affirmer que $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n\ell$. Par ailleurs, la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \ell$ est une série divergente à termes de signe constant, donc on peut affirmer que

$$\sum_{k=1}^n u_k \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{k=1}^n \ell = n\ell$$

Ceci signifie que $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_k = \ell$.

2. A nouveau, puisque $\ell \neq 0$, on peut affirmer que $nu_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n\ell$. La série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} n\ell$ est encore une série divergente à termes de signe constant donc

$$\sum_{k=1}^n ku_k \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{k=1}^n n\ell = \frac{n(n+1)}{2} \cdot \ell \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{n^2 \ell}{2}$$

Autrement dit, $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n ku_k = \frac{1}{2}$.

Solution 32

1. Avec les notations de l'énoncé, $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n S_n = 1$. La série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} a_n^2$ est à termes positifs donc la suite (S_n) converge ou diverge vers $+\infty$.

Supposons qu'elle converge. Alors elle converge vers une limite ℓ strictement positive ($S_n \geq S_1 = a_1^2 > 0$). Alors (a_n) converge vers $1/\ell$. La série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} a_n^2$ divergerait alors grossièrement, ce qui contredirait la convergence de la suite (S_n) .

Par conséquent, la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} a_n^2$ diverge et la suite (S_n) converge vers $+\infty$. Puisque $a_n = \frac{a_n S_n}{S_n}$, (a_n) converge vers 0.

2. La suite (S_n) est clairement croissante. Soit $n \in \mathbb{N}^*$ et $t \in [S_{n-1}, S_n]$. Alors, par croissance de $t \mapsto t^2$ sur \mathbb{R}_+ ,

$$(S_n - S_{n-1})S_{n-1}^2 \leq \int_{S_{n-1}}^{S_n} t^2 dt \leq (S_n - S_{n-1})S_n^2$$

ou encore, en posant $u_n = \int_{S_{n-1}}^{S_n} t^2 dt$,

$$a_n^2 S_{n-1}^2 \leq u_n \leq a_n^2 S_n^2$$

On rappelle que $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n S_n = 1$ donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n^2 S_n^2 = 1$. De plus,

$$a_n^2 S_{n-1}^2 = a_n^2 (S_n - a_n)^2 = a_n^2 S_n^2 - 2S_n a_n^3 + a_n^4$$

Or $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n S_n = 1$ et $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 0$ donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n^2 S_{n-1}^2 = 1$. D'après le théorème des gendarmes, (u_n) converge vers 1.

3. Remarquons que

$$\sum_{k=1}^n u_k = \int_0^{S_n} t^2 dt = \frac{S_n^3}{3}$$

Par sommation de relation de comparaison pour les séries divergentes à termes positifs, $\sum_{k=1}^n u_k \sim n$. On en déduit que $S_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sqrt[3]{3n}$

et, comme $a_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{S_n}$, $a_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{\sqrt[3]{3n}}$.

Solution 33

1. Par croissance de la fonction \sin l'intervalle $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ est stable par \sin . Ainsi la suite (u_n) est à valeurs dans cet intervalle. De plus, une étude de fonction montre que $x \mapsto \sin(x) - x$ est négative sur $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$. On en déduit que (u_n) est décroissante. Comme elle est minorée, elle converge. Enfin, \sin est continue donc (u_n) converge vers un point fixe de \sin . L'étude de $x \mapsto \sin(x) - x$ montre que 0 est l'unique point fixe de \sin . Ainsi (u_n) converge vers 0.

2. Remarquons que

$$\begin{aligned} \sin(x)^\alpha - x^\alpha &= \left(x - \frac{x^3}{6}\right)^\alpha - x^\alpha \\ &= x^\alpha \left(1 - \frac{x^2}{6} + o(x^2)\right)^\alpha - x^\alpha \\ &= x^\alpha \left(1 - \frac{\alpha x^2}{6} + o(x^2)\right) - x^\alpha \\ &= -\frac{\alpha x^{\alpha+2}}{6} + o(x^{\alpha+2}) \end{aligned}$$

Notamment, en prenant $\alpha = -2$,

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{\sin^2 x} - \frac{1}{x^2} = \frac{1}{3}$$

Comme (u_n) converge vers 0,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{u_{n+1}^2} - \frac{1}{u_n^2} = \frac{1}{3}$$

3. La série $\sum \frac{1}{3}$ est une série à termes positifs divergente donc

$$\sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{u_{k+1}^2} - \frac{1}{u_0^2} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{3}$$

autrement dit

$$\frac{1}{u_n^2} - \frac{1}{u_0^2} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{n}{3}$$

Comme $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n}{3} = +\infty$,

$$\frac{1}{u_n^2} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{n}{3}$$

ou encore

$$u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sqrt{\frac{3}{n}}$$

car (u_n) est positive d'après la première question.

Solution 34

1. Supposons que $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \ell$. Puisque $u_n = \ell + o(1)$ et que la série $\sum 1$ est une série à termes positifs divergente,

$$\sum_{k=0}^{n-1} u_k \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{k=0}^{n-1} \ell + o\left(\sum_{k=0}^{n-1} 1\right)$$

ou encore

$$\sum_{k=0}^{n-1} u_k \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n\ell + o(n)$$

et enfin

$$\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} u_k \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ell + o(1)$$

Ainsi

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} u_k = \ell$$

2. a. $f(x) - x \underset{x \rightarrow 0^+}{\sim} -\lambda x^\alpha$ donc $x \mapsto f(x) - x$ est de même signe que $x \mapsto -\lambda x^\alpha$ au voisinage de 0^+ . Ainsi il existe $\varepsilon > 0$ tel que $x \mapsto f(x) - x$ est négative sur $[0, \varepsilon]$ et ne s'annule qu'en 0.

b. Par hypothèse, f est positive sur $[0, \varepsilon]$. Comme 0 est le seul point fixe de f sur $[0, \varepsilon]$, $x \mapsto f(x) - x$ est de signe constant sur cet intervalle puisqu'elle y est continue. Or $f(x) - x \underset{x \rightarrow 0^+}{\sim} -\lambda x^\alpha$ donc $x \mapsto f(x) - x$ est négative sur $[0, \varepsilon]$. On en déduit que

$$\forall x \in [0, \varepsilon], 0 \leq f(x) \leq x \leq \varepsilon$$

On en déduit alors aisément que (u_n) est à valeurs dans $[0, \varepsilon]$ et décroissante. Elle converge donc d'après le théorème de convergence monotone et continuité de f , (u_n) converge vers l'unique point fixe de f sur $[0, \varepsilon]$, à savoir 0.

c. Tout d'abord, $\alpha > 1$ donc $x^{\alpha-1} \xrightarrow{x \rightarrow 0} 0$. On peut alors utiliser le développement limité usuel de $(1+u)^\beta$ lorsque u tend vers 0 :

$$f(x)^{1-\alpha} \underset{x \rightarrow 0}{=} x^{1-\alpha} (1 - \lambda x^{\alpha-1} + o(x^{\alpha-1}))^{1-\alpha} \underset{x \rightarrow 0}{=} x^{1-\alpha} (1 + (\alpha-1)\lambda x^{\alpha-1} + o(x^{\alpha-1})) \underset{x \rightarrow 0}{=} x^{1-\alpha} 1 + (\alpha-1)\lambda + o(1)$$

d. Comme (u_n) converge vers 0

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} f(u_n)^{1-\alpha} - u_n^{1-\alpha} = (\alpha - 1)\lambda$$

ou encore

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_{n+1}^{1-\alpha} - u_n^{1-\alpha} = (\alpha - 1)\lambda$$

D'après la première question

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} u_{k+1}^{1-\alpha} - u_k^\alpha = (\alpha - 1)\lambda$$

ou encore

$$u_n^{1-\alpha} - u_0^{1-\alpha} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} (\alpha - 1)\lambda n$$

Or $\lim_{n \rightarrow +\infty} (\alpha - 1)\lambda n = +\infty$ de sorte que

$$u_n^{1-\alpha} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} (\alpha - 1)\lambda n$$

et enfin

$$u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} ((\alpha - 1)\lambda n)^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

e. Dans le cas de la fonction $x \mapsto \sin x$, on a $\lambda = \frac{1}{6}$, $\alpha = 3$ donc

$$u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sqrt{\frac{3}{n}}$$

Dans le cas de la fonction $x \mapsto \ln(1 + x)$, on a $\lambda = \frac{1}{2}$, $\alpha = 2$ donc

$$u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{2}{n}$$

Solution 35

1. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, $u_{n+1} - u_n = -u_n^2 \leq 0$ donc (u_n) est décroissante. De plus, l'intervalle $]0, 1[$ est stable par $f : x \mapsto x - x^2 = x(1 - x)$ donc (u_n) est à valeurs dans $]0, 1[$. Notamment, (u_n) est minorée. Elle converge donc vers l'unique point fixe de la fonction continue f , à savoir 0.

2. Remarquons que $\frac{u_{n+1}}{u_n} = 1 - u_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. Ainsi $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = 1$ puis $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{u_n}{u_{n+1}} = 1$. Comme la série de terme général 1 est grossièrement divergente,

$$\sum_{k=0}^{n-1} \frac{u_k}{u_{k+1}} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{k=0}^{n-1} 1 = n$$

D'après l'indication de l'énoncé, on a donc également,

$$\sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{u_{k+1}} - \frac{1}{u_k} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n$$

Par télescopage,

$$\frac{1}{u_n} - \frac{1}{u_0} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n$$

Puisque $\lim_{n \rightarrow +\infty} n = +\infty$, on en déduit que $\frac{1}{u_n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n$ puis $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n}$.

Solution 36

Remarquons que S_n est la somme partielle de rang n de la série $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^2 + \sqrt{n}}$. Puisque $\frac{1}{n^2 + \sqrt{n}} \sim \frac{1}{n^2}$ et que $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^2}$ est une série à termes positifs convergente, la série $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^2 + \sqrt{n}}$ converge vers un réel C . En notant R_n le reste de rang n de la série $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^2 + \sqrt{n}}$, on a $S_n = C - R_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$. Puisque $\frac{1}{k^2 + \sqrt{k}} \sim \frac{1}{k^2}$, $R_n \sim \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2}$. Une comparaison à une intégrale montre que $R_n \sim \frac{1}{n}$ d'où le résultat annoncé.

Solution 37

1. On propose deux méthodes.

Première méthode. Comme $x \mapsto \frac{1}{\sqrt{x}}$ est décroissante sur \mathbb{R}_+^* et à valeurs dans \mathbb{R}_+^* , la série $\sum \int_{n-1}^n \frac{dt}{\sqrt{t}} - \frac{1}{\sqrt{n}}$ converge. Or

$$\sum_{k=2}^n \int_{k-1}^k \frac{dt}{\sqrt{t}} - \frac{1}{\sqrt{k}} = \int_1^n \frac{dt}{\sqrt{t}} - S_n + 1 = 2\sqrt{n} - S_n - 1$$

donc la suite $(S_n - 2\sqrt{n})$ converge. En notant C sa limite, on a le résultat voulu.

Deuxième méthode. On remarque que

$$\sqrt{n} - \sqrt{n-1} = \sqrt{n} \left(1 - \left(1 - \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \sqrt{n} \left(\frac{1}{2n} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) \right)$$

ou encore

$$\frac{1}{\sqrt{n}} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} 2\sqrt{n} - 2\sqrt{n-1} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)$$

Ainsi la série $\sum \frac{1}{\sqrt{n}} - 2\sqrt{n} + 2\sqrt{n-1}$ converge ce qui permet également de conclure.

2. D'après la question précédente

$$C = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{n}} - 2\sqrt{n} + 2\sqrt{n-1}$$

donc

$$S_n - 2\sqrt{n} - C = - \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{k}} - 2\sqrt{k} + 2\sqrt{k-1} = \sum_{k=n+1}^{+\infty} 2(\sqrt{k} - \sqrt{k-1}) - \frac{1}{\sqrt{k}}$$

Or

$$\sqrt{n} - \sqrt{n-1} = \sqrt{n} \left(1 - \left(1 - \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \sqrt{n} \left(\frac{1}{2n} + \frac{1}{8n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{1}{2\sqrt{n}} + \frac{1}{8n\sqrt{n}} + o\left(\frac{1}{n\sqrt{n}}\right)$$

donc

$$2(\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) - \frac{1}{\sqrt{n}} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{4n\sqrt{n}}$$

Or

$$\frac{1}{\sqrt{n-1}} - \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\left(1 - \frac{1}{n} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{2n\sqrt{n}}$$

donc

$$2(\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) - \frac{1}{\sqrt{n}} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{n-1}} - \frac{1}{\sqrt{n}} \right)$$

Par sommation de relation d'équivalence pour le reste de séries convergentes à termes positifs,

$$S_n - 2\sqrt{n} - C \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{k-1}} - \frac{1}{\sqrt{k}} \right) = \frac{1}{2\sqrt{n}}$$

Ainsi

$$S_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} 2\sqrt{n} + C + \frac{1}{2\sqrt{n}} + o\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right)$$

Produit de Cauchy

Solution 38

1. Posons $S_n = \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k-1}}{k} \binom{n}{k}$ pour $n \in \mathbb{N}^*$. Alors

$$\begin{aligned} S_{n+1} - S_n &= \sum_{k=1}^{n+1} \frac{(-1)^{k-1}}{k} \binom{n+1}{k} - \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k-1}}{k} \binom{n}{k} \\ &= \frac{(-1)^n}{n+1} + \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k-1}}{k} \left(\binom{n+1}{k} - \binom{n}{k} \right) \\ &= \frac{(-1)^n}{n+1} - \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^k}{k} \binom{n}{k-1} \\ &= \frac{(-1)^n}{n+1} - \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^k}{n+1} \binom{n+1}{k} \\ &= \frac{(-1)^n}{n+1} - \frac{1}{n+1} \left[\left(\sum_{k=0}^{n+1} (-1)^k \binom{n+1}{k} \right) - 1 - (-1)^{n+1} \right] \\ &= \frac{(-1)^n}{n+1} - \frac{1}{n+1} [(1-1)^{n+1} - 1 - (-1)^{n+1}] \\ &= \frac{1}{n+1} \end{aligned}$$

Puisque $S_1 = 1$, on en déduit alors que pour tout $n \in \mathbb{N}^*$,

$$S_n = S_1 + \sum_{k=2}^n S_k - S_{k-1} = 1 + \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} = H_n$$

2. On remarque que $e = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!}$. Puisque les séries $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{1}{n!}$ et $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{(-1)^{n-1}}{n \cdot n!}$ sont absolument convergentes, on peut affirmer via le théorème sur les produits de Cauchy que

Solution 39

On sait que les séries géométriques $\sum_{n \in \mathbb{N}} a^n$ et $\sum_{n \in \mathbb{N}} b^n$ convergent absolument et ont pour sommes respectives $\frac{1}{1-a}$ et $\frac{1}{1-b}$. On en déduit par produit de Cauchy que

$$\sum_{n=0}^{+\infty} c_n = \frac{1}{1-a} \cdot \frac{1}{1-b}$$

où

$$c_n = \sum_{k=0}^n a^k b^{n-k} = \frac{a^{n+1} - b^{n+1}}{a - b}$$

Familles sommables

Solution 40

Considérons $I_n = \left\{ \frac{k+1}{k}, k \in \llbracket 1, n \rrbracket \right\}$ pour $n \in \mathbb{N}^*$. Alors $I_n \subset \mathbb{Q} \cap [1, +\infty[$ et

$$\sum_{x \in I_n} \frac{1}{x^2} = \sum_{k=1}^n \frac{k^2}{(k+1)^2} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$$

car la série à termes positifs $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{n^2}{(n+1)^2}$ diverge grossièrement vers $+\infty$. La famille $\left(\frac{1}{x^2} \right)_{x \in \mathbb{Q} \cap [1, +\infty[}$ n'est donc pas sommable.

Solution 41

1. Soit un entier $n \geq 2$. Tout d'abord,

$$nv_n = (n-1)v_{n-1} + u_n$$

donc

$$v_{n-1} = \frac{n}{n-1}v_n - \frac{1}{n-1}u_n$$

Par conséquent,

$$(n+1)v_n^2 - (n-1)v_{n-1}^2 = 2u_nv_n - \frac{1}{n}(u_n^2 + v_n^2) \leq 2u_nv_n$$

2. a. Posons $S_n = \sum_{k=1}^n u_k^2$ et $T_n = \sum_{k=1}^n v_k^2$. En convenant que $v_0 = 0$, l'inégalité de la question précédente est encore valide pour $n = 1$. On en déduit que

$$\sum_{k=1}^n (k+1)v_k^2 - (k-1)v_{k-1}^2 \leq 2 \sum_{k=1}^n u_k v_k$$

ou encore que

$$\sum_{k=1}^n v_k^2 + \sum_{k=1}^n kv_k^2 - (k-1)v_{k-1}^2 \leq 2 \sum_{k=1}^n u_k v_k$$

Par télescopage

$$\sum_{k=1}^n kv_k^2 - (k-1)v_{k-1}^2 = nv_n^2$$

et par inégalité de Cauchy-Schwarz,

$$\sum_{k=1}^n u_k v_k \leq \left(\sum_{k=1}^n u_k^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{k=1}^n v_k^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Finalement,

$$\sum_{k=1}^n v_k^2 + nv_n^2 \leq 2 \left(\sum_{k=1}^n u_k^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{k=1}^n v_k^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

ou encore

$$T_n + nv_n^2 \leq 2\sqrt{S_n}\sqrt{T_n}$$

A fortiori

$$T_n \leq 2\sqrt{S_n}\sqrt{T_n}$$

puis

$$T_n \leq 4S_n \leq 4 \sum_{n=1}^{+\infty} u_n^2$$

La suite (T_n) est croissante et majorée donc elle converge i.e. la série $\sum v_n^2$ converge. En passant à la limite dans ce qui précède,

$$\sum_{n=1}^{+\infty} v_n^2 \leq 4 \sum_{n=1}^{+\infty} u_n^2$$

b. On va d'abord montrer que la famille $\left(\frac{u_m u_n}{m+n} \right)_{1 \leq m \leq n}$ est sommable. Pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\sum_{m=1}^{n-1} \frac{|u_m u_n|}{m+n} = |u_n| \sum_{m=1}^{n-1} \frac{|u_m|}{m+n} \leq |u_n| \sum_{m=1}^n \frac{|u_m|}{n} = |u_n v_n|$$

Puisque $|u_n v_n| \leq \frac{1}{2}(u_n^2 + v_n^2)$,

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{m=1}^{n-1} \frac{|u_m u_n|}{m+n} < \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{+\infty} u_n^2 + v_n^2 < +\infty$$

Par symétrie, on a également

$$\sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{m-1} \frac{|u_m u_n|}{m+n} < +\infty$$

Enfin la série $\sum \frac{u_p^2}{2p}$ converge puisque $\frac{u_p^2}{2p} \leq u_p^2$.

Puisque

$$(\mathbb{N}^*)^2 = \{(m, n) \in (\mathbb{N}^*)^2, 1 \leq m < n\} \sqcup \{(m, n) \in (\mathbb{N}^*)^2, 1 \leq n < m\} \sqcup \{(p, p), p \in \mathbb{N}^*\}$$

Le théorème de sommation par paquets permet d'affirmer que

$$\sum_{(m,n) \in (\mathbb{N}^*)^2} \frac{|u_m u_n|}{m+n} = \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{m=1}^{n-1} \frac{|u_m u_n|}{m+n} + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{m-1} \frac{|u_m u_n|}{m+n} + \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{u_p^2}{2p} < +\infty$$

La famille $\left(\frac{u_m u_n}{m+n}\right)_{(m,n) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ est donc sommable.

Solution 42

1. Notons J_n l'intégrale à calculer. Tout d'abord, $J_0 = 2\pi^2$ et, si $n \neq 0$, on intègre par parties

$$\int_0^{2\pi} t e^{-int} dt = -\frac{1}{in} [t e^{-int}]_0^{2\pi} + \frac{1}{in} \int_0^{2\pi} e^{-int} dt = \frac{2i\pi}{n}$$

2. D'après la question précédente,

$$\begin{aligned} \sum_{(n,m) \in \mathbb{I}^2} \frac{a_n b_m}{n+m} &= \frac{1}{2i\pi} \sum_{(n,m) \in \mathbb{I}^2} a_n b_m \int_0^{2\pi} t e^{-i(n+m)t} dt \\ &= \frac{1}{2i\pi} \int_0^{2\pi} t \sum_{(n,m) \in \mathbb{I}^2} a_n b_m e^{-int} e^{-imt} dt \\ &= \frac{1}{2i\pi} \int_0^{2\pi} t \left(\sum_{n \in \mathbb{I}} a_n e^{-int} \right) \left(\sum_{m \in \mathbb{I}} b_m e^{-imt} \right) dt \end{aligned}$$

Posons $f(t) = \sum_{n \in \mathbb{I}} a_n e^{-int}$ et $g(t) = \sum_{m \in \mathbb{I}} b_m e^{-imt}$. Par inégalité, triangulaire,

$$\sum_{(n,m) \in \mathbb{I}^2} \frac{a_n b_m}{n+m} = \left| \sum_{(n,m) \in \mathbb{I}^2} \frac{a_n b_m}{n+m} \right| \leq \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\sqrt{t} |f(t)|) (\sqrt{t} |g(t)|) dt$$

puis, par inégalité de Cauchy-Schwarz,

$$\sum_{(n,m) \in \mathbb{I}^2} \frac{a_n b_m}{n+m} \leq \frac{1}{2\pi} \sqrt{\int_0^{2\pi} t |f(t)|^2 dt} \sqrt{\int_0^{2\pi} t |g(t)|^2 dt}$$

Calculons ensuite

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} t |f(t)|^2 dt &= \int_0^{2\pi} t f(t) \overline{f(t)} dt \\ &= \int_0^{2\pi} t \left(\sum_{n \in \mathbb{I}} a_n e^{-int} \right) \left(\sum_{m \in \mathbb{I}} a_m e^{imt} \right) dt \\ &= \sum_{(n,m) \in \mathbb{I}^2} a_n a_m \int_0^{2\pi} t e^{-i(n-m)t} dt \\ &= \sum_{(n,m) \in \mathbb{I}^2} a_n a_m J_{n-m} \end{aligned}$$

Or pour $n \neq m$, J_{n-m} est imaginaire pur et l'intégrale qu'on calcule est réelle de sorte que

$$\int_0^{2\pi} t |f(t)|^2 dt = \sum_{n \in I} a_n^2 J_0 = 2\pi^2 \sum_{n \in I} a_n^2$$

De la même manière,

$$\int_0^{2\pi} t |g(t)|^2 dt = 2\pi^2 \sum_{n \in I} b_n^2$$

On en déduit le résultat demandé.

3. Soit K une partie finie de $(\mathbb{N}^*)^2$. Il existe une partie finie I de \mathbb{N}^* telle que $K \subset I^2$. Alors

$$\sum_{(n,m) \in K} \frac{|a_n b_m|}{n+m} \leq \sum_{(n,m) \in (\mathbb{N}^*)^2} \frac{|a_n b_m|}{n+m} \leq \pi \sqrt{\sum_{n \in I} a_n^2 \sum_{n \in I} b_n^2} \leq \pi \sqrt{\sum_{n \in \mathbb{N}^*} a_n^2 \sum_{n \in \mathbb{N}^*} b_n^2}$$

Ceci étant valide pour toute partie finie K de $(\mathbb{N}^*)^2$,

$$\sum_{(n,m) \in (\mathbb{N}^*)^2} \frac{|a_n b_m|}{n+m} \leq \pi \sqrt{\sum_{n \in \mathbb{N}^*} a_n^2 \sum_{n \in \mathbb{N}^*} b_n^2} < +\infty$$

La famille $\left(\frac{a_n b_m}{n+m} \right)_{(n,m) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ est donc sommable et

$$\sum_{(n,m) \in (\mathbb{N}^*)^2} \frac{a_n b_m}{n+m} \leq \sum_{(n,m) \in K} \frac{|a_n b_m|}{n+m} \leq \pi \sqrt{\sum_{n \in \mathbb{N}^*} a_n^2 \sum_{n \in \mathbb{N}^*} b_n^2}$$

Solution 43

Comme la famille est une famille de réels positifs, on peut appliquer le théorème de Fubini positif :

$$\sum_{(m,n) \in (\mathbb{N}^*)^2} = \sum_{n=1}^{+\infty} S_m$$

avec $S_m = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{mn(m+n+2)}$. A l'aide d'une décomposition en éléments simples :

$$\begin{aligned} S_m &= \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{mn(m+n+2)} \\ &= \frac{1}{m(m+2)} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(m+n+2) - n}{n(m+n+2)} \\ &= \frac{1}{m(m+2)} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n} - \frac{1}{m+n+2} \\ &= \frac{1}{m(m+2)} \sum_{n=1}^{m+2} \frac{1}{n} \end{aligned}$$

Notons alors $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$ de sorte que $S_m = \frac{1}{m(m+2)} H_{m+2}$. Alors

$$\begin{aligned}
 \sum_{m=1}^{+\infty} S_m &= \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{H_{m+2}}{m(m+2)} \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{+\infty} H_{m+2} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m+2} \right) \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{H_m}{m} - \frac{H_{m+2}}{m+2} + \frac{1}{m(m+1)} + \frac{1}{m(m+2)} \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{H_m}{m} - \frac{H_{m+2}}{m+2} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{1}{m(m+1)} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{1}{m(m+2)} \\
 &= \frac{1}{2} \left(H_1 + \frac{H_2}{2} \right) + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{1}{m} - \frac{1}{m+1} + \frac{1}{4} \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{1}{m} - \frac{1}{m+2} \\
 &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{3}{4} \right) + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(1 + \frac{1}{2} \right) \\
 &= \frac{7}{4}
 \end{aligned}$$

La famille $\left(\frac{1}{mn(m+n+2)} \right)_{(m,n) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ est donc sommable et sa somme vaut $\frac{7}{4}$.

Solution 44

Comme la famille est à termes positifs, on peut appliquer le théorème de Fubini positif :

$$\begin{aligned}
 \sum_{(p,q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}^*} \frac{1}{(p+q^2)(p+q^2+1)} &= \sum_{q=1}^{+\infty} \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{1}{(p+q^2)(p+q^2+1)} \\
 &= \sum_{q=1}^{+\infty} \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{1}{p+q^2} - \frac{1}{p+q^2+1} \\
 &= \sum_{q=1}^{+\infty} \frac{1}{q^2} \quad \text{par télescopage} \\
 &= \frac{\pi^2}{6}
 \end{aligned}$$

La famille $\left(\frac{1}{(p+q^2)(p+q^2+1)} \right)_{(p,q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}^*}$ est donc sommable et a pour somme $\frac{\pi^2}{6}$.

Solution 45

En utilisant la partition suivante

$$\{(p, k) \in \mathbb{N}^2, q < p\} = \bigsqcup_{p \in \mathbb{N}^*} \{p\} \times \llbracket 0, p-1 \rrbracket$$

le théorème de sommation par paquets montre que

$$\sum_{0 \leq q < p} \frac{1}{p^\alpha} = \sum_{p=1}^{+\infty} \sum_{q=0}^{p-1} \frac{1}{p^\alpha} = \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p^{\alpha-1}}$$

En considérant la partition suivante

$$\{(p, q) \in \mathbb{N}^2, q < p\} = \bigsqcup_{q \in \mathbb{N}} \llbracket q+1, +\infty \rrbracket \times \{q\}$$

ce même théorème permet d'affirmer que

$$\sum_{0 \leq q < p} \frac{1}{p^\alpha} = \sum_{q=0}^{+\infty} \sum_{p=q+1}^{+\infty} \frac{1}{p^\alpha}$$

On en déduit l'égalité demandée. Cette somme est finie dès lors que $\sum_{p \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{p^{\alpha-1}}$ converge i.e. $\alpha > 2$.

Solution 46

D'après le théorème de Fubini positif,

$$\sum_{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2} \frac{1}{p^2 + q^2} = \sum_{p=1}^{+\infty} S_p$$

avec $S_p = \sum_{q=1}^{+\infty} \frac{1}{p^2 + q^2}$. Par comparaison série/intégrale

$$S_p + \frac{1}{p^2} = \sum_{q=0}^{+\infty} \frac{1}{p^2 + q^2} \geq \int_0^{+\infty} \frac{1}{t^2 + q^2} dt = \frac{1}{q} [\arctan(t/q)]_0^{+\infty} = \frac{\pi}{2q}$$

ou encore

$$S_p \geq \frac{\pi}{2p} - \frac{1}{p^2}$$

Puisque $\frac{\pi}{2p} - \frac{1}{p^2} \sim \frac{\pi}{2p}$, la série $\sum_{p \in \mathbb{N}^*} \frac{\pi}{2p} - \frac{1}{p^2}$ diverge et $\sum_{p \in \mathbb{N}^*} S_p = +\infty$. On en déduit que famille $\left(\frac{1}{p^2 + q^2}\right)_{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ n'est pas sommable.

REMARQUE. On peut aussi remarquer que $\frac{1}{p^2 + q^2} \geq \frac{1}{(p+q)^2} \geq 0$. On remarque que $(\mathbb{N}^*)^2 = \bigsqcup_{n \geq 2} I_n$ avec $I_n = \{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2, p+q=n\}$ et que

$$\sum_{(p,q) \in I_n} \frac{1}{(p+q)^2} = \frac{n-1}{n^2}$$

Comme la série $\sum_{n \geq 2} \frac{n-1}{n^2}$ diverge, la famille $\left(\frac{1}{(p+q)^2}\right)_{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ n'est pas sommable d'après le théorème de sommation par paquets. La famille $\left(\frac{1}{p^2 + q^2}\right)_{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ n'est donc pas sommable non plus.

Solution 47

D'après le théorème de Fubini positif,

$$\sum_{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2} \frac{1}{p^2 + q^3} = \sum_{q=1}^{+\infty} S_q$$

avec $S_q = \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p^2 + q^3}$. Par une comparaison série/intégrale,

$$S_q \leq \int_0^{+\infty} \frac{1}{t^2 + q^3} dt = \frac{1}{q^{\frac{3}{2}}} \left[\arctan\left(\frac{t}{q^{\frac{3}{2}}}\right) \right]_0^{+\infty} = \frac{\pi}{2q^{\frac{3}{2}}}$$

La série $\sum_{q \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{q^{\frac{3}{2}}}$ converge donc la série $\sum_{q \in \mathbb{N}^*} S_q$ également. La famille $\left(\frac{1}{p^2 + q^3}\right)_{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ donc sommable.

Solution 48

Comme il s'agit d'une famille de réels positifs, on peut directement appliquer le théorème de Fubini positif.

$$\sum_{(m,n) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}} \frac{1}{(m+n)(m+n+1)} = \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{m+n} - \frac{1}{m+n+1} = \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{1}{m} = +\infty$$

en utilisant un télescope. La famille $\left(\frac{1}{(m+n)(m+n+1)}\right)_{(m,n) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}}$ n'est donc pas sommable.

Solution 49

Soit $z \in \mathbb{C}$ tel que $|z| < 1$. Remarquons que pour tout $n \in \mathbb{N}^*$,

$$\frac{z^n}{1 - z^n} = z^n \sum_{p=0}^{+\infty} z^{np} = \sum_{p=1}^{+\infty} z^{np}$$

On travaille maintenant sous réserve de sommabilité. D'après le théorème de Fubini :

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{z^n}{1 - z^n} = \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{p=1}^{+\infty} z^{np} = \sum_{(n,p) \in (\mathbb{N}^*)^2} z^{np}$$

Posons maintenant $I_k = \{(n, p) \in (\mathbb{N}^*)^2, np = k\}$ pour $k \in \mathbb{N}^*$. Les ensembles I_k sont clairement disjoints et pour tout $(n, p) \in (\mathbb{N}^*)^2$, $(n, p) \in I_{np}$. Autrement dit, $(\mathbb{N}^*)^2 = \bigsqcup_{k \in \mathbb{N}^*} I_k$. Le théorème de sommation par paquets permet d'affirmer que

$$\sum_{(n,p) \in (\mathbb{N}^*)^2} z^{np} = \sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{(n,p) \in I_k} z^{np} = \sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{(n,p) \in I_k} z^k = \sum_{k=1}^{+\infty} \text{card}(I_k) z^k$$

Notons \mathcal{D}_k l'ensemble des diviseurs positifs de k , ainsi que $\phi : \begin{cases} I_k & \longrightarrow \mathcal{D}_k \\ (m, n) & \longmapsto m \end{cases}$ et $\psi : \begin{cases} \mathcal{D}_k & \longrightarrow I_k \\ d & \longmapsto (d, k/d) \end{cases}$. On vérifie que ϕ et ψ sont bien définies et que $\phi \circ \psi = \text{Id}_{\mathcal{D}_k}$ et $\psi \circ \phi = \text{Id}_{I_k}$. Ainsi ψ et ϕ sont bijectives et $\text{card}(I_k) = \text{card}(\mathcal{D}_k) = \tau(k)$. Finalement,

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

Reste à vérifier la sommabilité. de la famille $(z^{np})_{(n,p) \in (\mathbb{N}^*)^2}$. En reprenant les calculs précédents,

$$\sum_{(n,p) \in (\mathbb{N}^*)^2} |z^{np}| = \sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{(n,p) \in I_k} |z|^{np} = \sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{(n,p) \in I_k} |z|^k = \sum_{k=1}^{+\infty} \tau(k) |z|^k$$

Mais pour tout $k \in \mathbb{N}^*$, $\tau(k) \leq k$ et, en utilisant la règle de d'Alembert, on obtient que $\sum k |z|^k$ converge. Par conséquent, $\sum \tau(k) |z|^k$ converge et la famille $(z^{np})_{(n,p) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ est sommable, ce qui justifie les calculs précédents.

Solution 50

Fixons $n \in \mathbb{N}$. Puisque $|z^{2^n}| < 1$, on obtient en faisant intervenir une série géométrique,

$$\frac{z^{2^n}}{1 - z^{2^{n+1}}} = z^{2^n} \sum_{k=0}^{+\infty} z^{2^{n+1}k} = \sum_{k=0}^{+\infty} z^{2^n(2k+1)}$$

Pour $n \in \mathbb{N}$, on pose alors $J_n = \{2^n(2k+1), k \in \mathbb{N}\}$. En partitionnant \mathbb{N}^* suivant la valuation 2-adique, on montre que $(J_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une partition de \mathbb{N}^* . Comme la série $\sum_{j \in \mathbb{N}^*} z^j$ converge absolument, la famille $(z^j)_{j \in \mathbb{N}^*}$ est sommable et le théorème de sommation par paquets permet alors d'affirmer que

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{k=0}^{+\infty} z^{2^n(2k+1)} = \sum_{j=1}^{+\infty} z^j$$

Ce qui peut encore s'écrire d'après ce qui précède et en reconnaissant dans le second membre la somme d'une série géométrique :

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{z^{2^n}}{1 - z^{2^{n+1}}} = \frac{z}{1 - z}$$

Solution 51

Posons $I_p = \{(m, n) \in (\mathbb{N}^*)^2, m + n = p\}$ et

$$S_p = \sum_{(m,n) \in I_p} \frac{1}{(m+n)^\alpha} = \frac{\text{card}(I_p)}{p^\alpha} = \frac{p-1}{p^\alpha}$$

D'après le théorème de sommation par paquets, la famille $\left(\frac{1}{(m+n)^\alpha}\right)_{(m,n) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ est sommable si et seulement si la série $\sum S_p$ converge.

Puisque $\frac{p-1}{p^\alpha} \underset{p \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{p^{\alpha-1}}$, la famille $\left(\frac{1}{(m+n)^\alpha}\right)_{(m,n) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ est sommable si et seulement si $\alpha - 1 > 1$ i.e. $\alpha > 2$ (comparaison à une série de Riemann).

Solution 52

Première méthode

D'après le théorème de sommation par paquets employé avec les partitions

$$\{(n, k) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}^*, n < k\} = \bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} \{n\} \times \llbracket n+1, +\infty \rrbracket = \bigsqcup_{k \in \mathbb{N}^*} \llbracket 0, k-1 \rrbracket \times \{k\}$$

On obtient

$$S = \sum_{0 \leq n < k} \frac{1}{k!} = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k!} = \sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{k!} = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{k}{k!} = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{k!} = e$$

Deuxième méthode

Posons $u_{n,k} = \frac{1}{k!}$ si $n < k$ et $u_{n,k} = 0$ sinon. D'après le théorème de Fubini positif

$$\sum_{(n,k) \in \mathbb{N}^2} u_{n,k} = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^{+\infty} u_{n,k} = \sum_{k=0}^{+\infty} u_{n,k}$$

Mais sachant que $u_{n,k} = 0$ lorsque $n \geq k$ et $u_{n,k} = \frac{1}{k!}$ sinon, on obtient

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k!} = \sum_{k=0}^{+\infty} \sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{k!}$$

d'où

$$S = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{k}{k!} = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k!} = e$$

Solution 53

1. Remarquons que $(\mathbb{N}^*)^2 = \bigsqcup_{n \geq 2} I_n$ avec $I_n = \{(p, q) \in (\mathbb{N}^*)^2, p + q = n\}$. Comme la famille $\left(\frac{1}{(p+q)^2}\right)_{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ est à valeurs dans \mathbb{R}_+ , on peut appliquer le théorème de sommation par paquets :

$$\begin{aligned} \sum_{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2} \frac{1}{(p+q)^2} &= \sum_{n=2}^{+\infty} \sum_{(p,q) \in I_n} \frac{1}{(p+q)^2} \\ &= \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{\text{card } I_n}{n^2} \\ &= \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{n-1}{n^2} \end{aligned}$$

Or $\frac{n-1}{n^2} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n}$ donc la série $\sum_{n \geq 2} \frac{n-1}{n^2}$ diverge. Ainsi

$$\sum_{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2} \frac{1}{(p+q)^2} = +\infty$$

et la famille $\left(\frac{1}{(p+q)^2}\right)_{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ n'est pas sommable.

2. Pour tout $(p, q) \in (\mathbb{N}^*)^2$,

$$\frac{1}{p^2 + q^2} \geq \frac{1}{p^2 + 2pq + p^2} = \frac{1}{(p + q)^2} \geq 0$$

On en déduit d'après la question précédente que la famille $\left(\frac{1}{p^2 + q^2}\right)_{(p,q) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ n'est pas non plus sommable.