

Khôlles de Mathématiques - Semaine 28

George Ober, Hugo Vangilluwen

30 juin 2024

1 Condition nécessaire de convergence de $\sum_{n \geq n_0} u_n$

Démonstration. Soit $u \in \mathbb{K}^{\llbracket n_0, +\infty \rrbracket}$. Si la série $\sum_{n \geq n_0} u_n$ converge, alors la suite u converge vers 0. Supposons que la série converge. Notons $(S_n)_{n \geq n_0}$ la suite des sommes partielles.

$$\forall n \in \llbracket n_0 + 1, +\infty \rrbracket, u_n = S_n - S_{n-1}$$

Puisque S converge, on en déduit que u converge vers 0. \square

2 Condition nécessaire et suffisante de convergence de $\sum_{n \geq 0} q^n$ pour $q \in \mathbb{C}$ et calcul de la somme et du reste lorsqu'ils existent.

$$\forall q \in \mathbb{C}, \sum_{n \geq 0} q^n \text{ cv. } \iff |q| < 1 \quad (1)$$

Dans ce cas $\sum_{n=0}^{+\infty} q^n = \frac{1}{1-q}$ et $R_n = \frac{q^{n+1}}{1-q}$.

Démonstration. \star Si $|q| < 1$

$$\forall n \in \mathbb{N}, S_n = \sum_{k=0}^n q^k = \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q}$$

$$\text{De plus, } |q^{n+1}| = |q|^{n+1} = \begin{cases} 0 & \text{si } q = 0 \\ e^{(n+1) \ln |q|} & \text{si } q \neq 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 \\ e^{(n+1) \ln |q|} \end{cases} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \begin{cases} 0 \\ 0 \end{cases}$$

Ainsi, $\sum_{n \geq 0} q^n$ converge et $\sum_{n=0}^{+\infty} q^n = \frac{1}{1-q}$

$$S_n = \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q} \implies R_n = S_n - \sum_{n=0}^{+\infty} q^n = \frac{q^{n+1}}{1 - q}$$

\star Si $|q| = 1$

$$\forall n \in \mathbb{N}, |q|^n = 1^n = 1 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1$$

Ainsi, $|q|^n$ ne converge pas vers 0 donc $(q^n)_{n \geq 0}$ ne converge pas vers 0, donc la série est grossièrement divergente.

\star Si $|q| > 1$ $|q|^n = \exp(n \ln |q|) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ Donc $(q^n)_{n \geq 0}$ ne converge pas vers 0. Donc la série est grossièrement divergente. \square

3 Caractérisation de la convergence des séries de Riemann

Soit $\alpha \in \mathbb{R}$.

$$\text{La série } \sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^\alpha} \text{ converge} \iff \alpha > 1 \quad (2)$$

Démonstration. \diamond Supposons $\alpha < 0$ alors, $\frac{1}{n^\alpha} = n^{|\alpha|} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ donc la série est grossièrement divergente.

\diamond Supposons $\alpha = 0$ alors $\frac{1}{n^\alpha} = 1 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1$ donc la série est grossièrement divergente.

\diamond Supposons $\alpha > 0$ Cherchons un équivalent de

$$\frac{1}{(n+1)^\beta} - \frac{1}{n^\beta}$$

en fonction de $\beta \in \mathbb{R}^*$

$$\begin{aligned} \frac{1}{(n+1)^\beta} - \frac{1}{n^\beta} &= \frac{1}{n^\beta} \left(\frac{1}{(1 + \frac{1}{n})^\beta} - 1 \right) \\ &= \frac{1}{n^\beta} \left[\left(1 + \frac{1}{n} \right)^{-\beta} - 1 \right] \\ &\approx \frac{1}{n^\beta} \times \left(-\frac{\beta}{n} \right) \\ &\approx -\frac{\beta}{n^{\beta+1}} \end{aligned}$$

\star Pour $\alpha \in]0, +\infty[\setminus \{1\}$ Appliquons le calcul ci-dessus pour $\beta \leftarrow \alpha - 1$ (autorisé car $\alpha \neq 1 \implies \alpha - 1 \neq 0$)

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

De plus, $(-\frac{\alpha-1}{n^\alpha})_{n \geq 1}$ est de signe constant donc, d'après le critère d'équivalence, $\sum_{n \geq 1} \frac{-(\alpha-1)}{n^\alpha}$ est de même nature que la série télescopique $\sum_{n \geq 1} (\frac{1}{(n+1)^{\alpha-1}} - \frac{1}{n^{\alpha-1}})$. Or, la série télescopique est de même nature que $(\frac{1}{n^{\alpha-1}})_{n \geq 1}$.

Donc par transitivité, puisque $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^\alpha}$ est de même nature que $\sum_{n \geq 1} \frac{-(\alpha-1)}{n^\alpha}$, la série de Riemann est de même nature que $(\frac{1}{n^{\alpha-1}})_{n \geq 1}$. Or, $(\frac{1}{n^{\alpha-1}})_{n \geq 1}$ converge pour $\alpha > 1$ et diverge pour $\alpha \in]0, 1[$.

\star Si $\alpha = 1$ Appliquons la comparaison série intégrale pour $f \leftarrow (x \mapsto \frac{1}{x}) \begin{cases} \in \mathcal{C}^0([1, +\infty[, \mathbb{R}) \\ \text{décroissante sur } [1, +\infty[\end{cases}$

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, \int_1^{n+1} \frac{du}{u} \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$$

Ainsi,

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, \underbrace{\ln(n+1)}_{\xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty} \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$$

Donc la série diverge. □

4 Comparaison série-intégrale

Soit $n_0 \in \mathbb{N}$. Soit $f : [n_0, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue et décroissante. Nous avons l'encadrement suivant :

$$\int_{n_0}^{n+1} f(t) dt \leq \sum_{k=n_0}^n f(k) \leq f(n_0) + \int_{n_0}^n f(t) dt \quad (3)$$

Démonstration. Soit $k \in \llbracket n_0, +\infty \rrbracket$ fixé quelconque.

$$\begin{aligned} \forall t \in [k, k+1], \quad f(k+1) &\leq f(t) \leq f(k) \\ \int_k^{k+1} f(k+1) \, dt &\leq \int_k^{k+1} f(t) \, dt \leq \int_k^{k+1} f(k) \, dt \\ f(k+1) &\leq \int_k^{k+1} f(t) \, dt \leq f(k) \end{aligned}$$

Ainsi

$$\begin{aligned} \sum_{k=n_0}^n \int_k^{k+1} f(t) \, dt &\leq \sum_{k=n_0}^n f(k) \\ \int_{n_0}^{n+1} f(t) \, dt &\leq \sum_{k=n_0}^n f(k) \end{aligned}$$

De même,

$$\begin{aligned} \forall k \in \llbracket n_0 + 1, +\infty \rrbracket, f(k) &\leq \int_{k-1}^k f(t) \, dt \\ \sum_{k=n_0+1}^n f(k) &\leq \sum_{k=n_0+1}^n \int_{k-1}^k f(t) \, dt \\ \sum_{k=n_0}^n f(k) &\leq f(n_0) + \int_{n_0}^n f(t) \, dt \end{aligned}$$

D'où l'encadrement. □

5 Pour f continue sur $[n_0, +\infty[$, décroissante et minorée, $\sum_{n \geq n_0} \left(f(n) - \int_n^{n+1} f(u) \, du \right)$ converge. Application au DA en $o(1)$ de la somme partielle de la série harmonique

Soit $n_0 \in \mathbb{N}$ et $f : [n_0, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue, décroissante et minorée par $m \in \mathbb{R}$. Alors la série de terme général

$$\left(f(n) - \int_n^{n+1} f(u) \, du \right)_{n \geq n_0}$$

est à termes positifs ou nuls et converge.

Démonstration. Montrons que la suite $(S_n)_{n \geq n_0}$ est majorée, et que la suite est à termes ≥ 0 . La décroissance de f donne l'encadrement suivant

$$\forall n \in \llbracket n_0, +\infty \rrbracket, f(n) - \int_n^{n+1} f(t) \, dt \geq 0$$

La comparaison série intégrale s'applique donc à f qui est décroissante et continue et donne

$$\begin{aligned} \forall n \in \llbracket n_0, +\infty \rrbracket, f(n+1) &\leq \int_n^{n+1} f(t) \, dt \leq f(n) \implies -f(n+1) \geq -\int_n^{n+1} f(t) \, dt \\ &\implies f(n) - f(n+1) \geq f(n) - \int_n^{n+1} f(t) \, dt \geq 0 \end{aligned}$$

En sommant sur $k \in \llbracket n_0, n \rrbracket$

$$\sum_{k=n_0}^n (f(k) - f(k+1)) \geq \sum_{k=n_0}^n \left(f(k) - \int_k^{k+1} f(t) dt \right) = S_n$$

En reconnaissant un phénomène télescopique

$$S_n \leq f(n_0) - f(n+1) \leq f(n_0) - m$$

Donc $(S_n)_{n \geq n_0}$ est croissante et majorée, elle converge.

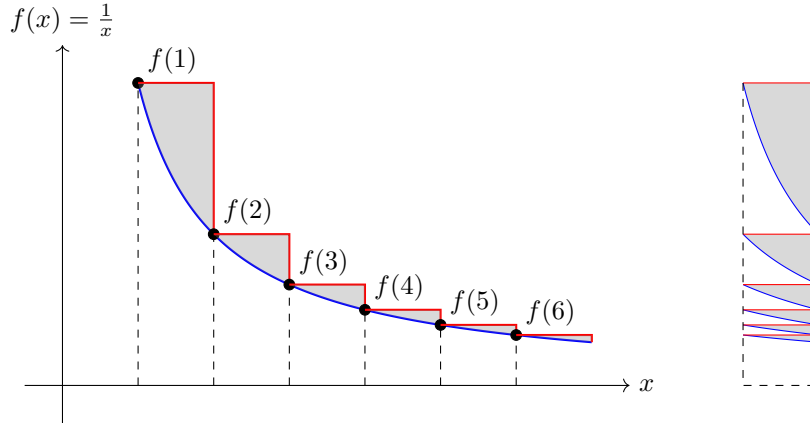


FIGURE 1 – Une visualisation graphique de la bornitude de $(S_n)_{n \geq n_0}$ pour le cas particulier de $f \leftarrow (x \mapsto 1/x)$, $m \leftarrow 0$, $n_0 \leftarrow 1$. On interprète chaque terme de la somme comme l'aire du rectangle à laquelle on retranche l'aire sous la courbe : cela correspond à l'aire grise, qui peut être aisément installée dans un rectangle d'aire $f(1)$.

Application au DA en $o(1)$ de la somme partielle de la série harmonique. Appliquons ce qui précède pour $f = x \mapsto 1/x$ et $n_0 = 1$. f est bien continue, décroissante et minorée (par 0). sur $[1; +\infty[$. Donc $\sum_{n \geq 1} \left(\frac{1}{n} - \int_n^{n+1} \frac{du}{u} \right)$ converge.

Notons γ sa somme. Ainsi $\sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{k} - \int_k^{k+1} \frac{du}{u} \right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \gamma + o(1)$.

Remarquons que, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{k} - \int_k^{k+1} \frac{du}{u} \right) = H_n - \sum_{k=1}^n (\ln(k+1) - \ln(k)) = H_n - \ln(n+1) + \ln 1 = H_n - \ln(n+1)$.

Donc $H_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \ln(n+1) + \gamma + o(1) = \ln n + \ln(1 + 1/n) + \gamma + o(1)$.

$$H_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \ln n + \gamma + o(1)$$

La constante γ est appelé la constante d'Euler-Mascheroni et vaut environ 0,5772156649. □

6 Théorème des séries alternées

Soit $(a_n)_{n \geq n_0} \in \mathbb{R}^{[n_0, +\infty[}$ une suite réelle. Si

$$\begin{cases} \forall n \in [n_0, +\infty[, a_n \geq 0 \\ (a_n)_{n \geq n_0} \text{ est décroissante} \\ \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0 \end{cases}$$

alors $\sum_{n \geq n_0} (-1)^n a_n$

Démonstration. \diamond Traitons le cas $n_0 \equiv 0[2]$ il existe $p_0 \in \mathbb{N} : n_0 = 2p_0$

★ Les suites $(S_{2p})_{p \geq p_0}$ et $(S_{2p+1})_{p \geq p_0}$ sont adjacentes :

$$\begin{aligned} \forall p \in \llbracket p_0, +\infty \llbracket, S_{2(p+1)} - S_{2p} &= S_{2p+2} - S_{2p} \\ &= \sum_{k=2p_0}^{2p+2} (-1)^k a_k + \sum_{k=2p_0}^{2p} (-1)^k a_k \\ &= -a_{2p+1} + a_{2p+2} \leq 0 \text{ car } a \downarrow \end{aligned}$$

$$S_{2(p+1)+1} - S_{2p+1} = S_{2p+3} - S_{2p+1} = (-1)^{2p+2} a_{2p+2} + (-1)^{2p+3} a_{2p+3} = a_{2p+2} - a_{2p+3} \geq 0 \text{ car } a \downarrow$$

Donc (S_{2p}) est décroissante et (S_{2p+1}) est croissante. De plus

$$S_{2p+1} - S_{2p} = (-1)^{2p+2} a_{2p+1} = \underbrace{-a_{2p+1}}_{\xrightarrow[p \rightarrow \infty]{} 0} \leq 0 \text{ car } a \text{ positive}$$

Ainsi $(S_{2p})_{p \geq p_0}$ et $(S_{2p+1})_{p \geq p_0}$ sont adjacentes.

- ★ Donc d'après le théorème des suites adjacentes, (S_{2p}) et (S_{2p+1}) convergent vers une même limite ℓ , si bien que (S_n) converge vers ℓ .
- ★ De plus, les suites $(S_{2p})_{p \geq p_0}$ et $(S_{2p+1})_{p \geq p_0}$ étant adjacentes, pour $n \geq n_0$ posons $R_n = \ell - S_n$
 - Si $n \equiv 0[2]$, $\exists p \in \llbracket p_0, +\infty \llbracket$: $n = 2p$ donc, puisque (S_{2p}) est décroissante et (S_{2p+1}) est croissante, on a

$$S_{2p+1} \leq \ell \leq S_{2p} \implies S_{2p+1} - S_{2p} \leq \ell - S_{2p} \leq 0 \implies |R_{2p}| = |\ell - S_{2p}| \leq a_{2p+1}$$

- Si $n \equiv 1[2]$ $\exists p \in \llbracket p_0, +\infty \llbracket$: $n = 2p + 1$

$$S_{2p+1} \leq \ell \leq S_{2p+2} \implies 0 \leq \ell - S_{2p+1} \leq S_{2p+2} - S_{2p+1} = (-1)^{2p+2} a_{2p+2} = a_{2p+2}$$

$$\text{donc } |R_{2p+1}| = |\ell - S_{2p+1}| \leq a_{2p+2}$$

Bonus, par croissance de (S_{2p+1}) qui converge vers ℓ , $S_{2p+1} \leq \ell$ donc $a_{2p_0} - a_{2p_0+1} \leq \ell$ Donc $\ell \geq 0$ qui est bien le signe du premier terme de la série $(-1)^{n_0} a_{n_0}$ car $n_0 \equiv 0[2]$.

◇ Le cas $n_0 \equiv 1[2]$ se traite de la même manière

□

7 L'absolue convergence implique la convergence

Soit $u \in \mathbb{K}^{\llbracket n_0, +\infty \llbracket}$ Si la série $\sum_{n \geq n_0} u_n$ est absolument convergente, alors la série $\sum_{n \geq n_0} u_n$ est convergente.

Démonstration. ◇ Supposons que u est le terme général réel d'une série absolument convergente. Posons, pour tout $n \in \llbracket n_0, +\infty \llbracket$, $u_n^+ = \max(u_n, 0)$ et $u_n^- = -\min(u_n, 0)$ Avec ces notations, $u_n^+ - u_n^- = u_n$ et $u_n^+ + u_n^- = |u_n|$.

$$\forall n \in \llbracket n_0, +\infty \llbracket, u_n^+ \geq 0 \text{ et } u_n^- \geq 0$$

$$\left. \begin{array}{l} \forall n \geq n_0, 0 \leq u_n^+ \leq |u_n| = u_n^+ + u_n^- \\ \sum_{n \geq n_0} u_n \text{ est ACV} \implies \sum_{n \geq n_0} |u_n| \text{ CV} \\ \forall n \geq n_0, u_n^+ \geq 0 \text{ et } |u_n| \geq 0 \end{array} \right\} \implies \sum_{n \geq n_0} u_n^+ \text{ converge}$$

On montre de même que $\sum_{n \geq n_0} u_n^-$ converge, donc, par structure vectorielle de l'ensemble des termes généraux de suites convergentes, $\sum_{n \geq n_0} (u_n^+ - u_n^-) = \sum_{n \geq n_0} u_n$ converge

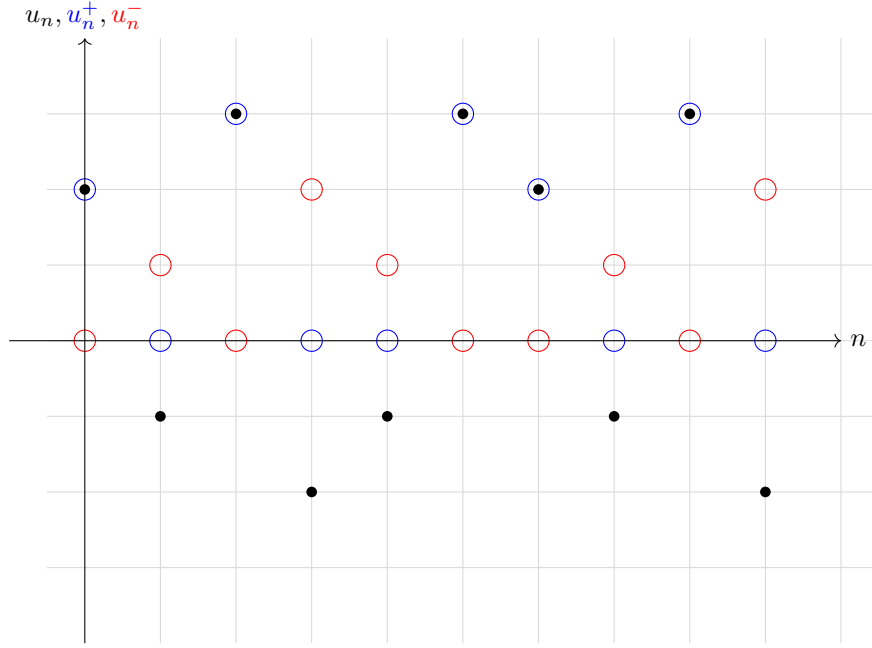


FIGURE 2 – Décomposition de la suite u en u^+ et u^- , les "partie positive" et "partie négative". Graphiquement, on retrouve $u_n^+ + u_n^- = |u_n|$ et $u_n^+ - u_n^- = u_n$

◇ Cas d'une série complexe,

Posons, $\forall n \geq n_0, x_n = \text{Re}(u_n)$ et $y_n = \text{Im}(u_n)$ Alors,

$$\left. \begin{array}{l} \forall n \geq n_0, |x_n| \leq |\text{Re}(u_n)| \leq |u_n| \\ \forall n \geq n_0, |x_n| \geq 0 \text{ et } |u_n| \geq 0 \\ \sum_{n \geq n_0} u_n \text{ ACV} \implies \sum_{n \geq n_0} |u_n| \text{ CV} \end{array} \right\} \implies \sum_{n \geq n_0} |x_n| \text{ converge}$$

Donc d'après le cas réel, $\sum_{n \geq n_0} x_n$ converge. On montre de même que $\sum_{n \geq n_0} y_n$ converge. Donc, par structure vectorielle, $\sum_{n \geq n_0} (x_n + iy_n)$ converge. Donc u_n est le terme général d'une série convergente.

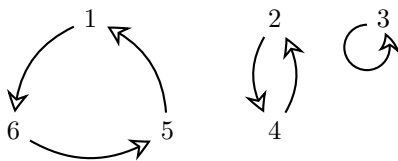
□

8 Décomposition d'une permutation en produit de cycles à supports disjoints puis en produit de transposition et calcul de son ordre

Démonstration. Prenons pour illustrer la décomposition

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & \mapsto & 6 \\ 2 & \mapsto & 4 \\ 3 & \mapsto & 3 \\ 4 & \mapsto & 2 \\ 5 & \mapsto & 1 \\ 6 & \mapsto & 5 \end{pmatrix} \in \mathcal{S}_6$$

Il faut réaliser un "graphe des images". Chaque sommet est un nombre de $\llbracket 1; 6 \rrbracket$ et pointe vers son image.



Nous pouvons voir que $\sigma = (1, 6, 5) \circ (2, 4)$. De plus, $(1, 6, 5) = (1, 6) \circ (6, 5) \circ (5, 1)$. Donc $\sigma = (1, 6) \circ (6, 5) \circ (5, 1) \circ (2, 4)$.

L'ordre d'une permutation est défini par $p(\sigma) = \min\{n \in \mathbb{N}^* \mid \sigma^n = Id\}$. $p(\sigma)$ est aussi le PPCM des ordres des permutations de sa décomposition en produit de cycles à supports disjoints. Ici, $p(\sigma) = 2 \vee 3 = 6$. \square