

# Feuille d'exercices n°20 : corrigé

MPSI Lycée Camille Jullian

2 avril 2026

## Exercice 1 (\* à \*\*\*)

Ligne par ligne :

- En écrivant  $\frac{n-1}{3^n} = \frac{1}{3} \times \frac{n}{3^{n-1}} - \frac{1}{3^n}$ , on reconnaît une somme de deux séries géométriques

(dont une dérivée) convergentes, et on calcule facilement  $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n-1}{3^n} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{(1-\frac{1}{3})^2} - \frac{1}{1-\frac{1}{3}} =$

$\frac{1}{3} \times \frac{9}{4} - \frac{3}{2} = -\frac{3}{4}$  (il est normal que le résultat soit négatif, le premier terme de la somme est égal à  $-1$  et les autres sont trop petits pour le compenser).

- On peut écrire, à partir de  $n=2$  (les deux premiers termes de la série sont de toute façon nuls),  $\frac{n(n-1)}{n!} = \frac{1}{(n-2)!}$ , ce qui permet de reconnaître une série exponentielle convergente

et de calculer  $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n(n-1)x^n}{n!} = \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{x^n}{(n-2)!} = x^2 \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{x^n}{n!} = x^2 e^x$ .

- Inutile de beaucoup se fatiguer ici,  $\frac{2n^2}{n^3-1} \sim \frac{2}{n}$ , terme général d'une série divergente, donc notre série diverge (elle est à termes positifs à partir du rang 2).

- On peut écrire  $\frac{1}{2^{2n+1}} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{4^n}$  pour reconnaître une série géométrique convergente, de somme  $\frac{1}{2} \times \frac{1}{1-\frac{1}{4}} = \frac{2}{3}$ .

- Rien à faire ici, c'est un exemple direct de série exponentielle, de somme  $4e^{-1} = \frac{4}{e}$ .

- La série est à termes positifs et son terme général est équivalent à  $\frac{1}{n^3}$ , donc elle converge (comparaison avec une série de Riemann). Pour calculer sa somme, il faut faire un télescopage, en commençant par écrire  $\frac{1}{n(n+1)(n+2)} = \frac{a}{n} + \frac{b}{n+1} + \frac{c}{n+2}$ . En multipliant l'égalité

par  $n$  et en évaluant pour  $n=0$ , on trouve  $a = \frac{1}{2}$ . De même, en multipliant par  $n+1$  et en prenant  $n=-1$  on a  $b = -1$ . On trouve de même  $c = \frac{1}{2}$ , soit  $\frac{1}{n(n+1)(n+2)} = \frac{1}{2n} - \frac{1}{n+1} + \frac{1}{2(n+2)}$ . Pour effectuer le télescopage, on travaille avec les sommes partielles :

$$\sum_{n=1}^p \frac{1}{n(n+1)(n+2)} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^p \frac{1}{n} - \sum_{n=1}^p \frac{1}{n+1} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^p \frac{1}{n+2} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^p \frac{1}{n} - \sum_{n=2}^{p+1} \frac{1}{n} + \frac{1}{2} \sum_{n=3}^{p+2} \frac{1}{n} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} - \frac{1}{2} - \frac{1}{p+1} + \frac{1}{2(p+1)} + \frac{1}{2(p+2)} = \frac{1}{4} - \frac{1}{2(p+1)} + \frac{1}{2(p+2)}$$

Il y a bien convergence, vers la somme suivante :  $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n(n+1)(n+2)} = \frac{1}{4}$ .

- Encore des géométriques à faire apparaître :  $\frac{3+n2^n}{4^{n+2}} = \frac{3}{16} \times \frac{1}{4^n} + \frac{1}{32} \times \frac{n}{2^{n-1}}$ , tout converge et  $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{3+n2^n}{4^{n+2}} = \frac{3}{16} \times \frac{1}{1-\frac{1}{4}} + \frac{1}{32} \times \frac{1}{(1-\frac{1}{2})^2} = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} = \frac{3}{8}$ .
- Il y a un télescopage tout simple, mais il n'est même pas utile de s'en rendre compte :  $\ln\left(\frac{n+1}{n}\right) = \ln\left(1+\frac{1}{n}\right) \sim \frac{1}{n}$ , donc la série diverge (elle est à termes positifs).
- Le terme général de cette série (positive à partir de  $n=1$ ) étant équivalent à  $\frac{1}{4n^2}$ , elle converge. De plus,  $\frac{1}{4n^2-1} = \frac{a}{2n+1} + \frac{b}{2n-1}$ , avec  $a(2n-1)+b(2n+1)=1$  (pour changer, on met tout au même dénominateur et on identifie), soit  $a+b=0$  et  $b-a=1$ , donc  $b=\frac{1}{2}$  et  $a=-\frac{1}{2}$ . On en déduit que  $\sum_{k=0}^n \frac{1}{4k^2-1} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^n \frac{1}{2k-1} - \frac{1}{2} \sum_{k=0}^n \frac{1}{2k+1} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^n \frac{1}{2k-1} - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n+1} \frac{1}{2k+1} = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2(2n+1)}$ . La série converge donc vers  $-\frac{1}{2}$ .
- Il suffit de se souvenir que  $\text{ch}(n) = \frac{e^n + e^{-n}}{2}$  pour écrire notre série comme somme de deux séries géométriques convergentes :  $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{\text{ch}(n)}{3^n} = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\frac{e}{3}\right)^n + \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(3e)^n} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{1-\frac{e}{3}} + \frac{1}{1-\frac{1}{3e}} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{3}{3-e} + \frac{3e}{3e-1} \right)$  (inutile de tenter de simplifier plus).
- Le terme général de cette série à termes positifs est équivalent à  $\frac{5}{4n^2}$ , elle converge donc. On effectue une décomposition en éléments simples :  $\frac{5}{(2n+1)(2n+3)} = \frac{a}{2n+1} + \frac{b}{2n+3} = \frac{a(2n+3)+b(2n+1)}{(2n+1)(2n+3)}$ . Par identification, on obtient  $2a+2b=0$ , soit  $b=-a$ , et  $3a+b=5$ , dont on déduit  $a=\frac{5}{2}$  et  $b=-\frac{5}{2}$ . Autrement dit,  $\sum_{n=0}^p \frac{5}{(2n+1)(2n+3)} = \frac{5}{2} \sum_{n=0}^p \frac{1}{2n+1} - \frac{5}{2} \sum_{n=0}^p \frac{1}{2n+3} = \frac{5}{2} \sum_{n=0}^p \frac{1}{2n+1} - \frac{5}{2} \sum_{n=1}^{p+1} \frac{1}{2n+1} = \frac{5}{2} - \frac{5}{2(2p+3)}$ . Il y a bien convergence de la série, vers  $\frac{5}{2}$ .
- Si on tient vraiment à prouver la convergence avant d'essayer de calculer la somme, on peut trouver un équivalent du terme général à coup de développements limités. On peut aussi anticiper le télescopage et calculer directement la somme partielle :  $\sum_{k=2}^n \frac{1}{\sqrt{k-1}} + \frac{1}{\sqrt{k+1}} - \frac{2}{\sqrt{k}} = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{\sqrt{k}} + \sum_{k=3}^{n+1} \frac{1}{\sqrt{k}} - \sum_{k=2}^n \frac{2}{\sqrt{k}} = 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{n}} + \frac{1}{\sqrt{n+1}} - \frac{2}{\sqrt{2}} - \frac{2}{\sqrt{n}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{n}} + \frac{1}{\sqrt{n+1}}$ , qui converge vers la somme  $1 - \frac{1}{\sqrt{2}}$ .
- On constate ici que  $e^{-nx} = (e^{-x})^n$ . On est donc en présence d'une simple série géométrique de raison  $e^{-x}$ . Cette série convergera donc si et seulement si  $x > 0$  (condition pour que  $e^{-x} \in ]-1, 1[$ ), vers  $\frac{1}{1-e^{-x}} = \frac{e^x}{e^x-1}$ .
- En posant  $u_n = \cos\left(\frac{a}{2^n}\right)$ , un calcul classique permet d'obtenir que  $u_n \times \sin\left(\frac{a}{2^n}\right) = \frac{1}{2} \sin\left(\frac{a}{2^{n-1}}\right)$ . Une récurrence facile permet alors d'écrire que  $\prod_{k=1}^n \cos\left(\frac{a}{2^k}\right) = \frac{\sin(a)}{2^n \sin\left(\frac{a}{2^n}\right)}$  : c'est vrai pour  $n=1$

puisque  $\frac{\sin(a)}{2 \sin(\frac{a}{2})} = \frac{2 \sin(\frac{a}{2}) \cos(\frac{a}{2})}{2 \sin(\frac{a}{2})} = \cos\left(\frac{a}{2}\right)$  (on a simplement utilisé la formule de duplication du sinus dans un sens inhabituel au numérateur), et si on suppose la formule vraie au rang  $n$ , alors  $\prod_{k=1}^{n+1} \cos\left(\frac{a}{2^k}\right) = \frac{\sin(a)}{2^n \sin(\frac{a}{2^n})} \cos\left(\frac{a}{2^{n+1}}\right) = \frac{\sin(a)}{2^{n+1} \sin(\frac{a}{2^{n+1}})}$  en exploitant le calcul préliminaire. Revenons alors à notre calcul de somme initial. Déjà, pour être rigoureux, on élimine les valeurs posant problème, du type  $a = 0$ , où la série est nulle de façon triviale (puisque tous les cosinus sont alors égaux à 1). Ensuite, on écrit  $S_n = \sum_{k=1}^n \ln\left(\cos\left(\frac{a}{2^k}\right)\right) = \ln\left(\prod_{k=1}^n \cos\left(\frac{a}{2^k}\right)\right) = \ln\left(\frac{\sin(a)}{2^n \sin(\frac{a}{2^n})}\right) = \ln(\sin(a)) - \ln\left(2^n \sin\left(\frac{a}{2^n}\right)\right)$ . Comme  $\frac{a}{2^n}$  tend vers 0 quand  $n$  tend vers  $+\infty$ , on peut écrire  $\sin\left(\frac{a}{2^n}\right) \sim \frac{a}{2^n}$ , donc  $\lim_{n \rightarrow +\infty} 2^n \sin\left(\frac{a}{2^n}\right) = a$ . On en déduit que  $S_n$  converge vers  $\ln(\sin(a)) - \ln(a) = \ln\left(\frac{\sin(a)}{a}\right)$ . On a supposé  $a > 0$  pour les calculs, mais quitte à changer certains signes, le résultat reste valable pour  $a < 0$ .

- Commençons par constater que  $\binom{n}{p} x^n = \frac{n(n-1)\dots(n-p+1)}{p!} x^n \sim \frac{n^p x^n}{p!}$  lorsque  $n$  tend vers  $+\infty$  (d'ailleurs, le terme général de la série n'est défini que pour  $n \geq p$ ). Par croissance comparée,  $n^p = o\left(\frac{1}{x^n}\right)$  quelle que soit la valeur de  $p$ . En particulier, on peut affirmer que  $\frac{n^{p+2} x^n}{p!}$  tend vers 0, et donc que  $\frac{n^p x^n}{p!} = o\left(\frac{1}{n^2}\right)$ , ce qui suffit à assurer la convergence de notre série (comparaison à une série de Riemann convergente). Notons désormais  $S_p(x) = \sum_{n=p}^{+\infty} \binom{n}{p} x^n$ . En exploitant la relation de Pascal, on a  $S_p(x) = \sum_{n=p}^{+\infty} \binom{n+1}{p+1} x^n - \sum_{n=p}^{+\infty} \binom{n}{p+1} x^n = \sum_{n=p+1}^{+\infty} \binom{n}{p+1} x^{n-1} - \sum_{n=p+1}^{+\infty} \binom{n}{p+1} x^n = \frac{1}{x} S_{p+1}(x) - S_{p+1}(x)$  (si  $x = 0$ , le calcul n'a aucun intérêt puisque  $S_p(x) = 0$ ). On a donc  $S_{p+1}(x) = \frac{x}{1-x} S_p(x)$ , puis par récurrence triviale  $S_p(x) = \frac{x^p}{(1-x)^p} S_0(x)$ . Or,  $S_0(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} x^n = \frac{1}{1-x}$ . On en déduit que  $S_p(x) = \frac{x^p}{(1-x)^{p+1}}$ .

## Exercice 2 (\*\*)

1. On montre par une récurrence facile que  $\forall n \in \mathbb{N}, u_n > 0$ . En effet, c'est vrai pour  $u_0$ , et si on le suppose vrai pour  $u_n$ , comme  $e^{-u_n} > 0$ , on aura bien  $u_{n+1} = e^{-u_n} u_n > 0$ . De plus, comme  $u_n > 0$ , on a  $e^{-u_n} < 1$ , et donc  $e^{-u_n} u_n < u_n$ . Autrement dit, la suite  $(u_n)$  est décroissante. Comme elle est minorée par 0, elle converge vers une certaine limite  $l$ . On en déduit que  $e^{-u_n} u_n$  tend vers  $le^{-l}$ , mais aussi vers  $l$  puisque cette expression est égale à  $u_{n+1}$ . On en déduit que  $l = le^{-l}$ , ce qui se produit si  $l = 0$  ou si  $e^{-l} = 1$ , ce qui ne laisse que la possibilité  $l = 0$ . La suite  $(u_n)$  converge donc vers 0.
2. On remarque que  $v_{n+1} = \ln(u_{n+1}) = \ln(e^{-u_n} u_n) = -u_n + \ln u_n = v_n - u_n$ , ce qu'on peut aussi écrire  $u_n = v_n - v_{n+1}$ . On en déduit que  $S_n = \sum_{k=0}^n u_k = \sum_{k=0}^n (v_k - v_{k+1}) = v_0 - v_{n+1}$  (il y a télescopage).
3. Comme  $u_n$  tend vers 0, la suite  $(v_n)$  diverge vers  $-\infty$  quand  $n$  tend vers  $+\infty$ , et la série  $(S_n)$

diverge donc vers  $+\infty$ .

### Exercice 3 (\*)

Comme la série de terme général  $\frac{1}{n^2}$  est une série de Riemann convergente, on sait que son reste converge vers 0. On va tout de même commencer par travailler avec des sommes partielles (ou plutôt des restes partiels). Sur l'intervalle  $[k, k+1]$ , on a l'encadrement  $\frac{1}{(k+1)^2} \leq \frac{1}{x^2} \leq \frac{1}{k^2}$  par décroissance de la fonction  $x \mapsto \frac{1}{x^2}$ . En intégrant cet encadrement, on obtient  $\frac{1}{(k+1)^2} \leq \int_k^{k+1} \frac{1}{x^2} dx \leq \frac{1}{k^2}$ , soit  $\frac{1}{(k+1)^2} \leq \frac{1}{k} - \frac{1}{k+1} \leq \frac{1}{k^2}$  (encadrement qui est en l'occurrence facile à obtenir sans calculer d'intégrale). Si on somme l'inégalité de droite pour  $k$  variant entre  $n$  (qu'on fixera désormais) et  $p$  (qui va ensuite tendre vers  $+\infty$ ), on trouve alors  $\sum_{k=n}^p \frac{1}{k^2} \geq \sum_{k=n}^p \frac{1}{k} - \frac{1}{k+1} = \frac{1}{n} - \frac{1}{p+1}$  (télescopage dans la somme de droite). De même, en sommant les inégalités de gauche pour  $k$  variant entre  $n-1$  et  $p-1$  (pour avoir des  $\frac{1}{(k+1)^2}$  variant entre  $\frac{1}{n^2}$  et  $\frac{1}{p^2}$ ), on obtient l'autre inégalité  $\sum_{k=n}^p \frac{1}{k^2} \leq \sum_{k=n-1}^{p-1} \frac{1}{k} - \frac{1}{k+1} = \frac{1}{n-1} - \frac{1}{p}$ . Autrement dit, on a prouvé que  $\frac{1}{n} - \frac{1}{p+1} \leq \sum_{k=n}^p \frac{1}{k^2} \leq \frac{1}{n-1} - \frac{1}{p}$ . En multipliant tout par  $n$ , on a donc  $1 - \frac{n}{p+1} \leq n \sum_{k=n}^p \frac{1}{k^2} \leq \frac{n}{n-1} - \frac{n}{p}$ . Lorsqu'on fait tendre  $p$  vers  $+\infty$  à  $n$  fixé, les deux membres extrêmes convergent (mais pas vers 1, attention à la rigueur!), et on en déduit que  $1 \leq \lim_{p \rightarrow +\infty} n \sum_{k=n}^p \frac{1}{k^2} \leq \frac{n}{n-1}$ , soit  $1 \leq nR_n \leq \frac{n}{n-1}$ . On peut maintenant faire tendre  $n$  vers  $+\infty$  pour trouver, par application du théorème des gendarmes cette fois-ci,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} nR_n = 1$ , soit  $R_n = \sum_{k=n}^{+\infty} \frac{1}{k^2} \sim \frac{1}{n}$ .

La généralisation se fait exactement de la même façon : sur  $[k, k+1]$ ,  $\frac{1}{(k+1)^\alpha} \leq \frac{1}{x^\alpha} \leq \frac{1}{k^\alpha}$ , ce qui donne par intégration  $\frac{1}{(k+1)^\alpha} \leq \frac{1}{(1-\alpha)(k+1)^{1-\alpha}} - \frac{1}{(1-\alpha)k^{1-\alpha}} \leq \frac{1}{k^\alpha}$ . Une somme télescopique plus tard, on trouve  $\frac{1}{(1-\alpha)(p+1)^{1-\alpha}} - \frac{1}{(1-\alpha)n^{1-\alpha}} \leq \sum_{k=n}^p \frac{1}{k^\alpha} \leq \frac{1}{(1-\alpha)p^{1-\alpha}} - \frac{1}{(1-\alpha)(n-1)^{1-\alpha}}$ . Comme précédemment, un premier passage à la limite sur  $p$  permet d'obtenir l'encadrement  $1 \leq (1-\alpha)n^{1-\alpha}R_n \leq \left(\frac{n}{n+1}\right)^{1-\alpha}$ , puis le théorème des gendarmes donne l'équivalent  $R_n \sim \frac{1}{(1-\alpha)n^{1-\alpha}}$ .

### Exercice 4 (\*\*\*)

1. On peut commencer par constater assez aisément que la suite  $(u_n)$  est décroissante puisque  $u_{n+1} - u_n = -u_n^2 \leq 0$ . Cela donne bien envie de tenter de la minorer, par exemple par 0. Prouvons via une petite récurrence que tous les termes de la suite appartiennent à l'intervalle  $]0, 1[$ . C'est vrai pour  $u_0$  par hypothèse. Supposons donc  $0 \leq u_n \leq 1$ , on a alors également  $0 \leq 1 - u_n \leq 1$ , donc  $0 \leq u_n(1 - u_n) \leq 1$ . Or,  $u_n(1 - u_n) = u_n - u_n^2 = u_{n+1}$ . Cette constatation achève la récurrence. La suite  $(u_n)$  étant décroissante minorée, elle converge. Comme  $u_{n+1} = u_n - u_n^2$ , on en déduit en prenant la limite de chaque côté que  $l = l - l^2$ , soit

$-l^2 = 0$ , ce qui n'est possible que si  $l = 0$ . On peut en déduire que la suite  $(u_n)$  converge vers 0.

2. En revenant à la relation de récurrence, on constate que  $u_n^2 = u_n - u_{n+1}$ , d'où  $\sum_{k=0}^{k=n} u_k^2 = \sum_{k=0}^{k=n} u_k - u_{k+1} = u_0 - u_{n+1}$  (par télescopage). D'après la question précédente,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_0 - u_{n+1} = u_0$ , donc la série de terme général  $u_n^2$  converge vers  $u_0$ .

3. La somme partielle va également être télescopique :  $\sum_{k=0}^{k=n} \ln\left(\frac{u_{k+1}}{u_k}\right) = \sum_{k=0}^{k=n} \ln(u_{k+1}) - \ln(u_k) = \ln(u_{n+1}) - \ln(u_0)$ . Or, toujours en utilisant notre connaissance de la limite de  $(u_n)$ , on a  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \ln(u_{n+1}) = -\infty$ , ce qui signifie que la série considérée diverge.

4. En reprenant la relation de récurrence définissant la suite, on constate que  $\ln\left(\frac{u_{n+1}}{u_n}\right) = \ln\left(\frac{u_n - u_n^2}{u_n}\right) = \ln(1 - u_n) \sim -u_n$  puisque  $u_n$  est une suite qui converge vers 0. La série  $\sum -u_n$  (qui est à termes négatifs) diverge donc, et  $\sum u_n$  également.

### Exercice 5 (\* à \*\*)

Toujours ligne par ligne :

- La série est à termes positifs, de terme général équivalent à  $\frac{1}{n^2}$  (terme général d'une série de Riemann convergente), donc converge.
- La série est à termes positifs, et  $\frac{1}{e^n + e^{-n}} \sim \frac{1}{e^n}$ , terme général d'une série géométrique convergente, donc la série converge.
- Même si on se trompe dans l'équivalent, on tombera sur une série convergente. En l'occurrence,  $\frac{1}{n^3 + 2^n} \sim \frac{1}{2^n}$ , et la série converge.
- Le terme général ne tend même pas vers 0, puisque  $\frac{n^2 + n^4}{2n^4}$  a pour limite  $\frac{1}{2}$ , donc la série diverge grossièrement.
- Ici, la positivité est évidente, et  $\sqrt{\frac{n+2}{n^3 - 4n + 1}} \sim \sqrt{\frac{1}{n^2}} \sim \frac{1}{n}$ , donc la série diverge.
- La série est à termes positifs, et  $\frac{\ln(n)}{3^n} \leq \frac{2^n}{3^n}$  (au moins à partir d'un certain rang), ce qui suffit à assurer la convergence.
- Encore une série qui diverge grossièrement, le terme général tendant vers 1 (en factorisant, on constate que le dénominateur est équivalent à  $\ln(3n)$ , donc à  $\ln(n)$ , puisque  $\ln(3n) = \ln(n) + \ln(3)$ ).
- On peut par exemple écrire que  $\frac{n^2}{n!} \sim \frac{n(n-1)}{n!} \sim \frac{1}{(n-2)!}$ , ce qui assure la convergence de la série. Notons qu'on peut très bien calculer sa somme :  $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n^2}{n!} = \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{1}{(n-2)!} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{(n-1)!} = 2e$ .
- Un peu plus pénible que celui de la ligne du dessus, mais on peut certainement écrire qu'à partir d'un certain rang,  $\ln(n) \leq n^{\frac{1}{4}}$  (puisque le  $\ln$  est négligeable par rapport à toute puissance strictement positive), donc  $\frac{\ln(n)}{n^{\frac{3}{2}}} \leq \frac{n^{\frac{1}{4}}}{n^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{n^{\frac{5}{4}}}$ , terme général d'une série de Riemann convergente. Ceci assure la convergence de notre série.
- On calcule  $\sqrt[n]{n+1} - \sqrt[n]{n} = \sqrt[n]{n} \left( \sqrt[n]{1 + \frac{1}{n}} - 1 \right) = \sqrt[n]{n} \left( e^{\frac{1}{n} \ln(1 + \frac{1}{n})} - 1 \right) = \sqrt[n]{n} \left( e^{\frac{1}{n^2} + o(\frac{1}{n^2})} - 1 \right) =$

$\sqrt[n]{n} \left( 1 + \frac{1}{n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) - 1 \right) \sim \frac{\sqrt[n]{n}}{n^2}$ . Or,  $\sqrt[n]{n} = e^{\frac{\ln(n)}{n}}$  tend vers 1 quand  $n$  tend vers  $+\infty$ ,

donc notre terme général est en fait équivalent à  $\frac{1}{n^2}$ , terme général d'une série de Riemann convergente, ce qui assure sa propre convergence.

- Si on est un peu trop brutal et qu'on majore par exemple le numérateur de la fraction par  $n \times n!$ , ça ne suffit pas, il faut être un peu plus subtile en écrivant  $\frac{1! + 2! + \dots + (n-1)! + n!}{(n+2)!} \leq$

$\frac{(n-1)(n-1)! + n!}{(n+2)!} = \frac{n-1}{n(n+1)(n+2)} + \frac{1}{(n+1)(n+2)} \sim \frac{2}{n^2}$ , terme général d'une série de Riemann convergente. Notre série à termes positifs converge donc également.

- La quotient dans le arccos ayant pour limite 1, le terme général de la série tend vers 0. On aimerait bien pouvoir donner un équivalent de ce terme général, mais ce n'est pas aussi simple que ça en a l'air, notamment car la fonction arccos n'est pas dérivable en 1. Ce pendant, on sait que  $\lim_{x \rightarrow 1} \arccos(x) = 0$ , et que  $\sin(\arccos(x)) = \sqrt{1-x^2}$ . Comme  $\sin(u) \sim u$  quand  $u$  tend vers 0, on peut donc écrire  $\arccos(x) \underset{x \rightarrow 1}{\sim} \sin(\arccos(x)) = \sqrt{1-x^2} =$

$\sqrt{(1+x)(1-x)} \underset{x \rightarrow 1}{\sim} \sqrt{2(1-x)}$ . On applique cet équivalent à  $x = \frac{n^3+1}{n^3+2}$  pour obtenir

$\arccos\left(\frac{n^3+1}{n^3+2}\right) \sim \sqrt{2\left(1 - \frac{n^3+1}{n^3+2}\right)} \sim \sqrt{\frac{2}{n^3+2}} \sim \frac{\sqrt{2}}{n^{\frac{3}{2}}}$ , qui est le terme général d'une série de Riemann convergente. Notre série converge donc.

- On constate par exemple que  $\frac{\sqrt{n+1} - \sqrt{n}}{2n} = \frac{1}{2n(\sqrt{n+1} + \sqrt{n})}$  (quantité conjuguée), qui tend certainement vers 0, et assure la divergence grossière de la série proposée.

- C'est beaucoup plus intéressant :  $\left(\frac{n}{n+1}\right)^{n^2} = e^{n^2 \ln\left(\frac{n}{n+1}\right)}$ , avec  $n^2 \ln\left(\frac{n}{n+1}\right) = -n^2 \ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) = -n^2 \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} + o\left(\frac{1}{n}\right)\right) = -n + \frac{1}{2} + o(1)$ . On en déduit que

$\left(\frac{n}{n+1}\right)^{n^2} = e^{-n} \times e^{-\frac{1}{2}} \times e^{o(1)} \sim \frac{e^{-n}}{\sqrt{e}}$ , terme général d'une série géométrique convergente.

Notre série est donc convergente.

- Ici, le plus simple est de faire une comparaison série-intégrale. La fonction  $x \mapsto \frac{1}{x(\ln(x))^\alpha}$  est continue et décroissante sur  $]1, +\infty[$  pour  $\alpha > 0$  (si  $\alpha \leq 0$ , la série diverge de toute façon car son terme général est supérieur à celui de la série harmonique). Mieux, on sait calculer  $\int_2^n \frac{1}{x(\ln(x))^\alpha} dx = \int_2^x \frac{1}{x} (\ln(x))^{-\alpha} dx = \frac{1}{1-\alpha} [\ln(x)^{1-\alpha}]_2^n = \frac{\ln(x)^{1-\alpha}}{1-\alpha} + K$ . Cette valeur a une limite finie en  $+\infty$  si et seulement si  $1-\alpha < 0$ , soit  $\alpha > 1$ . On trouve donc exactement le même critère que pour les séries de Riemann.

## Exercice 6 (\*\*)

- La série de terme général  $\frac{1}{(2k+1)^2}$  converge car son terme général est équivalent à  $\frac{1}{4k^2}$ . De même pour la série de terme général  $\frac{1}{(2k+2)^2}$ . On peut donc écrire que la série de terme

général  $\frac{1}{(2k+2)^2} + \frac{1}{(2k+1)^2}$  converge, et que  $\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} + \frac{1}{(2k+2)^2} = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} +$

$\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{(2k+2)^2}$ . Or, la somme de gauche n'est autre que la somme des inverses des carrés de

tous les entiers (on a juste séparé entiers pairs et impairs) qui vaut  $\frac{\pi^2}{6}$ . Quant à la deuxième somme à droite, elle vaut  $\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{4(k+1)^2} = \frac{1}{4} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{(k+1)^2} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} = \frac{1}{4} \times \frac{\pi^2}{6}$ . Conclusion :

$$\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} = \frac{\pi^2}{6} - \frac{1}{4} \frac{\pi^2}{6} = \frac{3}{4} \frac{\pi^2}{6} = \frac{\pi^2}{8}.$$

- Celle-ci est très facile, il s'agit d'une famille produit de termes positifs, on peut donc séparer tranquillement les sommes :  $\sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2 n^2} = \left( \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} \right) \left( \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^2} \right) = \left( \frac{\pi^2}{6} \right)^2 = \frac{\pi^4}{36}$ .

- Il s'agit de la somme d'une famille de réels positifs, donc tous les coups sont permis :  $S = \sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{n=k+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2 n^2} = \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k^2 n^2}$ . Mais quitte à inverser le rôle des deux variables dans

la première expression, on peut aussi écrire  $S = \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2 n^2}$ . Remarquons alors que

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2 n^2} = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^2} \left( \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k^2} + \frac{1}{n^2} + \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} \right) = S + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^4} + S = 2S + \frac{\pi^4}{90}.$$

Comme la somme qu'on vient de décomposer est celle qu'on a calculée à la question précédente, on en déduit que  $\frac{\pi^4}{36} = 2S + \frac{\pi^4}{90}$ , donc  $S = \frac{\pi^4}{72} - \frac{\pi^4}{180} = \frac{3\pi^4}{360} = \frac{\pi^4}{120}$ .

- En notant  $n = pk$  (puisque  $n$  est un multiple de  $k$  par hypothèse), on peut écrire celle-ci sous la forme  $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p^2 k^2} = \left( \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^4} \right) \left( \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p^2} \right) = \frac{\pi^4}{90} \times \frac{\pi^2}{6} = \frac{\pi^6}{540}$ .

- Attention, il s'agit ici d'une famille sommable de réels qui sont de signe quelconque. Mais elle est sommable à cause du deuxième calcul effectué dans ce même exercice. On peut maintenant calculer notre somme en l'écrivant comme une somme double. Intéressons-nous déjà la somme intérieure  $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{((-1)^k)^n}{k^2}$ . Si  $n$  est un entier pair,  $((-1)^k)^n$  est toujours égal à 1, donc la somme

$$\text{vaut } \frac{\pi^2}{6}. \text{ Mais si } n \text{ est impair, } ((-1)^k)^n = (-1)^k, \text{ donc notre somme est égale à } \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} = -\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} + 2 \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{(2k)^2} = \frac{\pi^2}{12} - \frac{\pi^2}{6} = -\frac{\pi^2}{12}.$$

On peut maintenant conclure le calcul de la somme extérieure, qui est égale à  $\frac{\pi^2}{6} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{(2n)^2} - \frac{\pi^2}{12} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(2n+1)^2}$ . On a vu lors du calcul de

la première question de ce même exercice que  $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} = \frac{\pi^2}{8}$ , et  $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{(2n)^2} = \frac{\pi^2}{24}$ , donc

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{kn}}{k^2 n^2} = \frac{\pi^2}{6} \times \frac{\pi^2}{24} - \frac{\pi^2}{12} \times \frac{\pi^2}{8} = \frac{\pi^4}{144} - \frac{\pi^4}{96} = -\frac{\pi^4}{288}.$$

- Pour cette dernière somme, il faut être malin. On connaît la valeur de  $\sum_{(k,n) \in \mathbb{N}^{*2}} \frac{1}{k^2 n^2} = \frac{\pi^4}{36}$ .

Mais on peut découper cette somme en morceaux (via la décomposition par paquets) selon la valeur prise par le pgcd des deux entiers  $k$  et  $n$  :  $\frac{\pi^4}{36} = \sum_{p=1}^{+\infty} \sum_{k \wedge n = p} \frac{1}{k^2 n^2}$ . En notant  $S$  la somme

qu'on cherche à calculer, le premier terme de la somme intérieure égale à  $\frac{\pi^4}{36}$  vaut exactement

$S$ . Mais les termes suivants peuvent aussi s'exprimer en fonction de  $S$  : par exemple, un couple d'entiers vérifiant  $k \wedge n = 2$  peut s'écrire sous la forme  $(2k', 2n')$ , avec  $k' \wedge n' = 1$  (et réciproquement, toutes les paires d'entiers  $(k', n')$  premiers entre eux ont des doubles dont le pgcd est égal à 2). On en déduit que  $\sum_{k \wedge n = 2} \frac{1}{k^2 n^2} = \sum_{k' \wedge n' = 1} \frac{1}{(2k')^2 (2n')^2} = \frac{1}{2^4} \times S$ . Un calcul totalement similaire donne  $\sum_{k \wedge n = p} \frac{1}{k^2 n^2} = \frac{1}{p^4} \times S$ . On peut maintenant revenir à notre calcul initial :  $\frac{\pi^4}{36} = \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p^4} \times S = \frac{\pi^4}{90} \times S$ . On en déduit directement  $S = \frac{90}{36} = \frac{5}{2}$ . De façon assez surprenante, cette somme est donc rationnelle et ne fait pas du tout intervenir le nombre  $\pi$ .

## Exercice 7 (\*\*)

1. Les intervalles sur lesquelles l'inégalité  $\sin^2(x) \leq \frac{1}{2}$  est vérifiée sont tous ceux de la forme  $\left[-\frac{3\pi}{4} + 2k\pi, -\frac{\pi}{4} + 2k\pi\right]$  ou  $\left[\frac{\pi}{4} + 2k\pi, \frac{3\pi}{4} + 2k\pi\right]$ . Comme  $\frac{\pi}{2} > 1$ , on ne peut jamais avoir  $n$  et  $n+1$  qui appartiennent tous les deux à deux intervalles distincts de cette liste. Il faudrait donc que  $n$ ,  $n+1$  et  $n+2$  soient tous les trois dans le même intervalle de largeur  $\frac{\pi}{2}$ , ce qui n'est pas possible non plus puisque  $\frac{\pi}{2} < 2$ . On a donc au moins l'un des trois entiers qui vérifie  $\sin^2(x) > \frac{1}{2}$ .
2. La série est à termes positifs. Si on calcule sa somme partielle jusqu'à l'indice  $3n$ , en regroupant par paquets de trois, on peut écrire  $S_{3n} = \sum_{k=1}^n \frac{\sin^2(3k-2)}{3k-2} + \frac{\sin^2(3k-1)}{3k-1} + \frac{\sin^2(3k)}{3k}$ . L'un au moins des trois numérateurs étant à chaque fois supérieur à  $\frac{1}{2}$ , on peut en déduire que  $S_{3n} > \sum_{k=1}^n \frac{1}{6k}$  (on garde le plus grand dénominateur possible parmi les trois pour effectuer la minoration). Or,  $\sum_{k=1}^n \frac{1}{6k}$  diverge vers  $+\infty$  (série harmonique), donc  $\sum \frac{\sin^2(n)}{n}$  diverge également.

## Exercice 8 (\*\*)

1. On sait que  $\arctan(x) \underset{x \rightarrow 0}{\sim} x$  (par exemple en utilisant le début du développement limité d'arctangente), donc le terme général de notre série est équivalent à  $\frac{1}{n^2 + n + 1}$ , puis à  $\frac{1}{n^2}$ , ce qui assure la convergence de notre série (qui est à termes positifs).
2. Calculons la tangente de chacun de ces deux nombres :  $\tan\left(\arctan\left(\frac{1}{n^2 + n + 1}\right)\right) = \frac{1}{n^2 + n + 1}$ . D'un autre côté, via la formule d'addition des tangentes,  $\tan(\arctan(n+1) - \arctan(n)) = \frac{\tan(\arctan(n+1)) - \tan(\arctan(n))}{1 + \tan(\arctan(n+1))\tan(\arctan(n))} = \frac{1}{1 + n^2 + n}$ . Nos deux nombres ont donc la même tangente, et appartiennent tous les deux à l'intervalle  $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$  (pas croissance de l'arctangente,  $\arctan(n+1) - \arctan(n) \geq 0$ , et cette même valeur est majorée par  $\arctan(n+1) \leq \frac{\pi}{2}$ ), donc elles sont égales.

3. Notre série est donc tout simplement télescopique :  $\sum_{n=0}^p \arctan\left(\frac{1}{n^2+n+1}\right) = \arctan(p+1) - \arctan(0) = \arctan(p+1)$ , qui converge vers  $\frac{\pi}{2}$ .

### Exercice 9 (\*\*)

1. Effectuons un développement asymptotique de notre expression :  $a\sqrt{n-1} + b\sqrt{n} + c\sqrt{n+1} = \sqrt{n} \left( a\sqrt{1-\frac{1}{n}} + b + c\sqrt{1+\frac{1}{n}} \right) = \sqrt{a - \frac{a}{2n} - \frac{a}{8n^2} - \frac{a}{16n^3} + b + c + \frac{c}{2n} - \frac{c}{8n^2} + \frac{c}{16n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right) = (a+b+c)\sqrt{n} + \frac{c-a}{2\sqrt{n}} - \frac{a+c}{8n\sqrt{n}} + o\left(\frac{1}{n\sqrt{n}}\right)$ . Une première condition nécessaire évidente est  $a+b+c=0$ , sinon la série diverge grossièrement. Si cette condition est vérifiée, et si  $a \neq c$ , notre terme général est équivalent à  $\frac{c-a}{2\sqrt{n}}$ , terme général d'une série de Riemann divergente, donc la série diverge. On doit donc imposer  $c=a$  (et donc  $b=-a-c=-2a$ ), on obtient alors un terme général équivalent à  $\frac{-a}{4n^{\frac{3}{2}}}$ , ce qui suffit cette fois-ci à prouver la convergence de la série, puisqu'on est en présence d'une série de Riemann convergente. Les conditions  $c=a$  et  $b=-2a$  sont donc nécessaires et suffisantes.
2. On va évidemment faire pareil :  $\sqrt{n^2+4n+1} = n\sqrt{1+\frac{4}{n}+\frac{1}{n^2}} = n \left( 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{4}{n} + \frac{1}{n^2} \right) - \frac{1}{8} \left( \frac{4}{n} + \frac{1}{n^2} \right)^2 + \frac{1}{16} \left( \frac{4}{n} + \frac{1}{n^2} \right)^3 + o\left(\frac{1}{n^3}\right) \right) = n \left( 1 - \frac{2}{n} - \frac{1}{2n^2} - \frac{2}{n^2} - \frac{1}{n^3} + \frac{4}{n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right) \right) = n - 2 - \frac{5}{2n} + \frac{3}{n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)$ . Pour annuler tous les termes divergents de ce développement asymptotique, il faut donc choisir  $a=1, b=-2$  et  $c=-\frac{5}{2}$ . On aura alors une équivalence du terme général avec  $\frac{3}{n^2}$  qui assure la convergence de la série.
3. Allons-y pour un dernier développement asymptotique :  $\sqrt[3]{n^3+an} - \sqrt{n^2+3} = n \left( \left( 1 + \frac{a}{n^2} \right)^{\frac{1}{3}} - \sqrt{1 + \frac{3}{n^2}} \right) = n \left( 1 + \frac{a}{3n^2} - \frac{a}{9n^4} - 1 - \frac{3}{2n^2} + \frac{3}{8n^4} + o\left(\frac{1}{n^4}\right) \right) = \frac{2a-9}{6n} + \frac{27-8a}{72n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right)$ . Il faut et il suffit donc que  $a$  soit égal à  $\frac{9}{2}$  pour que la série converge.

### Exercice 10 (\*\*\*)

1. En posant  $v_n = n^\beta u_n$ , calculons donc  $\frac{v_{n+1}}{v_n} = \frac{(n+1)^\beta u_{n+1}}{n^\beta u_n} = \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^\beta \times \frac{u_{n+1}}{u_n} = \left( 1 + \frac{\beta}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right) \right) \left( 1 - \frac{\alpha}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right) \right) = 1 + \frac{\beta-\alpha}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)$ . On peut donc écrire  $\frac{v_{n+1}}{v_n} - 1 \sim \frac{\beta-\alpha}{n}$ , ce qui prouve avec les hypothèses faites que  $\frac{v_{n+1}}{v_n} - 1 \leq 0$  à partir d'un certain rang (l'équivalent obtenu étant négatif) et donc que  $v_{n+1} \leq v_n$  à partir de ce même rang. La suite  $(v_n)$  est donc bien décroissante à partir d'un certain rang.
2. Une suite décroissante à partir d'un certain rang est toujours majorée (il suffit de prendre comme majorant le plus grand des termes apparaissant avant l'indice à partir duquel la suite devient décroissante). On peut donc écrire que  $n^\beta u_n = O(1)$ , ou encore que  $u_n = O\left(\frac{1}{n^\beta}\right)$ . Quitte à prendre  $\beta > 1$  (ce qui est toujours possible puisque  $\alpha > 1$ , on peut par exemple

poser  $\beta = \frac{1+\alpha}{2}$ ), notre terme général est donc dominé par celui d'une série de Riemann convergente, ce qui prouve que  $\sum u_n$  converge (tout étant ici à termes positifs, bien entendu).

3. Histoire d'exploiter ce qui précède, posons  $u_n = \binom{2n}{n} \frac{2}{n \times 2^{2n}}$  et calculons  $\frac{u_{n+1}}{u_n}$
- $$= \frac{\binom{2n+2}{n+1} \times n \times 2^{2n}}{\binom{2n}{n} \times (n+1) \times 2^{2n+2}} = \frac{(2n+2)!n!^2}{(n+1)!^2(2n)!} \times \frac{n}{4(n+1)} = \frac{(2n+2)(2n+1)}{(n+1)^2} \times \frac{n}{4(n+1)} =$$
- $$\frac{n(2n+1)}{2(n+1)^2} = \frac{2n^2(1+\frac{1}{2n})}{2n^2(1+\frac{1}{n})^2} = \left(1+\frac{1}{2n}\right) \left(1+\frac{1}{n}\right)^{-2} = \left(1+\frac{1}{2n}\right) \left(1-\frac{2}{n}+o\left(\frac{1}{n}\right)\right) = 1 -$$
- $$\frac{3}{2n} + o\left(\frac{1}{n}\right).$$
- À la surprise générale, on peut appliquer le résultat démontré dans l'exercice pour en déduire que  $\sum u_n$  converge, avec ici  $a = \frac{3}{2}$ .

### Exercice 11 (\*\*\*)

1. On suppose ici que  $\alpha$  est un réel strictement positif, comme pour les séries de Riemann. On peut donc manipuler la somme comme on le souhaite :  $S = \sum_{n=2}^{+\infty} \sum_{p=2}^{+\infty} \frac{1}{n^{\alpha p}} = \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{1}{n^{2\alpha}} \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{1}{(n^\alpha)^p}$ . Notre somme intérieure est une série géométrique qui converge si  $n^\alpha > 1$ , ce qui est toujours le cas avec les hypothèses faites. On peut donc écrire  $S = \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{1}{n^{2\alpha}} \times \frac{1}{1-n^{-\alpha}} = \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{1}{n^{2\alpha} - n^\alpha}$ . Le terme général de cette série est équivalent à  $\frac{1}{n^{2\alpha}}$ , on reconnaît un terme général de série de Riemann, qui converge si et seulement si  $2\alpha > 1$ , donc  $\alpha > \frac{1}{2}$ .
2. Si la famille était sommable, n'importe quelle sous-famille (finie ou non) aurait une somme finie (c'est le principe de l'absolue convergence qui l'assure). En particulier, la somme prise sur tous les couples  $(n, p)$  avec  $p = n - 1$  doit converger. Or,  $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^2 - (n-1)^2} = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{2n-1}$  diverge. Notre famille n'est donc pas sommable. Il existe d'autres façons de traiter cet exemple classique, par exemple en supposant la sommabilité et en faisant le calcul de la somme de deux façons (en sommant d'abord par rapport à  $n$  ou d'abord par rapport à  $p$ , à l'aide d'une décomposition en éléments simples), ce qui donne deux résultats différents.
3. Il existe une infinité de rationnels dans n'importe quel intervalle de  $\mathbb{R}$ , et en particulier dans l'intervalle  $]1, 2]$ . Notons  $(u_n)$  une suite de rationnels distincts tous compris entre 1 et 2, alors chacun vérifie  $\frac{1}{u_n^2} \geq \frac{1}{4}$ , et  $\sum_{r \in \mathbb{Q}, r > 1} \frac{1}{r^2} \geq \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{u_n^2} \geq \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{4} = +\infty$ , donc notre famille n'est pas du tout sommable. Remarquons d'ailleurs qu'en remplaçant le carré du dénominateur par n'importe quelle autre puissance plus violente que 2, on n'obtiendra jamais une famille sommable (même argument).
4. On nous demande simplement d'étudier la sommabilité. On va donc poser  $r = |z|$  et se concentrer sur la somme à termes positifs  $\sum_{p=0}^{+\infty} \sum_{q=0}^{+\infty} \frac{(r^p)^q}{p!q!} = \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{e^{(r^p)}}{p!}$ . Cette série converge classiquement quand  $r = 1$  (puisque'il s'agit d'une simple série exponentielle) et donc quand  $r \leq 1$  (puisque'elle est alors majorée par cette même série exponentielle). Si  $r > 1$ , on peut en fait prouver que la série diverge grossièrement. En effet, en prenant les  $\ln$  au numérateur et au dénominateur du terme général, on constate que  $\ln(e^{r^p}) = r^p$ , et  $\ln(p!) = \sum_{k=1}^p \ln(k) \leq$

$p \ln(p) = o(r^p)$ . À partir d'un certain rang  $p_0$ , on aura donc certainement  $r^p > \ln(p!)$ , donc  $e^{r^p} > p!$ , ce qui empêche notre terme général de tendre vers 0 (il tend même violemment vers  $+\infty$  dès que  $r > 1$  en pratique), et la famille initiale ne peut donc pas être sommable.

### Exercice 12 (\*)

- En notant  $r = |z|$ , la somme de réels positifs  $S = \sum_{p=0}^{+\infty} \sum_{q=0}^{+\infty} \frac{r^p}{q!} = \left( \sum_{p=0}^{+\infty} r^p \right) \left( \sum_{q=0}^{+\infty} \frac{1}{q!} \right) = e \sum_{p=0}^{+\infty} r^p$  converge si  $r < 1$ . Dans ce cas, on peut effectuer le même calcul à partir de la somme de départ pour obtenir  $\sum_{p=0}^{+\infty} \sum_{q=0}^{+\infty} \frac{z^p}{q!} = e \sum_{p=0}^{+\infty} z^p = \frac{e}{1-z}$ .
- En notant  $r$  et  $r'$  les modules respectifs des deux nombres complexes, on reconnaît une famille produit :  $\sum_{p=0}^{+\infty} \sum_{q=0}^{+\infty} \frac{r^p r'^q}{p! q!} = \left( \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{r^p}{p!} \right) \left( \sum_{q=0}^{+\infty} \frac{r'^q}{q!} \right)$ , qui converge toujours (accessoirement, on connaît sa somme :  $e^r e^{r'} = e^{r+r'}$ ). Le même calcul sur la somme initiale donne une valeur égale à  $e^{z+z'}$ .
- Notons pour changer  $r = |z|$  pour commencer par travailler avec des réels positifs :  $\sum_{q=0}^{+\infty} \frac{1}{q!} \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{(qr)^p}{p!} = \sum_{q=0}^{+\infty} \frac{e^{qr}}{q!} = \sum_{q=0}^{+\infty} \frac{(e^r)^q}{q!} = e^{e^r}$ . La famille initiale est donc sommable, et le même calcul donne une somme égale à  $e^{e^z}$ .
- Vous commencez à avoir l'habitude, on pose d'abord  $r = |z|$ , avant d'effectuer un calcul de somme « sur les diagonales » :  $\sum_{p=0}^{+\infty} \sum_{q=0}^{+\infty} \binom{p+q}{p} r^{p+q} = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} r^n = \sum_{n=0}^{+\infty} (2r)^n$ , qui converge si  $r < \frac{1}{2}$ . Dans ce cas, la somme est égale à  $\frac{1}{1-2r}$ , et la somme initiale se calcule de la même façon et vaut  $\frac{1}{1-2z}$ .

### Exercice 13 (\*\*)

1. Tout est positif, on peut calculer comme on veut :  $\sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{k=n}^{+\infty} \frac{1}{k!} = \sum_{k=0}^{+\infty} \sum_{n=0}^k \frac{1}{k!} = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{k+1}{k!} = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{(k-1)!} + \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{k!} = 2e$ .
2. Ici, tout n'est pas positif, on va d'abord s'intéresser à la somme des valeurs absolues :  $\sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{k=n}^{+\infty} \frac{1}{k^3} = \sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^k \frac{1}{k^3} = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} = \frac{\pi^2}{6}$ . Notre famille est donc sommable, et on peut effectuer la même inversion de somme pour obtenir  $\sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{k=n}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{k^3} = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} = 2 \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{2}{(2k)^2} - \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} = \frac{\pi^2}{12} - \frac{\pi^2}{6} = -\frac{\pi^2}{12}$  (calcul final déjà effectué dans un exemple du cours).
3. Tout est positif, on calcule comme dans les cas précédents  $\sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^k \frac{1}{k^\alpha} = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{k}{k^\alpha} = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^{\alpha-1}} =$

$\zeta(\alpha - 1)$ . La somme ne converge bien sûr que si  $\alpha - 1 > 1$ , donc  $\alpha > 2$ .

4. La somme est absolument convergente (même calcul que pour la question 2), on peut donc

inverser les sommes :  $S = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^3} \sum_{n=1}^k (-1)^n$ . Cette somme intérieure se calcule facilement :

elle vaut  $-1$  si  $k$  est impair, et  $0$  si  $k$  est pair. On en déduit que  $S = -\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{(2k+1)^3}$  (on ne

garde que les termes impairs). Une astuce classique pour terminer le calcul : on soustrait et

on ajoute tous les termes pairs :  $S = -\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^3} + \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{(2k)^3} = -\zeta(3) + \frac{1}{8}\zeta(3) = -\frac{7}{8}\zeta(3)$ .

### Problème 1 (\*\*\*)

1. (a) Je noterai  $u_n$  le terme général de la série  $(S_n)$  pour toutes les premières questions de ce

corrigé. Dans ce premier cas particulier, on a  $u_n = \prod_{k=0}^n \frac{1}{2} = \frac{1}{2^{n+1}}$ , ce qui correspond au

terme général d'une série géométrique convergente. Plus précisément, la somme de  $(S_n)$

vaut  $\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{2^k} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{1 - \frac{1}{2}} = 1$ .

(b) Si la suite est constante égale à  $p$ , on a de même  $u_n = \frac{1}{p^{n+1}}$ , avec  $\frac{1}{p} < 1$  puisque  $p$  est

un entier naturel non nul. On est toujours en présence d'une série géométrique, de somme

$\frac{1}{p} \frac{1}{1 - \frac{1}{p}} = \frac{1}{p-1}$ .

(c) Dans ce cas, on aura  $\prod_{k=0}^n p_k = \prod_{k=0}^n k+2 = (n+2)!$ , donc  $u_n = \frac{1}{(n+2)!}$ . On reconnaît

le terme général d'une série exponentielle (à un décalage près), convergeant vers  $e - 2$  (il manque les deux premiers termes par rapport à la série exponentielle usuelle). On sait bien que  $2 < e < 3$ , donc  $e - 2 \in ]0, 1[$ .

(d) Constatons simplement que  $u_n = \prod_{k=0}^n (2k+2) = \prod_{k=0}^n 2(k+1) = 2^{n+1} \prod_{k=0}^n (k+1) = 2^{n+1} (n+$

$1)!$ , ce qui correspond à la valeur donnée pour l'inverse dans l'énoncé. On reconnaît à

nouveau pour  $(S_n)$  une série exponentielle, mais avec cette fois-ci une valeur de  $x$  égale à

$\frac{1}{2}$ , et un seul terme manquant par rapport à la série complète. On en déduit que la série

a pour somme  $e^{\frac{1}{2}} - 1 = \sqrt{e} - 1$ . Comme  $\sqrt{2} < \sqrt{e} < \sqrt{3}$ , la valeur obtenue est bien dans

l'intervalle  $]0, 1[$ .

2. Dans tous les cas, la suite  $(p_n)$  étant croissante, on aura toujours  $2 \leq p_n$ , donc  $u_n \leq \frac{1}{2^{n+1}}$ .

On en déduit que la série  $(S_n)$  est toujours à termes positifs et majorée par la série étudiée

dans notre premier exemple, qui converge vers 1. Elle converge donc vers une somme positive

(strictement car le premier terme de la série est strictement positif) et inférieure ou égale à 1.

3. Une fois fixée la valeur de  $p_0$ , la croissance de la suite  $(p_n)$  assure que  $p_0 \leq p_n$  pour tout entier

$n$ , donc  $u_n \leq \frac{1}{p_0^{n+1}}$ . On reproduit en fait le même raisonnement que ci-dessus pour constater

que, dans ce cas,  $\frac{1}{p_0} < S(p) \leq \frac{1}{p_0 - 1}$  (la valeur maximale est obtenue quand la suite est

constante égale à  $p_0$ , cas particulier étudié ci-dessus). En particulier, si une deuxième suite

$(q_n)$  vérifie  $q_0 < p_0$ , on aura nécessairement  $S(p) < S(q)$  puisque  $\frac{1}{p_0 - 1} \leq \frac{1}{q_0}$  (les nombres  $p_0$

et  $q_0$  étant entiers, on a nécessairement  $q_0 \leq p_0 - 1$ ). Deux suites n'ayant pas le même premier terme ne peuvent donc pas avoir la même image par  $S$ . Il faudrait généraliser ce résultat au cas où ce n'est pas le premier terme qui est différent, mais le  $n$ -ème, pour une valeur quelconque de  $n$ . C'est en fait le même principe : soient deux suites  $(p_n)$  et  $(q_n)$  distinctes, il existe donc (au moins) une valeur de  $n$  pour laquelle  $p_n \neq q_n$ . Notons  $n_0$  cette valeur, et supposons par exemple  $p_{n_0} > q_{n_0}$ . La suite  $(p_n)$  étant croissante,  $p_n \geq p_{n_0}$  pour toutes les valeurs de  $n$  supérieures ou égales à  $n_0$ . On en déduit (pour les mêmes valeurs de  $n$ ) que  $u_n \leq \frac{u_{n_0-1}}{p_{n_0}^{n-n_0+1}}$ , puis que  $S_n(p) < S_{n_0-1} + \frac{u_{n_0-1}}{p_{n_0} - 1}$  (on a isolé les  $n_0$  premiers termes de la somme pour lesquels la majoration précédente n'est pas valable). Or, les premiers termes de la somme associée à  $(q_n)$  sont les mêmes que ceux associés à  $(p_n)$  et par hypothèse  $\frac{1}{p_{n_0-1}} \leq \frac{1}{q_{n_0}}$ . On en déduit que  $S_n(p) \leq S_{n_0-1}(q) + \frac{u_{n_0-1}}{q_{n_0}} = S_{n_0}(q)$ . En passant à la limite,  $S(p) \leq S_{n_0}(q) < S(q)$ , ce qui achève de prouver l'injectivité de l'application  $S$ .

4. (a) Calculons donc :  $y_0 = \frac{3}{7}$ , donc  $p_0 = \text{Ent} \left( 1 + \frac{7}{3} \right) = 3$ . Ensuite,  $y_1 = 3y_0 - 1 = \frac{2}{7}$ , et  $p_1 = \text{Ent} \left( 1 + \frac{7}{2} \right) = 4$ . On continue :  $y_2 = 4y_1 - 1 = \frac{1}{7}$  et  $p_2 = \text{Ent} (1 + 7) = 8$ . Allez, encore un tour :  $y_3 = 8y_2 - 1 = \frac{1}{7}$ . Ah, pas la peine d'aller plus loin, ça va boucler, on aura toujours  $y_n = \frac{1}{7}$  et  $p_n = 8$  pour  $n \geq 2$ . On a donc (en reprenant toujours les mêmes notations)  $u_0 = \frac{1}{3}$ ,  $u_1 = \frac{1}{3} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{12}$  puis,  $\forall k \geq 2$ ,  $u_k = \frac{1}{12} \times \frac{1}{8^{k-1}}$  (en fait, cette formule est aussi valable lorsque  $k = 1$ ). La série de terme général  $(u_n)$  converge évidemment, et  $S(p) = \frac{1}{3} + \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{8^{k-1}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{12} \times \frac{1}{1 - \frac{1}{8}} = \frac{1}{3} + \frac{8}{84} = \frac{28 + 8}{84} = \frac{3}{7}$ . Incroyable,  $S(p) = x$ . Ca ne peut pas être un hasard !

- (b) D'après la définition de la partie entière, on a toujours  $\frac{1}{y_n} < p_n \leq 1 + \frac{1}{y_n}$ , donc  $1 < p_n y_n \leq y_n + 1$  et  $0 < y_{n+1} \leq 1$ . En fait, pour être tout à fait rigoureux, il faut faire une récurrence puisqu'on a besoin d'avoir  $y_n \geq 0$  pour que les inégalités ne changent pas de sens.

- (c) La suite  $(p_n)$  est évidemment une suite d'entiers naturels puisqu'elle est définie comme partie entière d'un nombre positif. Comme  $(y_n)$  est décroissante,  $\left( 1 + \frac{1}{y_n} \right)$  est croissante, et  $(p_n)$  également (la partie entière est une fonction croissante sur  $\mathbb{R}$ ). Enfin,  $1 + \frac{1}{y_0} \geq 2$  puisque  $y_0 \leq 1$ , donc  $p_0 \geq 2$ .

- (d) Il suffit de retourner la relation donnant  $y_{n+1}$  en fonction de  $y_n$  pour trouver  $y_n = \frac{1}{p_n} + \frac{y_{n+1}}{p_n}$ . On peut alors obtenir successivement différentes expressions de  $x$  :  $x = y_0$

(par définition) puis  $x = \frac{1}{p_0} + \frac{y_1}{p_0}$ , puis  $x = \frac{1}{p_0} + \frac{1}{p_0 p_1} + \frac{y_2}{p_0 p_1}$ . On conjecture que

$$x = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{p_0 \dots p_k} + \frac{y_n}{p_0 \dots p_{n-1}}.$$

Reste à le prouver facilement par récurrence : l'initialisation est vraie, et on passe du rang  $n$  au rang  $n + 1$  en remplaçant  $\frac{y_n}{p_0 \dots p_{n-1}}$  par

$$\frac{1}{p_0 \dots p_{n-1}} \times \left( \frac{1}{p_n} + \frac{y_{n+1}}{p_n} \right).$$

Autrement dit,  $x = S_{n-1}(p) + \frac{y_n}{p_0 \dots p_{n-1}}$ . Si on fait tendre  $n$  vers  $+\infty$ , le membre de droite converge vers  $S(p)$  (le terme supplémentaire est majoré en valeur absolue par  $\frac{1}{p_0 \dots p_n} \leq \frac{1}{2^{n+1}}$ , qui tend vers 0). On vient de créer, pour tout nombre

$x \in ]0, 1]$  une suite  $(p_n)$  telle que  $S(p) = x$ , ce qui prouve la surjectivité de l'application  $S$ . Puisqu'on a déjà prouvé qu'elle était injective,  $S$  est donc bijective.

## Problème 2 (\*\*\*)

1. Calculons donc  $u_{n+1} - u_n = H_{n+1} - \ln(n+1) - H_n + \ln(n) = \frac{1}{n+1} - \ln(n+1) + \ln(n)$ . Le signe de cette expression n'est malheureusement pas vraiment évident. Pour le déterminer, on va carrément poser  $f(x) = \frac{1}{x+1} - \ln(x+1) + \ln(x)$ , fonction définie sur  $\mathbb{R}^{+*}$ , dérivable et de dérivée  $f'(x) = -\frac{1}{(x+1)^2} - \frac{1}{x+1} + \frac{1}{x} = \frac{-x - x(x+1) + (x+1)^2}{x(x+1)^2} = \frac{1}{x(x+1)^2}$ . Cette dérivée étant manifestement positive, la fonction  $f$  est strictement croissante sur  $]0, +\infty[$ . Or,  $f(x) = \frac{1}{x+1} - \ln\left(\frac{x+1}{x}\right) = \frac{1}{x+1} - \ln\left(1 + \frac{1}{x}\right)$ , donc  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$ . On en déduit la négativité de  $f$  sur tout son intervalle de définition, et en particulier que  $u_{n+1} - u_n = f(n) < 0$ . La suite  $(u_n)$  est donc strictement décroissante (on a par exemple  $u_1 = 1$ ;  $u_2 = \frac{3}{2} - \ln(2) \simeq 0,81$  et  $u_3 = \frac{11}{6} - \ln(3) \simeq 0,7$ , ça a l'air cohérent).

2. Il est en effet presque facile en utilisant des intégrales de minorer  $u_n$ . Rappelons le principe : la fonction inverse étant décroissante sur tout intervalle de la forme  $[k, k+1]$  (avec  $k \in \mathbb{N}^*$ ), on peut écrire sur cet intervalle l'encadrement  $\frac{1}{k+1} \leq \frac{1}{x} \leq \frac{1}{k}$ , puis intégrer cet encadrement entre  $k$  et  $k+1$  pour obtenir  $\frac{1}{k+1} \leq \int_k^{k+1} \frac{1}{x} dx \leq \frac{1}{k}$ . En additionnant de tels encadrement pour toutes les valeurs de  $k$  comprises entre 1 et  $n-1$ , on trouve  $\sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k+1} \leq \int_1^n \frac{1}{x} dx \leq$

$$\sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k}, \text{ soit (en décalant les indices dans la somme de gauche) } H_n - 1 \leq \ln(n) \leq H_{n-1}.$$

En particulier, on a donc  $H_{n-1} - \ln(n) \geq 0$ , donc  $H_n - \ln(n) > 0$  (puisque, bien entendu,  $H_n > H_{n-1}$ ). Autrement dit,  $u_n > 0$ , donc notre suite est décroissante et minorée, et converge nécessairement. Sa limite  $\gamma$  est nécessairement positive au vu de la minoration obtenue, et inférieure à 1 puisque  $u_1 = 1$ .

3. (a) Cette formule ressemble étrangement à des histoires de formules de Taylor avec reste intégral. On va donc la démontrer exactement de la même manière, en faisant des IPP (deux en l'occurrence). Commençons par poser  $u(t) = \frac{1}{2} \left(t - k - \frac{1}{2}\right)^2$ , donc  $u'(t) = t - k - \frac{1}{2}$ , et  $v'(t) = f''(t)$  qu'on va bien sûr intégrer en  $v(t) = f'(t)$  (toutes nos fonctions sont bien de classe  $\mathcal{C}^1$ , et ce sera encore le cas pour la deuxième IPP). On trouve  $I_k = \left[ \frac{1}{2} \left(t - k - \frac{1}{2}\right)^2 f'(t) \right]_k^{k+1} - \int_k^{k+1} \left(t - k - \frac{1}{2}\right) f'(t) dt = \frac{f'(k+1)}{8} - \frac{f'(k)}{8} - \int_k^{k+1} \left(t - k - \frac{1}{2}\right) f'(t) dt$ . On effectue donc une deuxième IPP en posant cette fois  $u(t) = t - k - \frac{1}{2}$ , donc  $u'(t) = 1$ , et  $v'(t) = f'(t)$ , donc  $v(t) = f(t)$ , pour obtenir  $I_k = \frac{f'(k+1) - f'(k)}{8} - \left[ \left(t - k - \frac{1}{2}\right) f(t) \right]_k^{k+1} + \int_k^{k+1} f(t) dt = \frac{f'(k+1) - f'(k)}{8} - \frac{f(k+1)}{2} + \frac{f(k)}{2} + \int_k^{k+1} f(t) dt$ .

(b) On additionne l'égalité obtenue à la question précédente pour toutes les valeurs de  $k$  comprises entre 1 et  $n-1$ , ce qui donne  $\sum_{k=1}^{n-1} I_k = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^{n-1} (f'(k+1) - f'(k)) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} (f(k+1) + f(k)) + \int_1^n f(t) dt$ . La première somme du membre de droite est télescopique et simplement égale à  $\frac{f'(n) - f'(1)}{8}$ . La deuxième vaut (en séparant en deux puis en décalant les indices

dans la première des deux sommes)  $\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} f(k+1) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} f(k) = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^n f(k) + \sum_{k=1}^{n-1} f(k) = \frac{f(n) + f(1)}{2} + \sum_{k=2}^{n-1} f(k) = \sum_{k=1}^n f(k) - \frac{f(n) + f(1)}{2}$ . En passant certains termes à gauche et d'autres à droite, on obtient exactement l'égalité demandée dans l'énoncé.

(c) Si  $f(x) = \frac{1}{x}$ , on a donc  $f'(x) = -\frac{1}{x^2}$  et  $f''(x) = \frac{2}{x^3}$ . De plus, lorsque  $t \in [k, k+1]$ ,  $0 \leq t-k \leq 1$ , donc  $-\frac{1}{2} \leq t-k-\frac{1}{2} \leq \frac{1}{2}$  et  $0 \leq \left(t-k-\frac{1}{2}\right)^2 \leq \frac{1}{4}$  (cet encadrement est d'ailleurs vrai quelle que soit la fonction  $f$ ). On en déduit que, sur  $[k, k+1]$ ,  $\frac{1}{2} \left(t-k-\frac{1}{2}\right)^2 f''(t) \leq \frac{1}{4t^3}$ , dont l'inégalité demandée découle par intégration.

(d) On sait bien sûr calculer  $\int_k^{k+1} \frac{1}{4t^3} dt = \left[-\frac{1}{8t^2}\right]_k^{k+1} = \frac{1}{8} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{(k+1)^2}\right)$ . La somme partielle  $\sum_{k=1}^n I_k$  est donc majorée par  $\sum_{k=1}^n \frac{1}{8} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{(k+1)^2}\right) = \frac{1}{8} - \frac{1}{8(n+1)^2}$  (il s'agit d'une somme télescopique). Ce majorant converge manifestement vers  $\frac{1}{8}$ , ce qui assure que la série  $\sum I_k$ , qui est une série à termes positifs, est majorée et donc convergente. Pour majorer le reste, on utilise exactement la même technique (on peut travailler directement avec des sommes infinies puisque tout converge) :  $\sum_{k=n}^{+\infty} I_k \leq \sum_{k=n}^{+\infty} \frac{1}{8} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{(k+1)^2}\right) = \frac{1}{8n^2}$ . En particulier ce reste est certainement négligeable par rapport à  $\frac{1}{n}$ .

(e) Appliquons la formule démontrée en question *b* à notre fonction inverse :  $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2n} - \frac{1}{8n^2} + \frac{1}{8} + \int_1^n \frac{1}{x} dx - \left(l + o\left(\frac{1}{n}\right)\right)$ . On a remplacé le dernier terme  $\sum_{k=1}^n I_k$  par  $l + o\left(\frac{1}{n}\right)$  puisqu'on a vu dans les deux questions précédentes que la série convergeait (on note  $l$  sa somme) et que le reste (donc l'écart entre la somme partielle et la somme  $l$ ) était négligeable par rapport à  $\frac{1}{n}$ . On a donc  $H_n = \gamma + \frac{1}{2n} - \frac{1}{8n^2} + \ln(n) + o\left(\frac{1}{n}\right)$ , où on a posé  $\gamma = \frac{5}{8} - l$  (cette constante est nécessairement égale à  $\gamma$  puisqu'on sait déjà que  $H_n - \ln(n) = \gamma + o(1)$ , et que les termes restants tendent tous vers 0). On peut faire passer le terme  $-\frac{1}{8n^2}$  dans le  $o$  pour trouver exactement ce qui était demandé dans l'énoncé.

4. (a) C'est exactement le même encadrement que celui utilisé en début d'exercice pour la fonction inverse : la fonction  $t \mapsto \frac{1}{t^\alpha}$  est décroissante sur l'intervalle  $[k, k+1]$ , sur le-

quel l'encadrement  $\frac{1}{(k+1)^\alpha} \leq \frac{1}{t^\alpha} \leq \frac{1}{k^\alpha}$  est donc valable. On l'intègre pour trouver  $\frac{1}{(k+1)^\alpha} \leq \int_k^{k+1} \frac{1}{t^\alpha} dt \leq \frac{1}{k^\alpha}$ . L'inégalité de droite de cet encadrement constitue celle de gauche de celui demandé. Quitte à remplacer les  $k$  par des  $k-1$  dans celle de gauche (ce qui suppose  $k \geq 2$ ), on obtient celle de droite.

- (b) On additionne tous les encadrements précédents en faisant varier  $k$  entre une valeur fixée  $n+1$  et un entier variable  $p > n$ . Cela donne (on utilise bien sûr la relation de Chasles pour regrouper les intégrales)  $\int_{n+1}^{p+1} \frac{1}{t^\alpha} dt \leq \sum_{k=n+1}^p \frac{1}{k^\alpha} \leq \int_n^p \frac{1}{t^\alpha} dt$ . On sait bien sûr cal-

culer les intégrales de cet encadrement : celle de droite est égale à  $\left[ -\frac{1}{(\alpha-1)t^{\alpha-1}} \right]_n^p = \frac{1}{(\alpha-1)n^{\alpha-1}} - \frac{1}{(\alpha-1)p^{\alpha-1}}$ , qui converge quand  $p$  tend vers  $+\infty$  vers  $\frac{1}{(\alpha-1)n^{\alpha-1}}$ . De

même, l'intégrale de gauche converge vers  $\frac{1}{(\alpha-1)(n+1)^{\alpha-1}}$ . Quitte à tout multiplier par  $(\alpha-1)n^{\alpha-1}$ , on en déduit l'encadrement suivant (on sait que la série au centre de l'encadrement converge d'après le critère de Riemann) :  $\left( \frac{n}{n+1} \right)^{\alpha-1} \leq (\alpha-1)n^{\alpha-1} \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^\alpha} \leq 1$ .

Le minorant de cet encadrement a pour limite 1 quand  $n$  tend vers  $+\infty$  (la puissance  $\alpha-1$  étant fixe, même pas besoin de passer sous forme exponentielle, c'est immédiat),

le théorème des gendarmes assure que  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (\alpha-1)n^{\alpha-1} \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^\alpha} = 1$ , ce qui revient exactement à l'équivalent demandé par l'énoncé.

5. C'est pénible à prouver rigoureusement, car on est obligés de revenir à la définition de la limite avec des  $\varepsilon$ . Supposons donc  $\varepsilon > 0$ . Comme  $a_n \sim b_n$ , on a  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{b_n}$ , et il existe donc un entier  $n_0$  à partir duquel  $1-\varepsilon \leq \frac{a_k}{b_k} \leq 1+\varepsilon$ , autrement dit  $(1-\varepsilon)b_k \leq a_k \leq (1+\varepsilon)b_k$ . On additionne ces encadrement pour toutes les valeurs de  $k$  à partir d'un certain entier  $n+1$  (supérieur à  $n_0$ , bien entendu) pour obtenir  $(1-\varepsilon) \sum_{k=n+1}^{+\infty} b_k \leq \sum_{k=n+1}^{+\infty} a_k \leq (1+\varepsilon) \sum_{k=n+1}^{+\infty} b_k$ . Autrement dit,

quel que soit le réel positif  $\varepsilon$ , il existe un rang à partir duquel  $1-\varepsilon \leq \frac{\sum_{k=n+1}^{+\infty} a_k}{\sum_{k=n+1}^{+\infty} b_k} \leq 1+\varepsilon$ .

C'est exactement la définition d'une limite égale à 1, ce qui prouve l'équivalent demandé.

6. (a) On sait déjà que  $\gamma = \lim u_n$ , et donc également  $\gamma = \lim x_n$  (ce n'est pas le  $\frac{1}{2n}$  qu'on a soustrait qui va modifier la limite). Il faut alors penser à construire une série télescopique ayant la même nature que  $(x_n)$  : on sait que  $\sum_{k=n}^{+\infty} x_{k+1} - x_k = \gamma - x_n$  (par télescage donc). Il ne

reste alors plus qu'à calculer cette série :  $\sum_{k=n}^{+\infty} x_{k+1} - x_k = \sum_{k=n}^{+\infty} u_{k+1} - \frac{1}{2(k+1)} - u_k + \frac{1}{2k} =$

$\sum_{k=n}^{+\infty} H_{k+1} - H_k - \ln(k+1) + \ln(k) + \frac{1}{2k} - \frac{1}{2k+2} = \sum_{k=n}^{+\infty} \frac{1}{k+1} + \frac{1}{2k} - \frac{1}{2(k+1)} + \ln\left(\frac{k}{k+1}\right) =$

$\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{2k} + \frac{1}{2(k-1)} + \ln\left(1 - \frac{1}{k}\right)$  quitte à décaler les indices. C'est bien la formule sou-

haitée. Attention à ne surtout pas séparer les sommes infinies qu'on manipule depuis tout à l'heure en plusieurs sommes distinctes, car ces dernières seraient très certainement divergentes.

(b) Il s'agit d'obtenir un équivalent de la série trouvée à la question précédente pour pouvoir appliquer le résultat de la question 5. Pour cela, on a déjà besoin d'un équivalent de ce qui est dans la somme, qu'on va obtenir à l'aide d'un développement limité (pas trop le choix ici) :  $\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + 2 \ln \left(1 - \frac{1}{n}\right) = \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \times \frac{1}{1 - \frac{1}{n}} + 2 \ln \left(1 - \frac{1}{n}\right)$ . La variable  $\frac{1}{n}$  tend sans problème vers 0 quand  $n$  tend vers  $+\infty$ , on peut écrire les premiers termes de nos développements limités (il faut deux ou trois termes selon les cas pour que tout ne s'annule pas) pour obtenir  $\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + 2 \ln \left(1 - \frac{1}{n}\right) = \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \left(1 + \frac{1}{n} + \frac{1}{n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)\right) + 2 \left(-\frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} - \frac{1}{3n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right)\right) = \frac{1}{n} + \frac{1}{n} + \frac{1}{n^2} + \frac{1}{n^3} - \frac{2}{n} - \frac{1}{n^2} - \frac{2}{3n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right) = \frac{1}{3n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right)$ . Avec le facteur  $\frac{1}{2}$  qu'on avait laissé de côté pour le calcul, on a donc un terme général équivalent à  $\frac{1}{6n^3}$ . L'application de la question 5 et de la question 4.b permet alors d'affirmer que  $\gamma - x_n \sim \frac{1}{12n^2}$ . Autrement dit,  $x_n = \gamma - \frac{1}{12n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)$  et  $H_n = \ln(n) + \gamma + \frac{1}{2n} - \frac{1}{12n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)$ .