

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

35.2 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.