

Chapitre 35

Familles sommables

35 Familles sommables	1
35.2 Reformulation	2
35.5 Croissance de la somme	2
35.8 Lien avec les séries à termes positifs	3
35.10 Invariance de la somme d'une série à termes positifs par permutation des termes	3
35.12 Restriction	3
35.13 Preque linéarité	4
35.14 Sommation par paquets	4
35.16 Théorème de Fubini positif	5
35.17 Exemple	5
35.18 Exemple	5
35.19 Exemple	6
35.25 Caractérisation de la sommabilité par les parties réelles et imaginaires, parties positives et négatives	7
35.27 Caractérisation de la somme par les ϵ	7
35.28 Linéarité	8

35.2 Reformulation

Proposition 35.2

Soit $\sum a_n$ une série à termes positifs. Alors $\sum_{n \geq 0} a_n$ est bien définie dans $\overline{\mathbb{R}}_+$ et

$$\sum_{n \geq 0} a_n = \sup \left\{ \sum_{k \in J} a_k, J \in \mathcal{P}_f(\mathbb{N}) \right\}$$

En notant, pour $n \in \mathbb{N}$, $S_n = \sum_{k=0}^n a_k$, on a :

$$S_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \sum_{k \geq 0} a_k$$

Or pour tout $n \in \mathbb{N}$, $S_n \in \left\{ \sum_{k \in J} a_k \mid J \in \mathcal{P}_f(\mathbb{N}) \right\}$.

Donc $\sum_{k \geq 0} a_k \leq \sup \left\{ \sum_{k \in J} a_k \mid J \in \mathcal{P}_f(\mathbb{N}) \right\} = S$.

Par ailleurs, pour $J \in \mathcal{P}_f(\mathbb{N})$, on pose $N = \max J$ et $J \subset \llbracket 0, N \rrbracket$ et :

$$\sum_{k \in J} a_k \leq \sum_{k=0}^N a_k \leq \sum_{k \geq 0} a_k$$

Par définition de la borne supérieure :

$$S \leq \sum_{k \geq 0} a_k$$

Donc :

$$\sum_{k \geq 0} a_k = S$$

35.5 Croissance de la somme

Proposition 35.5

Soit $(a_i)_{i \in I}$ et $(b_i)_{i \in I}$ deux familles à valeurs dans $\overline{\mathbb{R}}_+$. Si pour tout $i \in I$, $a_i \leq b_i$, alors

$$\sum_{i \in I} a_i \leq \sum_{i \in I} b_i$$

Soit $J \in \mathcal{P}_f(I)$. Comme :

$$\forall i \in J, a_i \leq b_i$$

Alors :

$$\sum_{i \in J} a_i \leq \sum_{i \in J} b_i \leq \sum_{i \in I} b_i$$

$\sum_{i \in I} b_i$ est un majorant de $\left\{ \sum_{i \in J} a_i \mid J \in \mathcal{P}_f(I) \right\}$.

Par définition :

$$\sum_{i \in I} a_i \leq \sum_{i \in I} b_i$$

35.8 Lien avec les séries à termes positifs

Proposition 35.8

Soit $\sum a_n$ une série à termes positifs.

1. On a $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n = \sum_{n \in \mathbb{N}} a_n$ (le terme de gauche correspond à la somme de la série tandis que le terme de droite à la somme de la famille sommable).
2. En particulier, $\sum a_n$ converge si et seulement si la famille $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est sommable.

1. (35.2)
2. Théorème de la Limite Monotone

35.10 Invariance de la somme d'une série à termes positifs par permutation des termes

Corollaire 35.10

Soit $\sum a_n$ une série à termes positifs et $\sigma \in S_{\mathbb{N}}$. Alors

$$\sum_{n=0}^{+\infty} a_n = \sum_{n=0}^{+\infty} a_{\sigma(n)}$$

Cette égalité reste vraie dans $\overline{\mathbb{R}}_+$.

Soit $\sigma \in S_{\mathbb{N}}$.

σ induit une bijection $\mathcal{P}_f(\mathbb{N}) \rightarrow \mathcal{P}_f(\mathbb{N}); J \mapsto \sigma(J)$ de $\{\sum_{i \in J} a_i \mid J \in \mathcal{P}_f(\mathbb{N})\}$ sur $\{\sum_{i \in I} a_{\sigma(i)} \mid J \in \mathcal{P}_f(\mathbb{N})\}$. Ces deux ensembles ont donc la même borne supérieure. Donc :

$$\sum_{i \in \mathbb{N}} a_i = \sum_{i \in \mathbb{N}} a_{\sigma(i)}$$

Soit :

$$\sum_{i=0}^{+\infty} a_i = \sum_{i=0}^{+\infty} a_{\sigma(i)} \quad (35.8)$$

35.12 Restriction

Proposition 35.12

Soit $(a_i)_{i \in I}$ une famille d'éléments de $\overline{\mathbb{R}}_+$. Soit $J \subset I$, alors :

$$\sum_{i \in J} a_i \leq \sum_{i \in I} a_i$$

Comme $\mathcal{P}_f(J) \subset \mathcal{P}_f(I)$:

$$\left\{ \sum_{j \in K} a_j \mid K \in \mathcal{P}_f(J) \right\} \subset \left\{ \sum_{j \in K} a_j \mid K \in \mathcal{P}_f(I) \right\}$$

Donc (Chapitre 9) :

$$\sum_{i \in J} a_i \leq \sum_{i \in I} a_i$$

35.13 Preque linéarité

Proposition 35.13

Soit (a_i) et (b_i) deux familles d'éléments de $\overline{\mathbb{R}}_+$ et $(\lambda, \mu) \in \overline{\mathbb{R}}_+^2$. On a

$$\sum_{i \in I} (\lambda a_i + \mu b_i) = \lambda \sum_{i \in I} a_i + \mu \sum_{i \in I} b_i$$

On rappelle (Chapitre 9) que :

$$\sup(aA + bB) = a \sup A + b \sup B$$

($a \geq 0, b \geq 0$ et $\sup A, \sup B$ existent).

35.14 Sommation par paquets

Théorème 35.14

Soit I un ensemble quelconque et $I = \bigsqcup_{k \in K} I_k$ un recouvrement disjoint de I . Soit $a = (a_i)_{i \in I}$ une famille d'éléments de $\overline{\mathbb{R}}_+$. Alors

$$\sum_{i \in I} a_i = \sum_{k \in K} \left(\sum_{i \in I_k} a_i \right)$$

— Montrons que $\sum_{i \in I} a_i \leq \sum_{k \in K} \left(\sum_{i \in I_k} a_i \right)$:

Soit $J \in \mathcal{P}_f(I)$.

Pour tout $k \in K$, on note $J_k = J \cap I_k$.

Ainsi, $J_k \in \mathcal{P}_f(I_k)$ et :

$$\begin{aligned} \bigsqcup_{k \in K} J_k &= \bigsqcup_{k \in K} (J \cap I_k) \\ &= J \cap \bigsqcup_{k \in K} I_k \\ &= J \cap I \\ &= J \end{aligned}$$

On pose également $L = \{k \in K, J_k \neq \emptyset\}$.

Alors $L \in \mathcal{P}_f(K)$ et :

$$\bigsqcup_{k \in L} J_k = \bigsqcup_{k \in K} J_k = J$$

Les ensembles étant finis :

$$\sum_{i \in J} a_i = \sum_{k \in L} \sum_{i \in J_k} a_i \leq \sum_{k \in L} \sum_{i \in I_k} a_i \leq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I_k} a_i$$

Par définition de la borne supérieure :

$$\sum_{i \in I} a_i \leq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I_k} a_i$$

— On prouve $\sum_{k \in K} \sum_{i \in I_k} a_i \leq \sum_{i \in I} a_i$.

Soit $L \in \mathcal{P}_f(K)$.

Soit, pour $k \in L$, $J_k \in \mathcal{P}_f(I_k)$. $\bigsqcup_{k \in L} J_k$ est donc une partie finie de I .

$$\underbrace{\sum_{k \in L} \sum_{i \in J_k} a_i}_{\text{car } \bigsqcup_{k \in L} J_k \text{ est fini}} \leq \sum_{i \in I} a_i$$

En utilisant un nombre fini de fois la définition de la borne supérieure :

$$\sum_{k \in L} \sum_{i \in I_k} a_i \leq \sum_{i \in I} a_i$$

Toujours par définition de la borne supérieure :

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I_k} a_i \leq \sum_{i \in I} a_i$$

35.16 Théorème de Fubini positif

Corollaire 35.16

Soit I et J deux ensembles quelconques et $(a_{i,j})_{(i,j) \in I \times J}$ une famille de réels positifs. Alors

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_{i,j} = \sum_{(i,j) \in I \times J} a_{i,j} = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} a_{i,j}$$

$$\bigsqcup_{j \in J} I \times \{j\} = I \times J = \bigsqcup_{i \in I} \{i\} \times J$$

On conclut avec le théorème de sommation par paquets.

35.17 Exemple

Exemple 35.17

Montrer que $\sum_{n \geq 2} (\zeta(n) - 1) = 1$.

$(\frac{1}{k^n})_{n \geq 2, k \geq 2}$ est une famille de \mathbb{R}_+ .

$$\begin{aligned} \sum_{n \geq 2} \left(\sum_{k \geq 1} \frac{1}{k^n} - 1 \right) &= \sum_{n \geq 2} \left(\sum_{k \geq 2} \frac{1}{k^n} \right) \\ &= \sum_{k \geq 2} \left(\sum_{n \geq 2} \frac{1}{k^n} \right) \quad (\text{Fubini positif}) \\ &= \sum_{k \geq 2} \left(\frac{1}{k^2} \frac{1}{1 - \frac{1}{k}} \right) \quad (\text{progresion géométrique}) \\ &= \sum_{k \geq 2} \frac{1}{k^2 - k} \\ &= \sum_{k \geq 2} \left(\frac{1}{k-1} - \frac{1}{k} \right) \quad (\text{DES}) \\ &= 1 \quad (\text{télescopage}) \end{aligned}$$

35.18 Exemple

Exemple 35.18

Montrer que :

$$\sum_{n \geq 1} \frac{n}{2^n} = 2$$

$(\frac{1}{2^n})_{1 \leq k \leq n}$ est une famille de \mathbb{R}_+ .

$$\begin{aligned} \sum_{n \geq 1} \frac{n}{2^n} &= \sum_{n \geq 1} \sum_{k=1}^n \frac{1}{2^k} \\ &= \sum_{1 \leq k \leq n} \frac{1}{2^n} \\ &= \sum_{k \geq 1} \left(\sum_{n \geq k} \frac{1}{2^n} \right) \text{ (Fubini positif)} \\ &= \sum_{k \geq 1} \frac{1}{2^k} \frac{1}{1 - \frac{1}{2}} \text{ (progresion géométrique)} \\ &= \sum_{k \geq 1} \frac{1}{2^{k-1}} \\ &= 2 \end{aligned}$$

35.19 Exemple

Exemple 35.19

Pour quelles valeurs de $\alpha \in \mathbb{R}$ la somme $\sum_{p,q \in \mathbb{N}^*} \frac{pq}{(p+q)^\alpha}$ est-elle réelle ?

$(\frac{pq}{(p+q)^\alpha})_{p,q \geq 1}$ est une famille de réels positifs.

$$\begin{aligned} \sum_{p \geq 1, q \geq 1} \frac{pq}{(p+q)^\alpha} &= \sum_{d \geq 1} \sum_{p=0}^d \frac{p(d-p)}{d^\alpha} \text{ (sommatation par paquets)} \\ &= \sum_{d \geq 2} \sum_{p=0}^d \frac{p(d-p)}{d^\alpha} \\ &= \sum_{d \geq 2} \sum_{p=0}^d \left(\frac{p}{d^{\alpha-1}} - \frac{p^2}{d^\alpha} \right) \\ &= \sum_{d \geq 2} \left(\frac{d(d+1)}{2d^{\alpha-1}} - \frac{d(d+1)(2d+1)}{6d^{\alpha-1}} \right) \text{ (sommes usuelles)} \\ &= \sum_{d \geq 2} \frac{d+1}{d^{\alpha-1}} (3d - 2d - 1) \\ &= \sum_{d \geq 2} \frac{d^2 - 1}{6d^{\alpha-1}} \end{aligned}$$

Or :

$$\frac{d^2 - 1}{6d^{\alpha-1}} \sim \frac{1}{6d^{\alpha-3}}$$

D'après le TCSATTPE, la somme est finie si et seulement si $\alpha > 4$.

35.25 Caractérisation de la sommabilité par les parties réelles et imaginaires, parties positives et négatives

Théorème 35.5

1. Soit $(a_i)_{i \in I}$ une famille de réels. Alors $(a_i)_{i \in I}$ est sommable si et seulement si $(a_i^+)_{i \in I}$ et $(a_i^-)_{i \in I}$ le sont.
2. Soit $(a_i)_{i \in I}$ une famille de complexes. Alors $(a_i)_{i \in I}$ est sommable si et seulement si $(\operatorname{Re}(a_i))_{i \in I}$ et $(\operatorname{Im}(a_i))_{i \in I}$ le sont.

1. On rappelle que :

$$\forall i \in I, a_i = a_i^+ - a_i^-$$

et :

$$\begin{aligned} \forall i \in I, 0 \leq a_i^+ \leq |a_i| \\ 0 \leq a_i^- \leq |a_i| \end{aligned}$$

Si (a_i) est sommable, alors $(a_i^+)_{i \in I}$ et $(a_i^-)_{i \in I}$ le sont aussi (35.24).
Par ailleurs, d'après l'inégalité triangulaire :

$$\forall i \in I, |a_i| \leq a_i^+ + a_i^-$$

Donc si $(a_i^+)_{i \in I}$ et $(a_i^-)_{i \in I}$ sont sommables, alors (a_i) est sommable (35.24) et (35.13).

2. Démonstration similaire.

35.27 Caractérisation de la somme par les ϵ

Proposition 35.27

Soit $(a_i)_{i \in I} \in \ell(I)$ et $S \in \mathbb{C}$. Les assertions suivantes sont équivalentes :

1. $S = \sum_{i \in I} a_i$
2. pour tout $\epsilon > 0$, il existe $J_\epsilon \in \mathcal{P}_f(I)$ tel que pour tout $K \in \mathcal{P}_f(I)$ avec $J_\epsilon \subset K$:

$$\left| S - \sum_{i \in K} a_i \right| \leq \epsilon$$



On suppose que $S = \sum_{i \in I} a_i$ (avec (a_i) une famille de réels).

On décompose :

$$\forall i \in I, a_i = a_i^+ - a_i^-$$

Et :

$$S = \sum_{i \in I} a_i^+ - \sum_{i \in I} a_i^- = S^+ - S^-$$

On note également :

$$\begin{aligned} A_+ &= \left\{ \sum_{i \in J} a_i^+ \mid J \in \mathcal{P}_f(I) \right\} \\ A_- &= \left\{ \sum_{i \in J} a_i^- \mid J \in \mathcal{P}_f(I) \right\} \end{aligned}$$

Soit $\epsilon > 0$.

$S^+ - \frac{\epsilon}{2}$ ne majore pas A_+ , on choisit $J_\epsilon^+ \in \mathcal{P}_f(I)$ tel que :

$$S^+ - \frac{\epsilon}{2} < \sum_{i \in J_\epsilon^+} a_i^+$$

Pour les mêmes raisons, on choisit $J_\epsilon^- \in \mathcal{P}_f(I)$ tel que :

$$S^- - \frac{\epsilon}{2} < \sum_{i \in J_\epsilon^-} a_i^-$$

Pour tout $K \in \mathcal{P}_f(I)$ avec $K \supset J_\epsilon = J_\epsilon^+ \cup J_\epsilon^-$.

$$\begin{aligned} S^+ - \frac{\epsilon}{2} &< \sum_{i \in J_\epsilon^+} a_i^+ \leq \sum_{i \in K} a_i^+ \\ S^- - \frac{\epsilon}{2} &< \sum_{i \in J_\epsilon^-} a_i^- \leq \sum_{i \in K} a_i^- \end{aligned}$$

Et ainsi :

$$\begin{aligned} \left| S - \sum_{i \in K} a_i \right| &= \left| S^+ - \sum_{i \in K} a_i^+ - S^- + \sum_{i \in K} a_i^- \right| \\ &\leq \left| S^+ - \sum_{i \in K} a_i^+ \right| + \left| S^- - \sum_{i \in K} a_i^- \right| \\ &\leq \frac{\epsilon}{2} + \frac{\epsilon}{2} \\ &= \epsilon \end{aligned}$$

◁

Supposons qu'il existe S et S' vérifiant la condition 2. Alors pour tout $\epsilon > 0$, n notant J_ϵ l'ensemble de l'assertion :

$$\begin{aligned} |S - S'| &= \left| S - \sum_{i \in J_\epsilon} a_i + \sum_{i \in J_\epsilon} a_i - S' \right| \\ &\leq 2\epsilon \end{aligned}$$

Donc $S = S'$.

35.28 Linéarité

Théorème 35.28

L'ensemble $\ell^1(I)$ est un \mathbb{C} -espace vectoriel et $(a_i)_{i \in I} \rightarrow \sum_{i \in I} a_i$ est une forme linéaire sur $\ell^1(I)$.

Soit $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou \mathbb{C} .

- $\ell^1(I) \subset \mathbb{K}^I$.
- Soit $(a_i), (b_i)$ dans $\ell^1(I)$, $(\lambda, \mu) \in \mathbb{K}^2$. On a :

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} |\lambda a_i + \mu b_i| &\leq \sum_{i \in I} |\lambda| |a_i| + |\mu| |b_i| \\ &\leq |\lambda| \sum_{i \in I} |a_i| + |\mu| \sum_{i \in I} |b_i| \\ &< +\infty \end{aligned}$$

Donc $(\lambda a_i + \mu b_i)_{i \in I} \in \ell^1(I)$.

- Soit $\epsilon > 0$. Soit $J_\epsilon^a \in \mathcal{P}_f(I)$ tel que :

$$\forall K \in \mathcal{P}_f(I), K \supset J_\epsilon^a, \left| \sum_{i \in I} a_i - \sum_{i \in K} a_i \right| < \epsilon$$

On pose $J_\epsilon = J_\epsilon^a \cup J_\epsilon^b$.

On a alors, pour $K \in \mathcal{P}_f(I), K \supset J_\epsilon$:

$$\begin{aligned} \left| \lambda \sum_{i \in I} a_i + \mu \sum_{i \in I} b_i - \sum_{i \in K} (\lambda a_i + \mu b_i) \right| &= \left| \lambda \sum_{i \in I} a_i - \lambda \sum_{i \in K} a_i + \mu \sum_{i \in I} b_i - \mu \sum_{i \in K} b_i \right| \\ &\leq |\lambda| \left| \sum_{i \in I} a_i - \sum_{i \in K} a_i \right| + |\mu| \left| \sum_{i \in I} b_i - \sum_{i \in K} b_i \right| \\ &\leq (|\lambda| + |\mu|)\epsilon \end{aligned}$$

D'après (35.27), on a donc :

$$\sum_{i \in I} (\lambda a_i + \mu b_i) = \lambda \sum_{i \in I} a_i + \mu \sum_{i \in I} b_i$$