



Séries

Exercices de Jean-Louis Rouget. Retrouver aussi cette fiche sur www.maths-france.fr

* très facile ** facile *** difficulté moyenne **** difficile ***** très difficile
I : Incontournable

Exercice 1

Nature de la série de terme général

- 1) (*) $\ln \left(\frac{n^2+n+1}{n^2+n-1} \right)$
- 2) (*) $\frac{1}{n+(-1)^n \sqrt{n}}$
- 3) (**) $\left(\frac{n+3}{2n+1} \right)^{\ln n}$
- 4) (**) $\frac{1}{\ln(n) \ln(\ln n)}$
- 5) (**) $\arccos \sqrt[3]{1 - \frac{1}{n^2}}$
- 6) (*) $\frac{n^2}{(n-1)!}$
- 7) $\left(\cos \frac{1}{\sqrt{n}} \right)^n - \frac{1}{\sqrt{e}}$
- 8) (**) $\ln \left(\frac{2}{\pi} \arctan \frac{n^2+1}{n} \right)$
- 9) (*) $\int_0^{\pi/2} \frac{\cos^2 x}{n^2 + \cos^2 x} dx$
- 10) (**) $n^{-\sqrt{2} \sin(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{n})}$
- 11) (**) $e - \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n$

[Correction ▼](#)

[005688]

Exercice 2

Nature de la série de terme général

- 1) (***) $\sqrt[4]{n^4 + 2n^2} - \sqrt[3]{P(n)}$ où P est un polynôme.
- 2) (**) $\frac{1}{n^\alpha} S(n)$ où $S(n) = \sum_{p=2}^{+\infty} \frac{1}{p^n}$.
- 3) (**) u_n où $\forall n \in \mathbb{N}^*, u_n = \frac{1}{n} e^{-u_{n-1}}$.
- 4) (****) $u_n = \frac{1}{p_n}$ où p_n est le n -ème nombre premier

(indication : considérer $\sum_{n=1}^N \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{p_n}} \right) = \sum_{n=1}^N \ln(1 + p_n + p_n^2 + \dots)$).

- 5) (**) $u_n = \frac{1}{n^{(c(n))^\alpha}}$ où $c(n)$ est le nombre de chiffres de n en base 10.
- 6) (*) $\frac{(\prod_{k=2}^n \ln k)^a}{(n!)^b}$ $a > 0$ et $b > 0$.
- 7) (**) $\arctan \left(\left(1 + \frac{1}{n} \right)^a \right) - \arctan \left(\left(1 - \frac{1}{n} \right)^a \right)$.
- 8) (**) $\frac{1}{n^\alpha} \sum_{k=1}^n k^{3/2}$.
- 9) (**) $\left(\prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{k}{n^\alpha} \right) \right) - 1$.

[Correction ▼](#)

[005689]

Exercice 3

Nature de la série de terme général

- 1) (***) $\sin \left(\frac{\pi n^2}{n+1} \right)$
- 2) (**) $\frac{(-1)^n}{n+(-1)^{n-1}}$
- 3) (**) $\ln \left(1 + \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} \right)$
- 4) (***) $\frac{e^{in\alpha}}{n}$, $\frac{\cos(n\alpha)}{n}$ et $\frac{\sin(n\alpha)}{n}$
- 5) (**) $(-1)^n \frac{\ln n}{n}$

$(-1)^n \frac{P(n)}{Q(n)}$ où P et Q sont deux polynômes non nuls

- 7) (****) $(\sin(n! \pi e))^p$ p entier naturel non nul.

[Correction ▼](#)

[005690]

Exercice 4

Calculer les sommes des séries suivantes après avoir vérifié leur convergence.

- 1) (**) $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n+1}{3^n}$
- 2) (**) $\sum_{n=3}^{+\infty} \frac{2n-1}{n^3-4n}$
- 3) (****) $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(3n)!}$
- 4) (*) $\sum_{n=2}^{+\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{n-1}} + \frac{1}{\sqrt{n+1}} - \frac{2}{\sqrt{n}} \right)$
- 5) (**) $\sum_{n=2}^{+\infty} \ln \left(1 + \frac{(-1)^n}{n} \right)$
- 6) (****) $\sum_{n=0}^{+\infty} \ln \left(\cos \frac{a}{2^n} \right)$ $a \in]0, \frac{\pi}{2}[$
- 7) $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{\operatorname{th} \frac{a}{2^n}}{2^n}$

Exercice 5 * I**

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite décroissante de nombres réels strictement positifs telle que la série de terme général u_n converge. Montrer que $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o\left(\frac{1}{n}\right)$. Trouver un exemple de suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de réels strictement positifs telle que la série de terme général u_n converge mais telle que la suite de terme général nu_n ne tende pas vers 0.

Correction ▼

[005692]

Exercice 6 ***

Soit σ une injection de \mathbb{N}^* dans lui-même. Montrer que la série de terme général $\frac{\sigma(n)}{n^2}$ diverge.

Correction ▼

[005693]

Exercice 7 **

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de réels strictement positifs. Montrer que les séries de termes généraux u_n , $\frac{u_n}{1+u_n}$, $\ln(1+u_n)$ et $\int_0^{u_n} \frac{dx}{1+x^e}$ sont de mêmes natures.

Correction ▼

[005694]

Exercice 8 ***

Trouver un développement limité à l'ordre 4 quand n tend vers l'infini de $(e - \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!}) \times (n+1)!$.

Correction ▼

[005695]

Exercice 9 ***

Nature de la série de terme général $u_n = \sin(\pi(2 + \sqrt{3})^n)$.

Correction ▼

[005696]

Exercice 10 **

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite positive telle que la série de terme général u_n converge. Etudier la nature de la série de terme général $\frac{\sqrt{u_n}}{n}$.

Correction ▼

[005697]

Exercice 11 ***

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de réels positifs. Trouver la nature de la série de terme général $v_n = \frac{u_n}{(1+u_1)\dots(1+u_n)}$, $n \geq 1$, connaissant la nature de la série de terme général u_n puis en calculer la somme en cas de convergence.

Correction ▼

[005698]

Exercice 12 ****

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de réels strictement positifs telle que la série de terme général u_n diverge.

Pour $n \in \mathbb{N}$, on pose $S_n = u_0 + \dots + u_n$. Etudier en fonction de $\alpha > 0$ la nature de la série de terme général $\frac{u_n}{(S_n)^\alpha}$.

Correction ▼

[005699]

Exercice 13 **

Soit $\alpha \in \mathbb{R}$. Nature de la série de terme général $u_n = \frac{1+(-1)^n n^\alpha}{n^{2\alpha}}$, $n \geq 1$.

Correction ▼

[005700]

Exercice 14 ****

On sait que $1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \dots = \ln 2$.

A partir de la série précédente, on construit une nouvelle série en prenant p termes positifs, q termes négatifs, p termes positifs ... (Par exemple pour $p = 3$ et $q = 2$, on s'intéresse à $1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{2} - \frac{1}{4} + \frac{1}{7} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11} - \frac{1}{6} - \frac{1}{8} + \dots$).

Convergence et somme de cette série.

[Correction ▼](#)

[005701]

Exercice 15 ***

Nature de la série de terme général $u_n = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{(k(n-k))^a}$.

[Correction ▼](#)

[005702]

Exercice 16

Convergence et somme éventuelle de la série de terme général

$$1) (**) u_n = \frac{2n^3 - 3n^2 + 1}{(n+3)!} \quad 2) (***) u_n = \frac{n!}{(a+1)(a+2)\dots(a+n)}, n \geq 1, a \in \mathbb{R}^{+*} \text{ donné.}$$

[Correction ▼](#)

[005703]

Exercice 17 *

Nature de la série de terme général $u_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{(n+k)^p}$, $p \in]0, +\infty[$.

[Correction ▼](#)

[005704]

Exercice 18 **

Déterminer un équivalent simple de $\frac{n!}{(a+1)(a+2)\dots(a+n)}$ quand n tend vers l'infini (a réel positif donné).

[Correction ▼](#)

[005705]

Exercice 19 *

Nature de la série de terme général $u_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{(n+k)^p}$, $p \in]0, +\infty[$.

[Correction ▼](#)

[005706]

Exercice 20 *** I

Développement limité à l'ordre 4 de $\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2}$ quand n tend vers l'infini.

[Correction ▼](#)

[005707]

Exercice 21

Partie principale quand n tend vers $+\infty$ de

$$1) (***) \sum_{p=n+1}^{+\infty} (-1)^p \frac{\ln p}{p} \quad 2) (**) \sum_{p=1}^n p^p.$$

[Correction ▼](#)

[005708]

Exercice 22 ***

Soit $p \in \mathbb{N}^*$, calculer $\sum_{p \in \mathbb{N}^*} \left(\sum_{n \in \mathbb{N}^*, n \neq p} \frac{1}{n^2 - p^2} \right)$ et $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \left(\sum_{p \in \mathbb{N}^*, p \neq n} \frac{1}{n^2 - p^2} \right)$. Que peut-on en déduire ?

[Correction ▼](#)

[005709]

Exercice 23 **

Calculer $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{3n+1}$.

[Correction ▼](#)

[005710]

Exercice 24 ****

Soient $(u_n)_{n \geq 1}$ une suite réelle. Pour $n \geq 1$, on pose $v_n = \frac{u_1 + \dots + u_n}{n}$. Montrer que si la série de terme général $(u_n)^2$ converge alors la série de terme général $(v_n)^2$ converge et que $\sum_{n=1}^{+\infty} (v_n)^2 \leq 4 \sum_{n=1}^{+\infty} (u_n)^2$ (indication : majorer $v_n^2 - 2u_n v_n$).

Exercice 25 ***

Convergence et somme de la série de terme général $u_n = \frac{\pi}{4} - \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{2k+1}$, $n \geq 0$.

Correction de l'exercice 1 ▲

1. Pour $n \geq 1$, on pose $u_n = \ln \left(\frac{n^2+n+1}{n^2+n-1} \right)$. $\forall n \geq 1$, u_n existe

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

Comme la série de terme général $\frac{1}{n^2}$, $n \geq 1$, converge (série de RIEMANN d'exposant $\alpha > 1$), la série de terme général u_n converge.

2. Pour $n \geq 2$, on pose $u_n = \frac{1}{n+(-1)^n \sqrt{n}}$. $\forall n \geq 2$, u_n existe et de plus $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n}$. Comme la série de terme général $\frac{1}{n}$, $n \geq 2$, diverge et est positive, la série de terme général u_n diverge.
3. Pour $n \geq 1$, on pose $u_n = \left(\frac{n+3}{2n+1} \right)^{\ln n}$. Pour $n \geq 1$, $u_n > 0$ et

$$\begin{aligned} \ln(u_n) &= \ln(n) \ln \left(\frac{n+3}{2n+1} \right) = \ln(n) \left(\ln \left(\frac{1}{2} \right) + \ln \left(1 + \frac{3}{n} \right) - \ln \left(1 + \frac{1}{2n} \right) \right) \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} \ln(n) \left(-\ln 2 + O\left(\frac{1}{n}\right) \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} -\ln 2 \ln(n) + o(1). \end{aligned}$$

Donc $u_n = e^{\ln(u_n)} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} e^{-\ln 2 \ln n} = \frac{1}{n^{\ln 2}}$. Comme la série de terme général $\frac{1}{n^{\ln 2}}$, $n \geq 1$, diverge (série de RIEMANN d'exposant $\alpha \leq 1$) et est positive, la série de terme général u_n diverge.

4. Pour $n \geq 2$, on pose $u_n = \frac{1}{\ln(n) \ln(\text{ch } n)}$. u_n existe pour $n \geq 2$. $\ln(\text{ch } n) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln \left(\frac{e^n}{2} \right) = n - \ln 2 \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n$ et $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n \ln(n)} > 0$.

Vérifions alors que la série de terme général $\frac{1}{n \ln n}$, $n \geq 2$, diverge. La fonction $x \rightarrow x \ln x$ est continue, croissante et strictement positive sur $]1, +\infty[$ (produit de deux fonctions strictement positives et croissantes sur $]1, +\infty[$). Par suite, la fonction $x \rightarrow \frac{1}{x \ln x}$ est continue et décroissante sur $]1, +\infty[$ et pour tout entier k supérieur ou égal à 2,

$$\frac{1}{k \ln k} \geq \int_k^{k+1} \frac{1}{x \ln x} dx$$

Par suite, pour $n \geq 2$,

$$\sum_{k=2}^n \frac{1}{k \ln k} \geq \sum_{k=2}^n \int_k^{k+1} \frac{1}{x \ln x} dx = \int_2^{n+1} \frac{1}{x \ln x} dx = \ln(\ln(n+1)) - \ln(\ln(2)) \underset{n \rightarrow +\infty}{\rightarrow} +\infty.$$

Donc u_n est positif et équivalent au terme général d'une série divergente. La série de terme général u_n diverge.

5. Pour $n \geq 1$, on pose $u_n = \arccos \sqrt[3]{1 - \frac{1}{n^2}}$. u_n existe pour $n \geq 1$. De plus $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\rightarrow} 0$. On en déduit que

$$\begin{aligned} u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sin(u_n) &= \sin \left(\arccos \sqrt[3]{1 - \frac{1}{n^2}} \right) = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)^{2/3}} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \sqrt{1 - 1 + \frac{2}{3n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)} \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{n} > 0 \end{aligned}$$

terme général d'une série de RIEMANN divergente. La série de terme général u_n diverge.

6. Pour $n \geq 1$, on pose $u_n = \frac{n^2}{(n-1)!}$. u_n existe et $u_n \neq 0$ pour $n \geq 1$. De plus,

$$\left| \frac{u_{n+1}}{u_n} \right| = \frac{(n+1)^2}{n^2} \times \frac{(n-1)!}{n!} = \frac{(n+1)^2}{n^3} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\rightarrow} 0 < 1.$$

D'après la règle de d'ALEMBERT, la série de terme général u_n converge.

7. Pour $n \geq 1$, on pose $u_n = \left(\cos \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^n - \frac{1}{\sqrt{e}}$. u_n est défini pour $n \geq 1$ car pour $n \geq 1$, $\frac{1}{\sqrt{n}} \in]0, \frac{\pi}{2}[$ et donc $\cos \frac{1}{\sqrt{n}} > 0$. Ensuite

$$\begin{aligned} \ln \left(\cos \frac{1}{\sqrt{n}} \right) &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} \ln \left(1 - \frac{1}{2n} + \frac{1}{24n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} -\frac{1}{2n} + \frac{1}{24n^2} - \frac{1}{8n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} -\frac{1}{2n} - \frac{1}{12n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right). \end{aligned}$$

Puis $n \ln \left(\cos \frac{1}{\sqrt{n}} \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} -\frac{1}{2} - \frac{1}{12n} + o\left(\frac{1}{n}\right)$ et donc

$$u_n = e^{n \ln(\cos(1/\sqrt{n}))} - \frac{1}{\sqrt{e}} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{1}{\sqrt{e}} \left(e^{-\frac{1}{2n} + o(\frac{1}{n})} - 1 \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} -\frac{1}{12n\sqrt{e}} < 0.$$

La série de terme général $-\frac{1}{12n\sqrt{e}}$ est divergente et donc la série de terme général u_n diverge.

8.

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{n^2+1}{n} \right) \right) &= \ln \left(1 - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{n}{n^2+1} \right) \right) \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} -\frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{n}{n^2+1} \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} -\frac{2}{\pi} \frac{n}{n^2+1} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} -\frac{2}{n\pi} < 0. \end{aligned}$$

Donc, la série de terme général u_n diverge.

9. Pour $n \geq 1$, on pose $u_n = \int_0^{\pi/2} \frac{\cos^2 x}{n^2 + \cos^2 x} dx$.

Pour $n \geq 1$, la fonction $x \mapsto \frac{\cos^2 x}{n^2 + \cos^2 x}$ est continue sur $[0, \frac{\pi}{2}]$ et positive et donc, u_n existe et est positif. De plus, pour $n \geq 1$,

$$0 \leq u_n \leq \int_0^{\pi/2} \frac{1}{n^2+0} dx = \frac{\pi}{2n^2}.$$

La série de terme général $\frac{\pi}{2n^2}$ converge et donc la série de terme général u_n converge.

10. $-\sqrt{2} \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{n} \right) = -\sin \left(\frac{1}{n} \right) - \cos \left(\frac{1}{n} \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} -1 + O\left(\frac{1}{n}\right)$ puis

$$-\sqrt{2} \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{n} \right) \ln n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} -\ln(n) + O\left(\frac{\ln n}{n}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} -\ln(n) + o(1).$$

Par suite,

$$0 < u_n = e^{-\sqrt{2} \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{n} \right) \ln n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} e^{-\ln n} = \frac{1}{n}.$$

La série de terme général $\frac{1}{n}$ diverge et la série de terme général u_n diverge.

11. $n \ln \left(1 + \frac{1}{n} \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} 1 - \frac{1}{2n} + o\left(\frac{1}{n}\right)$ et donc

$$u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} e - e^{1 - \frac{1}{2n} + o(\frac{1}{n})} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} e \left(1 - 1 + \frac{1}{2n} + o\left(\frac{1}{n}\right) \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{e}{2n} > 0.$$

La série de terme général $\frac{e}{2n}$ diverge et la série de terme général u_n diverge.

Correction de l'exercice 2 ▲

1. Si P n'est pas unitaire de degré 3, u_n ne tend pas vers 0 et la série de terme général u_n diverge grossièrement.

Soit P un polynôme unitaire de degré 3. Posons $P = X^3 + aX^2 + bX + c$.

$$\begin{aligned}
u_n &= n \left(\left(1 + \frac{2}{n^2} \right)^{1/4} - \left(1 + \frac{a}{n} + \frac{b}{n^2} + \frac{c}{n^3} \right)^{1/3} \right) \\
&\underset{n \rightarrow +\infty}{=} n \left(\left(1 + \frac{1}{2n^2} + O\left(\frac{1}{n^3}\right) \right) - \left(1 + \frac{a}{3n} + \frac{b}{3n^2} - \frac{a^2}{9n^2} + O\left(\frac{1}{n^3}\right) \right) \right) \\
&\underset{n \rightarrow +\infty}{=} -\frac{a}{3} + \left(\frac{1}{2} - \frac{b}{3} + \frac{a^2}{9} \right) \frac{1}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right).
\end{aligned}$$

- Si $a \neq 0$, u_n ne tend pas vers 0 et la série de terme général u_n diverge grossièrement.
- Si $a = 0$ et $\frac{1}{2} - \frac{b}{3} \neq 0$, $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \left(\frac{1}{2} - \frac{b}{3}\right) \frac{1}{n}$. u_n est donc de signe constant pour n grand et est équivalent au terme général d'une série divergente. Donc la série de terme général u_n diverge.
- Si $a = 0$ et $\frac{1}{2} - \frac{b}{3} = 0$, $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} O\left(\frac{1}{n^2}\right)$. Dans ce cas, la série de terme général u_n converge (absolument).

En résumé, la série de terme général u_n converge si et seulement si $a = 0$ et $b = \frac{3}{2}$ ou encore la série de terme général u_n converge si et seulement si P est de la forme $X^3 + \frac{3}{2}X + c$, $c \in \mathbb{R}$.

2. Pour $n \geq 2$, posons $u_n = \frac{1}{n^\alpha} S(n)$. Pour $n \geq 2$,

$$0 < S(n+1) = \sum_{p=2}^{+\infty} \frac{1}{p} \times \frac{1}{p^n} \leq \frac{1}{2} \sum_{p=2}^{+\infty} \frac{1}{p^n} = \frac{1}{2} S(n)$$

et donc $\forall n \geq 2$, $S(n) \leq \frac{S(2)}{2^{n-2}}$. Par suite,

$$u_n \leq \frac{1}{n^\alpha} \frac{S(2)}{2^{n-2}} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o\left(\frac{1}{n^2}\right).$$

Pour tout réel α , la série de terme général u_n converge.

3. $\forall u_0 \in \mathbb{R}$, $\forall n \in \mathbb{N}^*$, $u_n > 0$. Par suite, $\forall n \geq 2$, $0 < u_n < \frac{1}{n}$.

On en déduit que $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = 0$ et par suite $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n} > 0$. La série de terme général u_n diverge.

4. On sait qu'il existe une infinité de nombres premiers.

Notons $(p_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ la suite croissante des nombres premiers. La suite $(p_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ est une suite strictement croissante d'entiers et donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} p_n = +\infty$ ou encore $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{p_n} = 0$.

Par suite, $0 < \frac{1}{p_n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln \left(\left(1 - \frac{1}{p_n} \right)^{-1} \right)$ et les séries de termes généraux $\frac{1}{p_n}$ et $\ln \left(\left(1 - \frac{1}{p_n} \right)^{-1} \right)$ sont de même nature.

Il reste donc à étudier la nature de la série de terme général $\ln \left(\left(1 - \frac{1}{p_n} \right)^{-1} \right)$.

Montrons que $\forall N \in \mathbb{N}^*$, $\sum_{n=1}^{+\infty} \ln \left(\left(1 - \frac{1}{p_n} \right)^{-1} \right) \geq \ln \left(\sum_{k=1}^N \frac{1}{k} \right)$.

Soit $n \geq 1$. Alors $\frac{1}{p_n} < 1$ et la série de terme général $\frac{1}{p_n^k}$, $k \in \mathbb{N}$, est une série géométrique convergente de somme : $\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{p_n^k} = \left(1 - \frac{1}{p_n} \right)^{-1}$.

Soit alors N un entier naturel supérieur ou égal à 2 et $p_1 < p_2 \dots < p_n$ la liste des nombres premiers inférieurs ou égaux à N .

Tout entier entre 1 et N s'écrit de manière unique $p_1^{\beta_1} \dots p_n^{\beta_n}$ où $\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $0 \leq \beta_i \leq \alpha_i = E \left(\frac{\ln(N)}{\ln(p_i)} \right)$ et deux entiers distincts ont des décompositions distinctes. Donc

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^{+\infty} \ln \left(\left(1 - \frac{1}{p_k} \right)^{-1} \right) &\geq \sum_{k=1}^n \ln \left(\left(1 - \frac{1}{p_k} \right)^{-1} \right) \quad (\text{car } \forall k \in \mathbb{N}^*, \left(1 - \frac{1}{p_k} \right)^{-1} > 1) \\
&= \sum_{k=1}^n \ln \left(\sum_{i=0}^{+\infty} \frac{1}{p_k^i} \right) \geq \sum_{k=1}^n \ln \left(\sum_{i=0}^{\alpha_k} \frac{1}{p_k^i} \right) \\
&= \ln \left(\prod_{k=1}^n \left(\sum_{i=0}^{\alpha_k} \frac{1}{p_k^i} \right) \right) = \ln \left(\sum_{0 \leq \beta_1 \leq \alpha_1, \dots, 0 \leq \beta_n \leq \alpha_n} \frac{1}{p_1^{\beta_1} \dots p_n^{\beta_n}} \right) \\
&\geq \ln \left(\sum_{k=1}^N \frac{1}{k} \right).
\end{aligned}$$

Or $\lim_{N \rightarrow +\infty} \ln \left(\sum_{k=1}^N \frac{1}{k} \right) = +\infty$ et donc $\sum_{k=1}^{+\infty} \ln \left(\left(1 - \frac{1}{p_k} \right)^{-1} \right) = +\infty$.

La série de terme général $\ln \left(1 - \frac{1}{p_k} \right)^{-1}$ diverge et il en est de même de la série de terme général $\frac{1}{p_n}$.

(Ceci montre qu'il y a beaucoup de nombres premiers et en tout cas beaucoup plus de nombres premiers que de carrés parfaits par exemple).

5. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Posons $n = a_p \times 10^p + \dots + a_1 \times 10 + a_0$ où $\forall i \in \llbracket 0, p \rrbracket$, $a_i \in \{0, 1, \dots, 9\}$ et $a_p \neq 0$. Alors $c(n) = p + 1$.

Déterminons p est en fonction de n . On a $10^p \leq n < 10^{p+1}$ et donc $p = E(\log(n))$. Donc

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, u_n = \frac{1}{n(E(\log n) + 1)^\alpha}.$$

Par suite, $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\ln^\alpha(10)}{n \ln^\alpha(n)}$ et la série de terme général u_n converge si et seulement si $\alpha > 1$ (séries de BERTRAND). Redémontrons ce résultat qui n'est pas un résultat de cours.

La série de terme général $\frac{1}{n \ln n}$ est divergente (voir l'exercice 1, 4)). Par suite, si $\alpha \leq 1$, la série de terme général $\frac{1}{n \ln^\alpha(n)}$ est divergente car $\forall n \geq 2$, $\frac{1}{n \ln^\alpha(n)} \geq \frac{1}{n \ln n}$.

Soit $\alpha > 1$. Puisque la fonction $x \mapsto \frac{1}{x \ln^\alpha x}$ est continue et strictement décroissante sur $]1, +\infty[$, pour $k \geq 3$,

$$\frac{1}{k \ln^\alpha k} \leq \int_{k-1}^k \frac{1}{x \ln^\alpha x} dx$$

puis, pour $n \geq 3$, en sommant pour $k \in \llbracket 3, n \rrbracket$

$$\sum_{k=3}^n \frac{1}{k \ln^\alpha k} \leq \sum_{k=3}^n \int_{k-1}^k \frac{1}{x \ln^\alpha x} dx = \int_2^n \frac{1}{x \ln^\alpha x} dx = \frac{1}{\alpha-1} \left(\frac{1}{\ln^{\alpha-1}(2)} - \frac{1}{\ln^{\alpha-1}(n)} \right) \leq \frac{1}{\alpha-1} \frac{1}{\ln^{\alpha-1}(2)}.$$

Ainsi, la suite des sommes partielles de la série à termes positifs, de terme général $\frac{1}{k \ln^\alpha k}$, est majorée et donc la série de terme général $\frac{1}{k \ln^\alpha k}$ converge.

6 Soit $n \geq 2$.

$$\left| \frac{u_{n+1}}{u_n} \right| = \frac{\ln^a(n+1)}{(n+1)^b} \underset{n \rightarrow +\infty}{\rightarrow} 0 < 1$$

et d'après la règle de d'ALEMBERT, la série de terme général u_n converge.

6. $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{4} = 0$. Donc

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

Par suite, la série de terme général u_n converge si et seulement si $a = 0$.

7. La fonction $x \mapsto x^{3/2}$ est continue et croissante sur \mathbb{R}^+ . Donc pour $k \geq 1$, $\int_{k-1}^k x^{3/2} dx \leq k^{3/2} \leq \int_k^{k+1} x^{3/2} dx$ puis pour $n \in \mathbb{N}^*$:

$$\int_0^n x^{3/2} dx \leq \sum_{k=1}^n \int_{k-1}^k x^{3/2} dx \leq \sum_{k=1}^n k^{3/2} \leq \sum_{k=1}^n \int_k^{k+1} x^{3/2} dx = \int_1^{n+1} x^{3/2} dx$$

ce qui fournit

$$\frac{2}{5} n^{5/2} \leq \sum_{k=1}^n k^{3/2} \leq \frac{2}{5} ((n+1)^{5/2} - 1) \text{ et donc } \sum_{k=1}^n k^{3/2} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{2n^{5/2}}{5}.$$

Donc $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{2n^{\frac{5}{2}-\alpha}}{5} > 0$. La série de terme général u_n converge si et seulement si $\alpha > \frac{7}{2}$.

8. Pour $n \geq 1$,

$$u_n = \left(1 + \frac{1}{n^\alpha}\right) \left(1 + \frac{2}{n^\alpha}\right) \dots \left(1 + \frac{n}{n^\alpha}\right) - 1 \geq \frac{1}{n^\alpha} + \frac{2}{n^\alpha} + \dots + \frac{n}{n^\alpha} = \frac{n(n+1)}{2n^\alpha} > 0.$$

Comme $\frac{n(n+1)}{2n^\alpha} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{2n^{\alpha-2}}$, si $\alpha \leq 3$, on a $\alpha - 2 \leq 1$ et la série de terme général u_n diverge.

Si $\alpha > 3$,

$$\begin{aligned} 0 < u_n &\leq \left(1 + \frac{n}{n^\alpha}\right)^n - 1 = e^{n \ln\left(1 + \frac{1}{n^{\alpha-1}}\right)} - 1 \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n \ln\left(1 + \frac{1}{n^{\alpha-1}}\right) \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n^{\alpha-2}} \text{ terme général d'une série de RIEMANN convergente,} \end{aligned}$$

et, puisque $\alpha - 2 > 1$, la série de terme général u_n converge. Finalement, la série de terme général u_n converge si et seulement si $\alpha > 3$.

Correction de l'exercice 3 ▲

1. Pour $n \in \mathbb{N}$,

$$u_n = \sin\left(\frac{\pi n^2}{n+1}\right) = \sin\left(\frac{\pi(n^2-1+1)}{n+1}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{n+1} + (n-1)\pi\right) = (-1)^{n-1} \sin\left(\frac{\pi}{n+1}\right).$$

La suite $((-1)^{n-1} \sin(\frac{\pi}{n+1}))_{n \in \mathbb{N}}$ est alternée en signe et sa valeur absolue tend vers 0 en décroissant. La série de terme général u_n converge donc en vertu du critère spécial aux séries alternées.

2. (la suite $(\frac{1}{n+(-1)^{n-1}})_{n \in \mathbb{N}}$ n'est pas décroissante à partir d'un certain rang).

$$u_n = \frac{(-1)^n}{n} \frac{1}{1 + \frac{(-1)^{n-1}}{n}} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{(-1)^n}{n} \left(1 + O\left(\frac{1}{n}\right)\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{(-1)^n}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right).$$

La série de terme général $\frac{(-1)^n}{n}$ converge en vertu du critère spécial aux séries alternées et la série de terme général $O\left(\frac{1}{n^2}\right)$ est absolument convergente. On en déduit que la série de terme général u_n converge.

3. $u_n = \ln\left(1 + \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} - \frac{1}{2n} + O\left(\frac{1}{n^{3/2}}\right)$. Les séries de termes généraux respectifs $\frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}$ et $O\left(\frac{1}{n^{3/2}}\right)$ sont convergentes et la série de terme général $-\frac{1}{2n}$ est divergente. Si la série de terme général u_n convergerait alors la série de terme général $-\frac{1}{2n} = u_n - \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}} + O\left(\frac{1}{n^{3/2}}\right)$ convergerait ce qui n'est pas. Donc la série de terme général u_n diverge.

Remarque. La série de terme général u_n diverge bien que u_n soit équivalent au terme général d'une série convergente.

4. Si $\alpha \in 2\pi\mathbb{Z}$, alors les deux premières séries divergent et la dernière converge.

Soit $\alpha \notin 2\pi\mathbb{Z}$. Pour $n \in \mathbb{N}^*$, posons $v_n = e^{in\alpha}$ et $\varepsilon_n = \frac{1}{n}$ de sorte que $u_n = \varepsilon_n v_n$. Pour $n \in \mathbb{N}^*$, posons encore $V_n = \sum_{k=1}^n v_k$.

Pour $(n, p) \in (\mathbb{N}^*)^2$, posons enfin $R_n^p = \sum_{k=1}^{n+p} u_k - \sum_{k=1}^n u_k = \sum_{k=n+1}^{n+p} u_k$. (On effectue alors une transformation d'ABEL).

$$\begin{aligned} R_n^p &= \sum_{k=n+1}^{n+p} \varepsilon_k v_k = \sum_{k=n+1}^{n+p} \varepsilon_k (V_k - V_{k-1}) = \sum_{k=n+1}^{n+p} \varepsilon_k V_k - \sum_{k=n+1}^{n+p} \varepsilon_k V_{k-1} = \sum_{k=n+1}^{n+p} \varepsilon_k V_k - \sum_{k=n}^{n+p-1} \varepsilon_{k+1} V_k \\ &= \varepsilon_{n+p} V_{n+p} - \varepsilon_{n+1} V_n + \sum_{k=n+1}^{n+p-1} (\varepsilon_k - \varepsilon_{k+1}) V_k. \end{aligned}$$

Maintenant, pour $n \in \mathbb{N}^*$, $V_n = e^{i\alpha} \frac{e^{in\alpha} - 1}{e^{i\alpha} - 1} = e^{i\alpha} \frac{\sin(n\alpha/2)}{\sin(\alpha/2)}$ et donc $\forall n \in \mathbb{N}^*$, $|V_n| \leq \frac{1}{|\sin(\alpha/2)|}$. Par suite, pour $(n, p) \in (\mathbb{N}^*)^2$

$$\begin{aligned} |R_n^p| &= \left| \frac{1}{n+p} V_{n+p} - \frac{1}{n+1} V_n + \sum_{k=n+1}^{n+p-1} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k+1} \right) V_k \right| \\ &\leq \frac{1}{|\sin(\alpha/2)|} \left(\frac{1}{n+p} + \frac{1}{n+1} + \sum_{k=n+1}^{n+p-1} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k+1} \right) \right) \\ &= \frac{1}{|\sin(\alpha/2)|} \left(\frac{1}{n+p} + \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+p} \right) = \frac{2}{|\sin(\alpha/2)|(n+1)} \\ &\leq \frac{2}{n|\sin(\alpha/2)|}. \end{aligned}$$

Soit alors ε un réel strictement positif. Pour $n \geq E\left(\frac{2}{\varepsilon|\sin(\alpha/2)|}\right) + 1$ et p entier naturel non nul quelconque, on a $|R_n^p| < \varepsilon$.

On a montré que $\forall \varepsilon > 0$, $\exists n_0 \in \mathbb{N}^* / \forall (n, p) \in \mathbb{N}^*$, $(n \geq n_0 \Rightarrow \left| \sum_{k=1}^{n+p} u_k - \sum_{k=1}^n u_k \right| < \varepsilon$.

Ainsi, la série de terme général u_n vérifie le critère de CAUCHY et est donc convergente. Il en est de même des séries de termes généraux respectifs $\frac{\cos(n\alpha)}{n} = \operatorname{Re}\left(\frac{e^{in\alpha}}{n}\right)$ et $\frac{\sin(n\alpha)}{n} = \operatorname{Im}\left(\frac{e^{in\alpha}}{n}\right)$.

5. Pour $x \in]0, +\infty[$, posons $f(x) = \frac{\ln x}{x}$. f est dérivable sur $]0, +\infty[$ et $\forall x > e$, $f'(x) = \frac{1 - \ln x}{x^2} < 0$.

Donc, la fonction f est décroissante sur $[e, +\infty[$. On en déduit que la suite $\left(\frac{\ln n}{n}\right)_{n \geq 3}$ est une suite décroissante. Mais alors la série de terme général $(-1)^n \frac{\ln n}{n}$ converge en vertu du critère spécial aux séries alternées.

6. • Si $\deg P \geq \deg Q$, u_n ne tend pas vers 0 et la série de terme général u_n est grossièrement divergente.
• Si $\deg P \leq \deg Q - 2$, $u_n = O\left(\frac{1}{n^2}\right)$ et la série de terme général u_n est absolument convergente.
• Si $\deg P = \deg Q - 1$, $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} (-1)^n \frac{\operatorname{dom} P}{n \operatorname{dom} Q} + O\left(\frac{1}{n^2}\right)$. u_n est alors somme de deux termes généraux de séries convergentes et la série de terme général u_n converge.

En résumé, la série de terme général u_n converge si et seulement si $\deg P < \deg Q$.

7. $e = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{k!}$ puis pour $n \geq 2$, $n!e = 1 + n + \sum_{k=0}^{n-2} \frac{n!}{k!} + \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{n!}{k!}$.

Pour $0 \leq k \leq n-2$, $\frac{n!}{k!}$ est un entier divisible par $n(n-1)$ et est donc un entier pair que l'on note $2K_n$. Pour $n \geq 2$, on obtient

$$\sin(n! \pi e) = \sin(2K_n \pi + (n+1)\pi + \pi \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{n!}{k!}) = (-1)^{n+1} \sin\left(\pi \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{n!}{k!}\right).$$

Déterminons un développement limité à l'ordre 2 de $\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{n!}{k!}$ quand n tend vers $+\infty$.

$$\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{n!}{k!} = \frac{1}{n+1} + \frac{1}{(n+1)(n+2)} + \sum_{k=n+3}^{+\infty} \frac{n!}{k!}.$$

Maintenant, pour $k \geq n+3$, $\frac{n!}{k!} = \frac{1}{k(k-1)\dots(n+1)} \leq \frac{1}{(n+1)^{k-n}}$ et donc

$$\sum_{k=n+3}^{+\infty} \frac{n!}{k!} \leq \sum_{k=n+3}^{+\infty} \frac{1}{(n+1)^{k-n}} = \frac{1}{(n+1)^3} \times \frac{1}{1 - \frac{1}{n+1}} = \frac{1}{n(n+1)^2} \leq \frac{1}{n^3}.$$

On en déduit que $\sum_{k=n+3}^{+\infty} \frac{n!}{k!} = o\left(\frac{1}{n^2}\right)$. Il reste

$$\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{n!}{k!} = \frac{1}{n+1} + \frac{1}{(n+1)(n+2)} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{-1} + \frac{1}{n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) = \frac{1}{n} + o\left(\frac{1}{n^2}\right).$$

Finalement, $\sin(n!\pi e) = (-1)^{n+1} \sin\left(\frac{\pi}{n} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)\right) = \frac{(-1)^{n+1}\pi}{n} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)$.

$\sin(n!\pi e)$ est somme de deux termes généraux de séries convergentes et la série de terme général $\sin(n!\pi e)$ converge.

Si $p \geq 2$, $|\sin^p(n!\pi e)| \sim \frac{\pi^p}{n^p}$ et la série de terme général $\sin^p(n!\pi e)$ converge absolument.

Correction de l'exercice 4 ▲

1. $\frac{n+1}{3^n} = o\left(\frac{1}{n^2}\right)$. Par suite, la série de terme général $\frac{n+1}{3^n}$ converge.

1er calcul. Soit $S = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n+1}{3^n}$. Alors

$$\begin{aligned} \frac{1}{3}S &= \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n+1}{3^{n+1}} = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{n}{3^n} = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{n+1}{3^n} - \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{3^n} \\ &= (S-1) - \frac{1}{3} \frac{1}{1-\frac{1}{3}} = S - \frac{3}{2}. \end{aligned}$$

On en déduit que $S = \frac{9}{4}$.

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n+1}{3^n} = \frac{9}{4}.$$

2ème calcul. Pour $x \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}$, on pose $f_n(x) = \sum_{k=0}^n x^k$.

Soit $n \in \mathbb{N}^*$. f_n est dérivable sur \mathbb{R} et pour $x \in \mathbb{R}$,

$$f'_n(x) = \sum_{k=1}^n kx^{k-1} = \sum_{k=0}^{n-1} (k+1)x^k.$$

Par suite, pour $n \in \mathbb{N}^*$ et $x \in \mathbb{R} \setminus \{1\}$

$$\sum_{k=0}^{n-1} (k+1)x^k = f'_n(x) = \left(\frac{x^n-1}{x-1}\right)'(x) = \frac{nx^{n-1}(x-1) - (x^n-1)}{(x-1)^2} = \frac{(n-1)x^n - nx^{n-1} + 1}{(x-1)^2}.$$

Pour $x = \frac{1}{3}$, on obtient $\sum_{k=0}^{n-1} \frac{k+1}{3^k} = \frac{\frac{n-1}{3^n} - \frac{n}{3^{n-1}} + 1}{\left(\frac{1}{3}-1\right)^2}$ et quand n tend vers l'infini, on obtient de nouveau $S = \frac{9}{4}$.

2. Pour $k \geq 3$, $\frac{2k-1}{k^3-4k} = \frac{3}{8(k-2)} + \frac{1}{4k} - \frac{5}{8(k+2)}$. Puis

$$\begin{aligned} \sum_{k=3}^n \frac{2k-1}{k^3-4k} &= \frac{3}{8} \sum_{k=3}^n \frac{1}{k-2} + \frac{1}{4} \sum_{k=3}^n \frac{1}{k} - \frac{5}{8} \sum_{k=3}^n \frac{1}{k+2} = \frac{3}{8} \sum_{k=1}^{n-2} \frac{1}{k} + \frac{1}{4} \sum_{k=3}^n \frac{1}{k} - \frac{5}{8} \sum_{k=5}^{n+2} \frac{1}{k} \\ &= \frac{3}{8} \left(1 + \frac{1}{2} + \sum_{k=3}^n \frac{1}{k}\right) + \frac{1}{4} \sum_{k=3}^n \frac{1}{k} - \frac{5}{8} \left(-\frac{1}{3} - \frac{1}{4} \sum_{k=3}^n \frac{1}{k}\right) + o(1) \\ &= \frac{3}{8} \times \frac{3}{2} + \frac{5}{8} \times \frac{7}{12} + o(1) = \frac{89}{96} + o(1). \end{aligned}$$

La série proposée est donc convergente de somme $\frac{89}{96}$.

$$\sum_{n=3}^{+\infty} \frac{2n-1}{n^3-4n} = \frac{89}{96}.$$

3. Pour $k \in \mathbb{N}$, on a $1^{3k} + j^{3k} + (j^2)^{3k} = 3$ puis $1^{3k+1} + j^{3k+1} + (j^2)^{3k+1} = 1 + j + j^2 = 0$ et $1^{3k+2} + j^{3k+2} + (j^2)^{3k+2} = 1 + j^2 + j^4 = 0$. Par suite,

$$e + e^j + e^{j^2} = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1^n + j^n + (j^2)^n}{n!} = 3 \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(3n)!},$$

et donc

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(3n)!} &= \frac{1}{3}(e + e^j + e^{j^2}) = \frac{1}{3} \left(e + e^{-\frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2}} + e^{-\frac{1}{2} - i\frac{\sqrt{3}}{2}} \right) = \frac{1}{3} \left(e + 2e^{-1/2} \operatorname{Re}(e^{-i\sqrt{3}/2}) \right) \\ &= \frac{1}{3} \left(e + 2e^{-1/2} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \right). \end{aligned}$$

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(3n)!} = \frac{1}{3} \left(e + \frac{2}{\sqrt{e}} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \right).$$

4.

$$\begin{aligned} \sum_{k=2}^n \left(\frac{1}{\sqrt{k-1}} + \frac{1}{\sqrt{k+1}} - \frac{2}{\sqrt{k}} \right) &= \sum_{k=2}^n \left(\left(\frac{1}{\sqrt{k-1}} - \frac{1}{\sqrt{k}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{k}} - \frac{1}{\sqrt{k+1}} \right) \right) \\ &= \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{n}} - \frac{1}{\sqrt{n+1}} \right) \quad (\text{somme télescopique}) \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} + o(1) \end{aligned}$$

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

5. $\ln \left(1 + \frac{(-1)^n}{n} \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{(-1)^n}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right)$. Donc la série de terme général $\ln \left(1 + \frac{(-1)^n}{n} \right)$ converge.

Posons $S = \sum_{k=2}^{+\infty} \ln \left(1 + \frac{(-1)^k}{k} \right)$ puis pour $n \geq 2$, $S_n = \sum_{k=2}^n \ln \left(1 + \frac{(-1)^k}{k} \right)$. Puisque la série converge $S = \lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = \lim_{p \rightarrow +\infty} S_{2p+1}$ avec

$$\begin{aligned} S_{2p+1} &= \sum_{k=2}^{2p+1} \ln \left(1 + \frac{(-1)^k}{k} \right) = \sum_{k=1}^p \left(\ln \left(1 - \frac{1}{2k+1} \right) + \ln \left(1 + \frac{1}{2k} \right) \right) \\ &= \sum_{k=1}^p (\ln(2k) - \ln(2k+1) + \ln(2k+1) - \ln(2k)) = 0 \end{aligned}$$

et quand p tend vers $+\infty$, on obtient $S = 0$.

$$\sum_{n=2}^{+\infty} \ln \left(1 + \frac{(-1)^n}{n} \right) = 0.$$

6. Si $a \in]0, \frac{\pi}{2}[$ alors, pour tout entier naturel n , $\frac{a}{2^n} \in]0, \frac{\pi}{2}[$ et donc $\cos\left(\frac{a}{2^n}\right) > 0$.

Ensuite, $\ln \left(\cos\left(\frac{a}{2^n}\right) \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \ln \left(1 + O\left(\frac{1}{2^{2n}}\right) \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} O\left(\frac{1}{2^{2n}}\right)$ et la série converge. Ensuite,

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n \ln \left(\cos\left(\frac{a}{2^k}\right) \right) &= \ln \left(\prod_{k=0}^n \cos\left(\frac{a}{2^k}\right) \right) = \ln \left(\prod_{k=0}^n \frac{\sin\left(2 \times \frac{a}{2^k}\right)}{2 \sin\left(\frac{a}{2^k}\right)} \right) = \ln \left(\frac{1}{2^{n+1}} \prod_{k=0}^n \frac{\sin\left(\frac{a}{2^{k-1}}\right)}{\sin\left(\frac{a}{2^k}\right)} \right) \\ &= \ln \left(\frac{\sin(2a)}{2^{n+1} \sin\left(\frac{a}{2^n}\right)} \right) \quad (\text{produit télescopique}) \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln \left(\frac{\sin(2a)}{2^{n+1} \times \frac{a}{2^n}} \right) = \ln \left(\frac{\sin(2a)}{2a} \right). \end{aligned}$$

$$\forall a \in]0, \frac{\pi}{2}[, \sum_{n=0}^{+\infty} \ln \left(\cos \left(\frac{a}{2^n} \right) \right) = \ln \left(\frac{\sin(2a)}{2a} \right).$$

7. Vérifions que pour tout réel x on a $\operatorname{th}(2x) = \frac{2\operatorname{th}x}{1+\operatorname{th}^2x}$. Soit $x \in \mathbb{R}$.

$$\operatorname{ch}^2 x + \operatorname{sh}^2 x = \frac{1}{4}((e^x + e^{-x})^2 + (e^x - e^{-x})^2) = \frac{1}{2}(e^{2x} + e^{-2x}) = \operatorname{ch}(2x) \text{ et } 2\operatorname{sh}x\operatorname{ch}x = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x})(e^x + e^{-x}) = \frac{1}{2}(e^{2x} - e^{-2x}) = \operatorname{sh}(2x) \text{ puis}$$

$$\frac{2\operatorname{th}x}{1+\operatorname{th}^2x} = \frac{2\operatorname{sh}x\operatorname{ch}x}{\operatorname{ch}^2x + \operatorname{sh}^2x} = \frac{\operatorname{sh}(2x)}{\operatorname{ch}(2x)} = \operatorname{th}(2x).$$

Par suite, pour $x \in \mathbb{R}^*$, $\operatorname{th}x = \frac{2}{\operatorname{th}(2x)} - \frac{1}{\operatorname{th}x}$. Mais alors, pour $a \in \mathbb{R}^*$ et $n \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n \frac{1}{2^k} \operatorname{th} \left(\frac{a}{2^k} \right) &= \sum_{k=0}^n \frac{1}{2^k} \left(\frac{2}{\operatorname{th} \frac{a}{2^{k-1}}} - \frac{1}{\operatorname{th} \frac{a}{2^k}} \right) = \sum_{k=0}^n \left(\frac{1}{2^{k-1} \operatorname{th} \frac{a}{2^{k-1}}} - \frac{1}{2^k \operatorname{th} \frac{a}{2^k}} \right) \\ &= \frac{2}{\operatorname{th}(2a)} - \frac{1}{2^n \operatorname{th} \frac{a}{2^n}} \text{ (somme télescopique)} \\ &\xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \frac{2}{\operatorname{th}(2a)} - \frac{1}{a}, \end{aligned}$$

ce qui reste vrai quand $a = 0$.

$$\forall a \in \mathbb{R}, \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{2^n} \operatorname{th} \left(\frac{a}{2^n} \right) = \frac{2}{\operatorname{th}(2a)} - \frac{1}{a}.$$

Correction de l'exercice 5 ▲

Il faut vérifier que $nu_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$. Pour $n \in \mathbb{N}$, posons $S_n = \sum_{k=0}^n u_k$. Pour $n \in \mathbb{N}$, on a

$$\begin{aligned} 0 < (2n)u_{2n} &= 2(\underbrace{u_{2n} + \dots + u_{2n}}_n) \leq 2 \sum_{k=n+1}^{2n} u_k \text{ (car la suite } u \text{ est décroissante)} \\ &= 2(S_{2n} - S_n). \end{aligned}$$

Puisque la série de terme général u_n converge, $\lim_{n \rightarrow +\infty} 2(S_{2n} - S_n) = 0$ et donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} (2n)u_{2n} = 0$.

Ensuite, $0 < (2n+1)u_{2n+1} \leq (2n+1)u_{2n} = (2n)u_{2n} + u_{2n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$. Donc les suites des termes de rangs pairs et impairs extraites de la suite $(nu_n)_{n \in \mathbb{N}}$ convergent et ont même limite à savoir 0. On en déduit que $\lim_{n \rightarrow +\infty} nu_n = 0$ ou encore que $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o\left(\frac{1}{n}\right)$.

Contre exemple avec u non monotone. Pour $n \in \mathbb{N}$, on pose $u_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n = 0 \\ \frac{1}{n} & \text{si } n \text{ est un carré parfait non nul} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$. La suite

u est positive et $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n = \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p^2} < +\infty$. Pourtant, $p^2 u_{p^2} = 1 \xrightarrow{p \rightarrow +\infty} 1$ et la suite (nu_n) admet une suite extraite convergeant vers 1. On a donc pas $\lim_{n \rightarrow +\infty} nu_n = 0$.

Correction de l'exercice 6 ▲

Soit σ une permutation de $\llbracket 1, n \rrbracket$. Montrons que la suite $S_n = \sum_{k=1}^n \frac{\sigma(k)}{k^2}$, $n \geq 1$, ne vérifie pas le critère de CAUCHY. Soit $n \in \mathbb{N}^*$.

$$\begin{aligned} S_{2n} - S_n &= \sum_{k=n+1}^{2n} \frac{\sigma(k)}{k^2} \geq \frac{1}{(2n)^2} \sum_{k=n+1}^{2n} \sigma(k) \\ &\geq \frac{1}{4n^2} (1 + 2 + \dots + n) \text{ (car les } n \text{ entiers } \sigma(k), 1 \leq k \leq n, \text{ sont strictement positifs et deux à deux distincts)} \\ &= \frac{n(n+1)}{8n^2} \geq \frac{n^2}{8n^2} = \frac{1}{8}. \end{aligned}$$

Si la suite (S_n) converge, on doit avoir $\lim_{n \rightarrow +\infty} (S_{2n} - S_n) = 0$ ce qui contredit l'inégalité précédente. Donc la série de terme général $\frac{\sigma(n)}{n^2}$, $n \geq 1$, diverge.

Correction de l'exercice 7 ▲

Pour $n \in \mathbb{N}$, posons $v_n = \ln(1 + u_n)$, $w_n = \frac{u_n}{1+u_n}$ et $t_n = \int_0^{u_n} \frac{dx}{1+x^e}$.

• Si $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$, alors $0 \leq u_n \sim_{n \rightarrow +\infty} v_n \sim_{n \rightarrow +\infty} w_n$. Dans ce cas, les séries de termes généraux u_n , v_n et w_n sont de même nature.

D'autre part, pour $n \in \mathbb{N}$, $\frac{u_n}{1+u_n^e} \leq t_n \leq u_n$ puis $\frac{1}{1+u_n^e} \leq \frac{t_n}{u_n} \leq 1$ et donc $t_n \sim_{n \rightarrow +\infty} u_n$. Les séries de termes généraux u_n et t_n sont aussi de même nature.

• Si u_n ne tend pas vers 0, la série de terme général u_n est grossièrement divergente. Puisque $u_n = e^{v_n} - 1$, v_n ne tend pas vers 0 et la série de terme général v_n est grossièrement divergente. Dans ce cas aussi, les séries de termes généraux sont de même nature.

De même, puisque $w_n = \frac{u_n}{1+u_n^e} < 1$, on a $u_n = \frac{w_n}{1-w_n}$ et w_n ne peut tendre vers 0.

Enfin, puisque u_n ne tend pas vers 0, il existe $\varepsilon > 0$ tel que pour tout entier naturel N , il existe $n = n(N) \geq N$ tel que $u_n \geq \varepsilon$. Pour cet ε et ces n , on a $t_n \geq \int_0^\varepsilon \frac{dx}{1+x^e} > 0$ (fonction continue, positive et non nulle) et la suite t_n ne tend pas vers 0. Dans le cas où u_n ne tend pas vers 0, les quatre séries sont grossièrement divergentes.

Correction de l'exercice 8 ▲

Pour $n \in \mathbb{N}$, posons $u_n = (n+1)! \left(e - \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \right)$. Soit $n \in \mathbb{N}$.

$$\begin{aligned} u_n &= \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{(n+1)!}{k!} \\ &= 1 + \frac{1}{n+2} + \frac{1}{(n+2)(n+3)} + \frac{1}{(n+2)(n+3)(n+4)} + \frac{1}{(n+2)(n+3)(n+4)(n+5)} + \sum_{k=n+6}^{+\infty} \frac{1}{(n+2)(n+3)\dots k} \end{aligned}$$

On a $0 < \sum_{k=n+6}^{+\infty} \frac{1}{(n+2)(n+3)\dots k} = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{(n+2)^{k-(n+1)}} = \frac{1}{(n+2)^5} \frac{1}{1-\frac{1}{n+2}} = \frac{1}{(n+2)^4(n+1)} \leq \frac{1}{n^5}$. On en déduit que $\sum_{k=n+6}^{+\infty} \frac{1}{(n+2)(n+3)\dots k} = o\left(\frac{1}{n^4}\right)$. Donc

$$\begin{aligned} u_n &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} 1 + \frac{1}{n+2} + \frac{1}{(n+2)(n+3)} + \frac{1}{(n+2)(n+3)(n+4)} + \frac{1}{(n+2)(n+3)(n+4)(n+5)} + o\left(\frac{1}{n^4}\right) \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} 1 + \frac{1}{n} \left(1 + \frac{2}{n}\right)^{-1} + \frac{1}{n^2} \left(1 + \frac{2}{n}\right)^{-1} \left(1 + \frac{3}{n}\right)^{-1} + \frac{1}{n^3} \left(1 + \frac{2}{n}\right)^{-1} \left(1 + \frac{3}{n}\right)^{-1} \left(1 + \frac{4}{n}\right)^{-1} + \frac{1}{n^4} + o\left(\frac{1}{n^4}\right) \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} 1 + \frac{1}{n} \left(1 - \frac{2}{n} + \frac{4}{n^2} - \frac{8}{n^3}\right) + \frac{1}{n^2} \left(1 - \frac{2}{n} + \frac{4}{n^2}\right) \left(1 - \frac{3}{n} + \frac{9}{n^2}\right) + \frac{1}{n^3} \left(1 - \frac{2}{n}\right) \left(1 - \frac{3}{n}\right) \left(1 - \frac{4}{n}\right) \\ &\quad + \frac{1}{n^4} + o\left(\frac{1}{n^4}\right) \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} 1 + \frac{1}{n} \left(1 - \frac{2}{n} + \frac{4}{n^2} - \frac{8}{n^3}\right) + \frac{1}{n^2} \left(1 - \frac{5}{n} + \frac{19}{n^2}\right) + \frac{1}{n^3} \left(1 - \frac{9}{n}\right) + \frac{1}{n^4} + o\left(\frac{1}{n^4}\right) \\ &\underset{n \rightarrow +\infty}{=} 1 + \frac{1}{n} - \frac{1}{n^2} + \frac{3}{n^4} + o\left(\frac{1}{n^4}\right). \end{aligned}$$

Finalement

$$(n+1)! \left(e - \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} 1 + \frac{1}{n} - \frac{1}{n^2} + \frac{3}{n^4} + o\left(\frac{1}{n^4}\right).$$

Correction de l'exercice 9 ▲

Pour $n \in \mathbb{N}$, posons $u_n = \sin(\pi(2 + \sqrt{3})^n)$. D'après la formule du binôme de NEWTON, $(2 + \sqrt{3})^n = A_n + B_n\sqrt{3}$ où A_n et B_n sont des entiers naturels. Un calcul conjugué fournit aussi $(2 - \sqrt{3})^n = A_n - B_n\sqrt{3}$. Par suite, $(2 + \sqrt{3})^n + (2 - \sqrt{3})^n = 2A_n$ est un entier pair. Par suite, pour $n \in \mathbb{N}$,

$$u_n = \sin(2A_n\pi - \pi(2 - \sqrt{3})^n) = -\sin(\pi(2 - \sqrt{3})^n).$$

Mais $0 < 2 - \sqrt{3} < 1$ et donc $(2 - \sqrt{3})^n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$. On en déduit que $|u_n| \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \pi(2 - \sqrt{3})^n$ terme général d'une série géométrique convergente. Donc la série de terme général u_n converge.

Correction de l'exercice 10 ▲

Pour $n \in \mathbb{N}^*$, on a $(\sqrt{u_n} - \frac{1}{n})^2$ et donc $0 \leq \frac{\sqrt{u_n}}{n} \leq \frac{1}{2}(u_n + \frac{1}{n^2})$. Comme la série terme général $\frac{1}{2}(u_n + \frac{1}{n^2})$ converge, la série de terme général $\frac{\sqrt{u_n}}{n}$ converge.

Correction de l'exercice 11 ▲

Pour $n \geq 2$, $v_n = \frac{u_n + 1 - 1}{(1+u_1)\dots(1+u_n)} = \frac{1}{(1+u_1)\dots(1+u_{n-1})} - \frac{1}{(1+u_1)\dots(1+u_n)}$ et d'autre part $v_1 = 1 - \frac{1}{1+u_1}$. Donc, pour $n \geq 2$

$$\sum_{k=1}^n v_k = 1 - \frac{1}{(1+u_1)\dots(1+u_n)} \text{ (somme télescopique).}$$

Si la série de terme général u_n converge alors $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = 0$ et donc $0 < u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln(1 + u_n)$. Donc la série de terme général $\ln(1 + u_n)$ converge ou encore la suite $(\ln(\prod_{k=1}^n (1 + u_k)))_{n \geq 1}$ converge vers un certain réel ℓ . Mais alors la suite $(\prod_{k=1}^n (1 + u_k))_{n \geq 1}$ converge vers le réel strictement positif $P = e^\ell$. Dans ce cas, la suite $(\sum_{k=1}^n v_k)_{n \geq 1}$ converge vers $1 - \frac{1}{P}$.

Si la série de terme général u_n diverge alors la série de terme général $\ln(1 + u_n)$ diverge vers $+\infty$ et il en est de même que la suite $(\prod_{k=1}^n (1 + u_k))_{n \geq 1}$. Dans ce cas, la suite $(\sum_{k=1}^n v_k)_{n \geq 1}$ converge vers 1.

Correction de l'exercice 12 ▲

Etudions tout d'abord la convergence de la série de terme général $\frac{u_n}{S_n}$.

Si $\frac{u_n}{S_n}$ tend vers 0 alors

$$0 < \frac{u_n}{S_n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} -\ln\left(1 - \frac{u_n}{S_n}\right) = \ln\left(\frac{S_{n-1}}{S_n}\right) = \ln(S_n) - \ln(S_{n-1}).$$

Par hypothèse, $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = +\infty$. On en déduit que la série de terme général $\ln(S_n) - \ln(S_{n-1})$ est divergente car $\sum_{k=1}^n \ln(S_k) - \ln(S_{k-1}) = \ln(S_n) - \ln(S_0) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$. Dans ce cas, la série de terme général $\frac{u_n}{S_n}$ diverge ce qui est aussi le cas si $\frac{u_n}{S_n}$ ne tend pas vers 0.

Donc, dans tous les cas, la série de terme général $\frac{u_n}{S_n}$ diverge.

Si $\alpha \leq 1$, puisque S_n tend vers $+\infty$, à partir d'un certain rang on a $S_n^\alpha \leq S_n$ et donc $\frac{u_n}{S_n^\alpha} \geq \frac{u_n}{S_n}$. Donc, si $\alpha \leq 1$, la série de terme général $\frac{u_n}{S_n^\alpha}$ diverge.

Si $\alpha > 1$, puisque la suite (S_n) est croissante,

$$0 < \frac{u_n}{S_n^\alpha} = \frac{S_n - S_{n-1}}{S_n^\alpha} = \int_{S_{n-1}}^{S_n} \frac{dx}{S_n^\alpha} \leq \frac{dx}{x^\alpha} = \frac{1}{\alpha-1} \left(\frac{1}{S_{n-1}^{\alpha-1}} - \frac{1}{S_n^{\alpha-1}} \right),$$

qui est le terme général d'une série télescopique convergente puisque $\frac{1}{S_n^{\alpha-1}}$ tend vers 0 quand n tend vers l'infini. Dans ce cas, la série de terme général $\frac{u_n}{S_n^\alpha}$ converge.

La série de terme général $\frac{u_n}{S_n^\alpha}$ converge si et seulement si $\alpha > 1$.

Correction de l'exercice 13 ▲

Si $\alpha < 0$, $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n^{-2\alpha}$ et si $\alpha = 0$, $u_n = 1 + (-1)^n$. Donc si $\alpha \leq 0$, u_n ne tend pas vers 0. La série de terme général u_n diverge grossièrement dans ce cas.

On suppose dorénavant que $\alpha > 0$. Pour tout entier naturel non nul n , $|u_n| \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n^\alpha}$ et donc la série de terme général u_n converge absolument si et seulement si $\alpha > 1$.

Il reste à étudier le cas où $0 < \alpha \leq 1$. On a $u_n = \frac{(-1)^n}{n^\alpha} + \frac{1}{n^{2\alpha}}$. La suite $(\frac{1}{n^\alpha})_{n \geq 1}$ tend vers 0 en décroissant et donc la série de terme général $\frac{(-1)^n}{n^\alpha}$ converge en vertu du critère spécial aux séries alternées. On en déduit que la série de terme général u_n converge si et seulement si la série de terme général $\frac{1}{n^{2\alpha}}$ converge ou encore si et seulement si $\alpha > \frac{1}{2}$.

En résumé

Si $\alpha \leq 0$, la série de terme général $\frac{1+(-1)^n n^\alpha}{n^{2\alpha}}$ diverge grossièrement,
si $0 < \alpha \leq \frac{1}{2}$, la série de terme général $\frac{1+(-1)^n n^\alpha}{n^{2\alpha}}$ diverge,
si $\frac{1}{2} < \alpha \leq 1$, la série de terme général $\frac{1+(-1)^n n^\alpha}{n^{2\alpha}}$ est semi convergente,
si $\alpha > 1$, la série de terme général $\frac{1+(-1)^n n^\alpha}{n^{2\alpha}}$ converge absolument.

Correction de l'exercice 14 ▲

Pour $n \in \mathbb{N}^*$, on note S_n la somme des n premiers termes de la série considérée et on pose $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$. Il est connu que $H_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln n + \gamma + o(1)$.

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

$$\begin{aligned} S_{m(p+q)} &= \left(1 + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{2p-1}\right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{2q}\right) + \left(\frac{1}{2p+1} + \dots + \frac{1}{4p-1}\right) - \left(\frac{1}{2q+2} + \dots + \frac{1}{4q}\right) + \dots \\ &\quad + \left(\frac{1}{2(m-1)p+1} + \dots + \frac{1}{2mp-1}\right) - \left(\frac{1}{2(m-1)q+2} + \dots + \frac{1}{2mq}\right) \\ &= \sum_{k=1}^{mp} \frac{1}{2k-1} - \sum_{k=1}^{mq} \frac{1}{2k} = \sum_{k=1}^{2mp} \frac{1}{k} - \sum_{k=1}^{mp} \frac{1}{2k} - \sum_{k=1}^{mq} \frac{1}{2k} = H_{2mp} - \frac{1}{2}(H_{mp} + H_{mq}) \\ &\underset{m \rightarrow +\infty}{=} (\ln(2mp) + \gamma) - \frac{1}{2}(\ln(mp) + \gamma + \ln(mq) + \gamma) + o(1) = \ln 2 + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{p}{q}\right) + o(1). \end{aligned}$$

Ainsi, la suite extraite $(S_{m(p+q)})_{m \in \mathbb{N}^*}$ converge vers $\ln 2 + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{p}{q}\right)$.

Montrons alors que la suite $(S_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ converge. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Il existe un unique entier naturel non nul m_n tel que $m_n(p+q) \leq n < (m_n+1)(p+q)$ à savoir $m_n = E\left(\frac{n}{p+q}\right)$.

$$\begin{aligned} |S_n - S_{m_n(p+q)}| &\leq \frac{1}{2m_n p + 1} + \dots + \frac{1}{2(m_n+1)p-1} + \frac{1}{2m_n q + 2} + \frac{1}{2(m_n+1)q} \\ &\leq \frac{p}{2m_n p + 1} + \frac{q}{2m_n q + 2} \leq \frac{1}{2m_n} + \frac{1}{2m_n} = \frac{1}{m_n}. \end{aligned}$$

Soit alors $\varepsilon > 0$.

Puisque $\lim_{n \rightarrow +\infty} m_n = +\infty$, il existe $n_0 \in \mathbb{N}^*$ tel que pour $n \geq n_0$, $\frac{1}{m_n} < \frac{\varepsilon}{2}$ et aussi $\left|S_{m_n(p+q)} - \ln 2 - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{p}{q}\right)\right| < \frac{\varepsilon}{2}$. Pour $n \geq n_0$, on a alors

$$\begin{aligned} \left| S_n - \ln 2 - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{p}{q} \right) \right| &\leq |S_n - S_{m_n(p+q)}| + \left| S_{m_n(p+q)} - \ln 2 - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{p}{q} \right) \right| \leq \frac{1}{m_n} + \left| S_{m_n(p+q)} - \ln 2 - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{p}{q} \right) \right| \\ &< \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \end{aligned}$$

On a montré que $\forall \varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N}^* / \forall n \in \mathbb{N}, (n \geq n_0 \Rightarrow |S_n - (\ln 2 + \frac{1}{2} \ln(\frac{p}{q}))| < \varepsilon)$ et donc, la série proposée converge et a pour somme $\ln 2 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{p}{q} \right)$.

Correction de l'exercice 15 ▲

La série proposée est le produit de CAUCHY de la série de terme général $\frac{1}{n^\alpha}, n \geq 1$, par elle même.

- Si $\alpha > 1$, on sait que la série de terme général $\frac{1}{n^\alpha}$ converge absolument et donc que la série proposée converge.
- Si $0 \leq \alpha \leq 1$, pour $0 < k < n$ on a $0 < k(n-k) \leq \frac{n}{2} \left(n - \frac{n}{2} \right) = \frac{n^2}{4}$. Donc $u_n \geq \frac{n-1}{\left(\frac{n^2}{4}\right)^\alpha}$ avec $\frac{n-1}{\left(\frac{n^2}{4}\right)^\alpha} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{4^\alpha}{n^{2\alpha-1}}$.

Comme $2\alpha - 1 \leq 1$, la série proposée diverge.

- Si $\alpha < 0$, $u_n \geq \frac{1}{(n-1)^\alpha}$ et donc u_n ne tend pas vers 0. Dans ce cas, la série proposée diverge grossièrement.

Correction de l'exercice 16 ▲

1. Soit $n \in \mathbb{N}$.

$$\begin{aligned} 2n^3 - 3n^2 + 1 &= 2(n+3)(n+2)(n+1) - 15n^2 - 22n - 11 = 2(n+3)(n+2)(n+1) - 15(n+3)(n+2) + 53n + 79 \\ &= 2(n+3)(n+2)(n+1) - 15(n+3)(n+2) + 53(n+3) - 80 \end{aligned}$$

Donc

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{2n^3 - 3n^2 + 1}{(n+3)!} &= \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\frac{2}{n!} - \frac{15}{(n+1)!} + \frac{53}{(n+2)!} - \frac{80}{(n+3)!} \right) = 2e - 15(e-1) + 53(e-2) - 80 \left(e - \frac{5}{2} \right) \\ &= -40e + 111. \end{aligned}$$

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{2n^3 - 3n^2 + 1}{(n+3)!} = -40e + 111.$$

2. Pour $n \in \mathbb{N}$, on a $u_{n+1} = \frac{n+1}{a+n+1} u_n$. Par suite $(n+a+1)u_{n+1} = (n+1)u_n = (n+a)u_n + (1-a)u_n$ puis

$$(1-a) \sum_{k=1}^n u_k = \sum_{k=1}^n (k+a+1)u_{k+1} - \sum_{k=1}^n (k+a)u_k = (n+a+1)u_{n+1} - (a+1)u_1 = (n+a+1)u_{n+1} - 1.$$

Si $a = 1, \forall n \in \mathbb{N}^*, u_n = \frac{1}{n+1}$. Dans ce cas, la série diverge.

Si $a \neq 1, \forall n \in \mathbb{N}^*, \sum_{k=1}^n u_k = \frac{1}{1-a} ((n+a+1)u_{n+1} - 1) = \frac{1}{a-1} - \frac{1}{a-1} (a+n+1)u_{n+1}$.

Si $a > 1$, la suite u est strictement positive et la suite des sommes partielles (S_n) est majorée par $\frac{1}{a-1}$. Donc la série de terme général u_n converge. Il en est de même de la suite $((a+n+1)u_{n+1})$. Soit $\ell = \lim_{n \rightarrow +\infty} (a+n+1)u_{n+1}$.

Si $\ell \neq 0, u_{n+1} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\ell}{n+a+1}$ contredisant la convergence de la série de terme général u_n . Donc $\ell = 0$ et

$$\text{si } a > 1, \sum_{n=1}^{+\infty} u_n = \frac{1}{a-1}.$$

Si $0 < a < 1$, pour tout $n \in \mathbb{N}^*, u_n \geq \frac{1 \times 2 \times \dots \times n}{2 \times 3 \times \dots \times (n+1)} = \frac{1}{n+1}$. Dans ce cas, la série diverge.

Correction de l'exercice 17 ▲

Pour tout entier naturel non nul n , $0 < \frac{1}{2^p n^{p-1}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{(2n)^p} \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{(n+k)^p} \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{n^p} = \frac{1}{n^{p-1}}$ et la série de terme général u_n converge si et seulement si $p > 2$.

Correction de l'exercice 18 ▲

(On applique la règle de RAABE-DUHAMEL qui n'est pas un résultat de cours.) Pour $n \in \mathbb{N}$, posons $u_n = \frac{n!}{(a+1)(a+2)\dots(a+n)}$.

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = \frac{n+1}{a+n+1} = \left(1 + \frac{1}{n}\right) \left(1 + \frac{a+1}{n}\right)^{-1} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \left(1 + \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{a+1}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} 1 - \frac{a}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right),$$

et « on sait » qu'il existe un réel strictement positif K tel que $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{K}{n^a}$.

Correction de l'exercice 19 ▲

Pour tout entier naturel non nul n , $0 < \frac{1}{2^p n^{p-1}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{(2n)^p} \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{(n+k)^p} \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{n^p} = \frac{1}{n^{p-1}}$ et la série de terme général u_n converge si et seulement si $p > 2$.

Correction de l'exercice 20 ▲

Pour $n \in \mathbb{N}^*$, posons $R_n = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2}$. Puisque la série de terme général $\frac{1}{k^2}$, $k \geq 1$, converge, la suite (R_n) est définie et tend vers 0 quand n tend vers $+\infty$.

$0 < \frac{1}{k^2} \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{k(k-1)} = \frac{1}{k-1} - \frac{1}{k}$ et puisque la série de terme général $\frac{1}{k^2}$ converge, la règle de l'équivalence des restes de séries à termes positifs convergentes permet d'affirmer que

$$\begin{aligned} R_n &= \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{k=n+1}^{+\infty} \left(\frac{1}{k-1} - \frac{1}{k} \right) \\ &= \lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{k=n+1}^N \left(\frac{1}{k-1} - \frac{1}{k} \right) \text{ (surtout ne pas décomposer en deux sommes)} \\ &= \lim_{N \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{N} \right) \text{ (somme télescopique)} \\ &= \frac{1}{n} \end{aligned}$$

ou encore $R_n = \frac{1}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)$.

Plus précisément, pour $n \in \mathbb{N}^*$, $R_n - \frac{1}{n} = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} - \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k(k-1)} = -\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2(k-1)}$.

Or $-\frac{1}{k^2(k-1)} + \frac{1}{k(k-1)(k-2)} = \frac{2}{k^2(k-1)(k-2)}$ puis $\frac{2}{k^2(k-1)(k-2)} - \frac{2}{k(k-1)(k-2)(k-3)} = -\frac{6}{k^2(k-1)(k-2)(k-3)}$ et donc

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{1}{n} - \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2(k-1)} = \frac{1}{n} - \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k(k-1)(k-2)} + \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{2}{k^2(k-1)(k-2)} \\ &= \frac{1}{n} - \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k(k-1)(k-2)} + \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{2}{k(k-1)(k-2)(k-3)} - \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{6}{k^2(k-1)(k-2)(k-3)} \end{aligned}$$

Ensuite $\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2(k-1)(k-2)(k-3)} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^5} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{4n^4}$ ou encore $-\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{6}{k^2(k-1)(k-2)(k-3)} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} -\frac{3}{2n^4} + o\left(\frac{1}{n^4}\right)$. Puis

$$\begin{aligned}\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k(k-1)(k-2)} &= \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{2} \sum_{k=n+1}^N \left(\frac{1}{(k-1)(k-2)} - \frac{1}{k(k-1)} \right) = \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{n(n-1)} - \frac{1}{N(N-1)} \right) = \frac{1}{2n(n-1)} \\ &= \frac{1}{2n^2} \left(1 - \frac{1}{n} \right)^{-1} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{1}{2n^2} + \frac{1}{2n^3} + \frac{1}{2n^4} + o\left(\frac{1}{n^4}\right)\end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned}\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{2}{k(k-1)(k-2)(k-3)} &= \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{2}{3} \sum_{k=n+1}^N \left(\frac{1}{(k-1)(k-2)(k-3)} - \frac{1}{k(k-1)(k-2)} \right) \\ &= \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{2}{3} \left(\frac{1}{n(n-1)(n-2)} - \frac{1}{N(N-1)(N-2)} \right) = \frac{2}{3n(n-1)(n-2)} \\ &= \frac{2}{3n^3} \left(1 - \frac{1}{n} \right)^{-1} \left(1 - \frac{2}{n} \right)^{-1} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{2}{3n^3} \left(1 + \frac{1}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right) \right) \left(1 + \frac{2}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right) \right) \\ &= \frac{2}{3n^3} + \frac{2}{n^4} + o\left(\frac{1}{n^4}\right)\end{aligned}$$

et finalement

$$R_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{1}{n} - \left(\frac{1}{2n^2} + \frac{1}{2n^3} + \frac{1}{2n^4} \right) + \left(\frac{2}{3n^3} + \frac{2}{n^4} \right) - \frac{3}{2n^4} + o\left(\frac{1}{n^4}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} + \frac{1}{6n^3} + o\left(\frac{1}{n^4}\right).$$

$$\boxed{\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} + \frac{1}{6n^3} + o\left(\frac{1}{n^4}\right).}$$

Correction de l'exercice 21 ▲

1. La suite $\left(\frac{\ln n}{n}\right)_{n \in \mathbb{N}^*}$ tend vers 0, en décroissant à partir du rang 3 (fourni par l'étude de la fonction $x \mapsto \frac{\ln x}{x}$ sur $[e, +\infty[$) et donc la série de terme général $(-1)^n \frac{\ln n}{n}$, $n \geq 1$, converge en vertu du critère spécial aux séries alternées. Pour $n \in \mathbb{N}^*$, on pose $R_n = \sum_{p=n+1}^{+\infty} (-1)^p \frac{\ln p}{p}$.

$(-1)^k \frac{\ln k}{k}$ n'est pas de signe constant à partir d'un certain rang et on ne peut donc lui appliquer la règle de l'équivalence des restes.

Par contre, puisque la série de terme général $(-1)^k \frac{\ln k}{k}$ converge, on sait que l'on peut associer les termes à volonté et pour $k \in \mathbb{N}^*$, on a

$$R_{2k-1} = \sum_{p=2k}^{+\infty} (-1)^p \frac{\ln p}{p} = \sum_{p=k}^{+\infty} \left(\frac{\ln(2p)}{2p} - \frac{\ln(2p+1)}{2p+1} \right).$$

Puisque la fonction $x \mapsto \frac{\ln x}{x}$ est décroissante sur $[e, +\infty[$ et donc sur $[3, +\infty[$, pour $p \geq 2$, $\frac{\ln(2p)}{2p} - \frac{\ln(2p+1)}{2p+1} \geq 0$ et on peut utiliser la règle de l'équivalence des restes de séries à termes positifs convergentes.

Cherchons déjà un équivalent plus simple de $\frac{\ln(2p)}{2p} - \frac{\ln(2p+1)}{2p+1}$ quand p tend vers $+\infty$.

$$\begin{aligned}\frac{\ln(2p)}{2p} - \frac{\ln(2p+1)}{2p+1} &= \frac{\ln(2p)}{2p} - \frac{1}{2p} \left(\ln(2p) + \ln\left(1 + \frac{1}{2p}\right) \right) \left(1 + \frac{1}{2p} \right)^{-1} \\ &\underset{p \rightarrow +\infty}{=} \frac{\ln(2p)}{2p} - \frac{1}{2p} \left(\ln(2p) + \frac{1}{2p} + o\left(\frac{1}{p}\right) \right) \left(1 - \frac{1}{2p} + o\left(\frac{1}{p}\right) \right) \\ &\underset{p \rightarrow +\infty}{=} \frac{\ln(2p)}{4p^2} + o\left(\frac{\ln p}{p^2}\right) \underset{p \rightarrow +\infty}{=} \frac{\ln p + \ln 2}{4p^2} + o\left(\frac{\ln p}{p^2}\right) \\ &\underset{p \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\ln p}{4p^2}.\end{aligned}$$

et donc $R_{2k-1} \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{4} \sum_{p=k}^{+\infty} \frac{\ln p}{p^2}$.

Cherchons maintenant un équivalent simple de $\frac{\ln p}{p^2}$ de la forme $v_p - v_{p+1}$.

Soit $v_p = \frac{\ln p}{p} - \frac{\ln(p+1)}{p+1}$ (suggéré par $\left(\frac{\ln x}{x}\right)' = \frac{1-\ln x}{x^2} \underset{x \rightarrow +\infty}{\sim} -\frac{\ln x}{x^2}$). Alors

$$v_p - v_{p+1} = \frac{\ln p}{p} - \frac{1}{p} \left(\ln p + \ln \left(1 + \frac{1}{p} \right) \right) \left(1 + \frac{1}{p} \right)^{-1} \underset{p \rightarrow +\infty}{=} \frac{\ln p}{p} - \frac{1}{p} \left(\ln p + \frac{1}{p} + o\left(\frac{1}{p}\right) \right) \left(1 - \frac{1}{p} + o\left(\frac{1}{p}\right) \right) \underset{p \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\ln p}{p^2}.$$

D'après la règle de l'équivalence des restes de séries à termes positifs convergentes, $R_{2k-1} \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{4} \sum_{p=k}^{+\infty} \left(\frac{\ln p}{p} - \frac{\ln(p+1)}{p+1} \right) \frac{\ln k}{4k}$ (série télescopique).

Puis, $R_{2k} = R_{2k-1} - \frac{\ln(2k)}{2k} \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\ln k}{4k} - \frac{\ln(2k)}{2k} + o\left(\frac{\ln k}{k}\right) \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\ln k}{4k} - \frac{\ln k}{2k} + o\left(\frac{\ln k}{k}\right) \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} -\frac{\ln k}{4k} + o\left(\frac{\ln k}{k}\right)$.

En résumé, $R_{2k-1} \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\ln k}{4k}$ et $R_{2k} \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} -\frac{\ln k}{4k}$.

On peut unifier : $R_{2k-1} \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\ln k}{4k}$ $\underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\ln(2k-1)}{2(2k-1)}$ et $R_{2k} \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} -\frac{\ln k}{4k} \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} -\frac{\ln(2k)}{2(2k)}$. Finalement,

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

2. $\sum n^n$ est une série à termes positifs grossièrement divergente.

1 ère solution.

$0 < n^n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n^n - (n-1)^{n-1}$ car $\frac{n^n - (n-1)^{n-1}}{n^n} = 1 - \frac{1}{n-1} \left(1 - \frac{1}{n} \right)^n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} 1 - \frac{1}{ne} + o\left(\frac{1}{n}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{\rightarrow} 1$.

D'après la règle de l'équivalence des sommes partielles de séries à termes positifs divergentes,

$$\sum_{p=1}^n p^p \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{p=2}^n p^p \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sum_{p=2}^n (p^p - (p-1)^{p-1}) = n^n - 1 \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n^n.$$

(La somme est équivalente à son dernier terme.)

2 ème solution. Pour $n \geq 3$, $0 \leq \frac{1}{n^n} \sum_{p=1}^{n-2} p^p \leq \frac{1}{n^n} \times (n-2)(n-2)^{n-2} \leq \frac{n^{n-1}}{n^n} = \frac{1}{n}$. Donc $\frac{1}{n^n} \sum_{p=1}^{n-2} p^p$. On en déduit que $\frac{1}{n^n} \sum_{p=1}^n p^p = 1 + \frac{(n-1)^{n-1}}{n^n} + \frac{1}{n^n} \sum_{p=1}^{n-2} p^p \underset{n \rightarrow +\infty}{=} 1 + o(1) + o(1) = 1 + o(1)$.

$$\sum_{p=1}^n p^p \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n^n.$$

Correction de l'exercice 22 ▲

Soit $p \in \mathbb{N}^*$. Pour $n \in \mathbb{N}^* \setminus \{p\}$, $\frac{1}{n^2-p^2} = \frac{1}{2p} \left(\frac{1}{n-p} - \frac{1}{n+p} \right)$. Donc pour $N > p$,

$$\begin{aligned} \sum_{1 \leq n \leq N, n \neq p} \frac{1}{n^2-p^2} &= \frac{1}{2p} \sum_{1 \leq n \leq N, n \neq p} \left(\frac{1}{n-p} - \frac{1}{n+p} \right) = \frac{1}{2p} \left(\sum_{1-p \leq k \leq N-p, k \neq 0} \frac{1}{k} - \sum_{p+1 \leq k \leq N+p, k \neq 2p} \frac{1}{k} \right) \\ &= \frac{1}{2p} \left(-\sum_{k=1}^{p-1} \frac{1}{k} + \sum_{k=1}^{N-p} \frac{1}{k} - \sum_{k=1}^{N+p} \frac{1}{k} + \frac{1}{2p} + \sum_{k=1}^p \frac{1}{k} \right) = \frac{1}{2p} \left(\frac{3}{2p} - \sum_{k=N-p+1}^{N+p} \frac{1}{k} \right) \end{aligned}$$

Maintenant, $\sum_{k=N-p+1}^{N+p} \frac{1}{k} = \frac{1}{N-p+1} + \dots + \frac{1}{N+p}$ est une somme de $2p-1$ termes tendant vers 0 quand N tend vers $+\infty$. Puisque $2p-1$ est constant quand N varie, $\lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{k=N-p+1}^{N+p} \frac{1}{k} = 0$ et donc

$$\sum_{n \in \mathbb{N}^*, n \neq p} \frac{1}{n^2-p^2} = \frac{1}{2p} \times \frac{3}{2p} = \frac{3}{4p^2} \text{ puis } \sum_{p \in \mathbb{N}^*} \left(\sum_{n \in \mathbb{N}^*, n \neq p} \frac{1}{n^2-p^2} \right) = \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{3}{4p^2} = \frac{\pi^2}{8}.$$

Pour $n \in \mathbb{N}^*$ donné, on a aussi $\sum_{p \in \mathbb{N}^*, p \neq n} \frac{1}{n^2-p^2} = -\sum_{p \in \mathbb{N}^*, p \neq n} \frac{1}{p^2-n^2} = -\frac{3}{4n^2}$ et donc

$$\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \left(\sum_{p \in \mathbb{N}^*, p \neq n} \frac{1}{n^2 - p^2} \right) = -\frac{\pi^2}{8}.$$

On en déduit que la suite double $\left(\frac{1}{n^2 - p^2} \right)_{(n,p) \in (\mathbb{N}^*)^2, n \neq p}$ n'est pas sommable.

Correction de l'exercice 23 ▲

La suite $\left((-1)^n \frac{1}{3n+1} \right)_{n \in \mathbb{N}}$ est alternée en signe et sa valeur absolue tend vers 0 en décroissant. Donc la série de terme général $(-1)^n \frac{1}{3n+1}$, $n \geq 1$, converge en vertu du critère spécial aux séries alternées.

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

$$\sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{3k+1} = \sum_{k=0}^n (-1)^k \int_0^1 t^{3k} dt = \int_0^1 \frac{1 - (-t^3)^{n+1}}{1 - (-t^3)} dt = \int_0^1 \frac{1}{1+t^3} dt + (-1)^n \int_0^1 \frac{t^{3n+3}}{1+t^3} dt.$$

Mais $\left| (-1)^n \int_0^1 \frac{t^{3n+3}}{1+t^3} dt \right| = \int_0^1 \frac{t^{3n+3}}{1+t^3} dt \leq \int_0^1 t^{3n+3} dt = \frac{1}{3n+4}$. On en déduit que $(-1)^n \int_0^1 \frac{t^{3n+3}}{1+t^3} dt$ tend vers 0 quand n tend vers $+\infty$ et donc que

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{3n+1} = \int_0^1 \frac{1}{1+t^3} dt.$$

Calculons cette dernière intégrale.

$$\begin{aligned} \frac{1}{X^3+1} &= \frac{1}{(X+1)(X+j)(X+j^2)} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{X+1} + \frac{j}{X+j} + \frac{j^2}{X+j^2} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{X+1} + \frac{-X+2}{X^2-X+1} \right) \\ &= \frac{1}{3} \left(\frac{1}{X+1} - \frac{1}{2} \frac{2X-1}{X^2-X+1} + \frac{3}{2} \frac{1}{(X-\frac{1}{2})^2 + (\frac{\sqrt{3}}{2})^2} \right). \end{aligned}$$

Donc,

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{3n+1} = \frac{1}{3} \left[\ln(t+1) - \frac{1}{2} \ln(t^2-t+1) + \sqrt{3} \arctan \left(\frac{2t-1}{\sqrt{3}} \right) \right]_0^1 = \frac{1}{3} \left(\ln 2 + \sqrt{3} \left(\frac{\pi}{6} - \left(-\frac{\pi}{6} \right) \right) \right) = \frac{3 \ln 2 + \pi \sqrt{3}}{9}.$$

$$\boxed{\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{3n+1} = \frac{3 \ln 2 + \pi \sqrt{3}}{9}.}$$

Correction de l'exercice 24 ▲

Pour tout entier $n \geq 2$, on a $nv_n - (n-1)v_{n-1} = u_n$ ce qui reste vrai pour $n = 1$ si on pose de plus $v_0 = 0$. Par suite, pour $n \in \mathbb{N}^*$

$$\begin{aligned} v_n^2 - 2u_nv_n &= v_n^2 - 2(nv_n - (n-1)v_{n-1})v_n = -(2n-1)v_n^2 + 2(n-1)v_{n-1}v_n \\ &\leq -(2n-1)v_n^2 + (n-1)(v_{n-1}^2 + v_n^2) = (n-1)v_{n-1}^2 - nv_n^2. \end{aligned}$$

Mais alors, pour $N \in \mathbb{N}^*$,

$$\sum_{n=1}^N (v_n^2 - 2u_nv_n) \leq \sum_{n=1}^N ((n-1)v_{n-1}^2 - nv_n^2) = -nv_N^2 \leq 0.$$

Par suite,

$$\sum_{n=1}^N v_n^2 \leq \sum_{n=1}^N 2u_nv_n \leq 2 \left(\sum_{n=1}^N u_n^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{n=1}^N v_n^2 \right)^{1/2} \text{ (inégalité de CAUCHY-SCHWARZ).}$$

Si $\left(\sum_{n=1}^N v_n^2 \right)^{1/2} > 0$, on obtient après simplification par $\left(\sum_{n=1}^N v_n^2 \right)^{1/2}$ puis élévation au carré

$$\sum_{n=1}^N v_n^2 \leq 4 \sum_{n=1}^N u_n^2,$$

cette inégalité restant claire si $(\sum_{n=1}^N v_n^2)^{1/2} = 0$. Finalement,

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

La suite des sommes partielles de la série de terme général $v_n^2 (\geq 0)$ est majorée. Donc la série de terme général v_n^2 converge et de plus, quand N tend vers l'infini, on obtient

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

Correction de l'exercice 25 ▲

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

$$\begin{aligned} u_n &= \frac{\pi}{4} - \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{2k+1} = \int_0^1 \frac{1}{1+t^2} dt - \sum_{k=0}^n (-1)^k \int_0^1 t^{2k} dt = \int_0^1 \frac{1}{1+t^2} dt - \int_0^1 \frac{1 - (-t^2)^{n+1}}{1+t^2} dt \\ &= (-1)^{n+1} \int_0^1 \frac{t^{2n+2}}{1+t^2} dt. \end{aligned}$$

Par suite, pour $N \in \mathbb{N}$,

$$\sum_{n=0}^N u_n = \int_0^1 \sum_{n=0}^N \frac{(-t^2)^{n+1}}{1+t^2} dt = \int_0^1 (-t^2) \frac{1 - (-t^2)^{N+1}}{(1+t^2)^2} dt = - \int_0^1 \frac{t^2}{(1+t^2)^2} dt + (-1)^{N+1} \int_0^1 \frac{t^{2N+2}}{(1+t^2)^2} dt.$$

Or $\left| (-1)^{N+1} \int_0^1 \frac{t^{2N+2}}{(1+t^2)^2} dt \right| = \int_0^1 \frac{t^{2N+2}}{(1+t^2)^2} dt \leq \int_0^1 t^{2N+2} dt = \frac{1}{2N+3}$. Comme $\frac{1}{2N+3}$ tend vers 0 quand N tend vers $+\infty$, il en est de même de $(-1)^{N+1} \int_0^1 \frac{t^{2N+2}}{(1+t^2)^2} dt$. On en déduit que la série de terme général u_n , $n \in \mathbb{N}$, converge et de plus

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{+\infty} u_n &= - \int_0^1 \frac{t^2}{(1+t^2)^2} dt = \int_0^1 \frac{t}{2} \times \frac{-2t}{(1+t^2)^2} dt \\ &= \left[\frac{t}{2} \times \frac{1}{1+t^2} \right]_0^1 - \int_0^1 \frac{1}{2} \times \frac{1}{1+t^2} dt = \frac{1}{4} - \frac{\pi}{8}. \end{aligned}$$

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \left(\frac{\pi}{4} - \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{2k+1} \right) = \frac{1}{4} - \frac{\pi}{8}.$$