

Dénombrabilité, Sommabilité

RAPPELS...

1 ... sur des sommes finies

■ Il faut connaître $\sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2}$, $\sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$ et

$\sum_{k=1}^n k^3 = \frac{n^2(n+1)^2}{4}$ et savoir continuer, par télescopage de $(k+1)^n - k^n$.

■ On sait aussi calculer $\sum_{k=0}^n x^k = \frac{1-x^{n+1}}{1-x}$

$$\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k = (1+x)^n$$

■ La formule $\sum_{i \in I} \left(\sum_{j \in J} a_{i,j} \right) = \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I} a_{i,j} \right)$, si I et J sont deux ensembles finis, est une conséquence de la commutativité et de l'associativité de l'addition.

Dans le cas de sommes triangulaires, l'interversion peut aussi se faire en étant prudent sur les bornes : par exemple, il faut être à l'aise avec

$$\sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=i}^n a_{i,j} \right) = \sum_{0 \leq i \leq j \leq n} a_{i,j} = \sum_{j=0}^n \left(\sum_{i=0}^j a_{i,j} \right).$$

Si on a une hésitation, un artifice simple : posons $a_{i,j} = 0$ si $j < i$. Alors

$$\sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=i}^n a_{i,j} \right) = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=0}^n a_{i,j} \right) = \sum_{j=0}^n \left(\sum_{i=0}^n a_{i,j} \right) = \sum_{j=0}^n \left(\sum_{i=0}^j a_{i,j} \right).$$

On peut aussi représenter l'ensemble des couples (i, j) d'indexation pour « voir » ce qui se passe.

Signalons enfin la distributivité de la multiplication sur l'addition (si on est dans un anneau), qui permet d'écrire

$$\left(\sum_{i \in I} a_i \right) \left(\sum_{j \in J} b_j \right) = \sum_{i \in I} \left(\sum_{j \in J} a_i b_j \right) = \sum_{(i,j) \in I \times J} a_i b_j$$

2 ... et sur les ensembles finis

Définition 1 : Ensemble fini, cardinal

Un ensemble E est dit **fini** s'il est vide ou s'il existe un $n \in \mathbb{N}^*$ et une bijection entre $\llbracket 1, n \rrbracket$ et E .
 n est le **cardinal** de E , noté $|E| = \#E = \#E$.
 On pose $|\emptyset| = 0$.

Remarque

R1 – On dit aussi que E est équipotent à $\llbracket 1, n \rrbracket$.
 Cela revient à numéroter les éléments de E :
 $E = \{x_k, k \in \llbracket 1, n \rrbracket\}$.

Propriété 1 : des cardinaux

Soient E, F deux ensembles finis.

(i) Si $A \in \mathcal{P}(E)$, A fini et $|A| \leq |E|$, avec égalité si et seulement si $A = E$.

(ii) Si $A, B \in \mathcal{P}(E)$ disjoints ($A \cap B = \emptyset$), $|A \cup B| = |A| + |B|$.

(iii) Si $A, B \in \mathcal{P}(E)$, $|A \cup B| = |A| + |B| - |A \cap B|$.

(iv) Si $A \in \mathcal{P}(E)$, $|E \setminus A| = |E| - |A|$.

(v) Si $A, B \in \mathcal{P}(E)$, $|A \setminus B| = |A| - |A \cap B|$.

(vi) $E \times F$ est fini et $|E \times F| = |E| \cdot |F|$.

(vii) F^E est fini et $|F^E| = |F|^{|E|}$.

(viii) $\mathcal{P}(E)$ est fini et $|\mathcal{P}(E)| = 2^{|E|}$.

Exercice 1 : CCINP 112

ENSEMBLES DÉNOMBRABLES

1 Définition

Définition 2 : Ensemble dénombrable, énumération

Remarque

R2 – On peut compter ses éléments... sans s'arrêter!
 Il a en quelques sortes autant d'éléments que \mathbb{N} .

On peut écrire $E = \{x_n, n \in \mathbb{N}\}$.

Trouver une bijection entre E et \mathbb{N} , ou entre \mathbb{N} et E , cela revient au même.

Exemple

E1 – \mathbb{N} est dénombrable.

E2 – $2\mathbb{N}$ est dénombrable.

E3 – $2\mathbb{N} + 1$ est dénombrable.

Propriété 2 : Cas des parties infinies de \mathbb{N}

Toute partie infinie de \mathbb{N} est dénombrable.

Exemple

E4 – On retrouve la dénombrabilité de $2\mathbb{N}$ et $2\mathbb{N} + 1$.

Propriété 3 : Dénombrabilité de \mathbb{Z}

\mathbb{Z} est dénombrable.



2 Ensembles au plus dénombrables

Définition 3 : Ensemble au plus dénombrable

Propriété 4 : Caractérisation

Un ensemble est au plus dénombrable si et seulement si

Corollaire 1 : Partie d'un ensemble dénombrable

Une partie d'un ensemble dénombrable est au plus dénombrable.

3 Produit cartésien

Propriété 5 : Dénombrabilité de \mathbb{N}^2

\mathbb{N}^2 est dénombrable.

Propriété 6 : Produit cartésien d'ensembles dénombrables

Théorème 1 : Dénombrabilité de \mathbb{Q}

\mathbb{Q} est dénombrable.

4 Réunion d'ensembles dénombrables

On commence par le lemme très intuitif suivant :

Lemme 1

Soit E un ensemble non vide. Il y a équivalence entre

- (i) E est au plus dénombrable.
- (ii) Il existe une surjection entre \mathbb{N} et E
- (iii) Il existe une injection entre E et \mathbb{N}

Exemple

E5 – On retrouve la dénombrabilité de \mathbb{Q}

Propriété 7 : Réunion au plus dénombrable d'ensembles au plus dénombrables

Une réunion au plus dénombrable d'ensembles au plus dénombrables l'est encore.

Exemple

E6 – On retrouve la dénombrabilité de \mathbb{Q}

Exercice 2

Montrer qu'un ensemble E est au plus dénombrable si et seulement s'il existe une famille $(E_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de parties finies telles que $E = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} E_n$, qu'on peut supposer croissante.

5 Ensembles non dénombrables

Remarque : Rappel

R3 – Tout nombre réel non décimal admet un unique développement décimal.

Les décimaux en ont deux. Par exemple $3,1416 = 3,141599999\dots$

Tout réel admet un unique développement décimal ne se terminant pas par une infinité de 9 appelé développement décimal propre.

Théorème 2 : Non dénombrabilité de \mathbb{R}

\mathbb{R} n'est pas dénombrable.

Remarque

R4 – $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ n'est pas dénombrable non plus, sinon \mathbb{R} le serait.

Théorème 3 : de Cantor (HP)

Si E est un ensemble non vide, il n'existe pas de surjection de E dans $\mathcal{P}(E)$.

Corollaire 2 : Non dénombrabilité de $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ (HP)

$\mathcal{P}(\mathbb{N})$ n'est pas dénombrable.

Exercice 3 : Dénombrabilité ou non de $\mathbb{N}^{(\mathbb{N})}$ et $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$



SOMMABILITÉ

1 Introduction

Remarque : Digression sur une série semi-convergente

R5 – On sait que la série $\sum_{n \geq 0} \frac{(-1)^n}{n+1}$ est convergente et que sa somme vaut $\ln 2$ avec trois méthodes (à savoir faire !)

- soit en utilisant le développement asymptotique $H_n = \ln n + \gamma + o(1)$ de la série harmonique et en séparant termes d'ordre pair ou impair,
- soit avec une inégalité de Taylor-Lagrange appliquée entre 0 et 1 à $x \mapsto \ln(1+x)$,
- soit encore en voyant que $\frac{1}{n+1} = \int_0^1 t^n dt$ et en reconnaissant une somme géométrique.

Ainsi,

$$1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \frac{1}{6} + \dots = \ln 2.$$

Il se trouve que l'ordre des termes est important dans cette somme.

Ainsi, en sommant un terme d'indice impair puis deux d'indices pairs, on peut obtenir

$$1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{4} + \frac{1}{3} - \frac{1}{6} - \frac{1}{8} + \dots = \frac{\ln 2}{2}.$$

En effet, on peut, dans une somme partielle, regrouper le terme d'ordre impair et le terme d'ordre pair qui le suit immédiatement et obtenir

$$\frac{1}{2} - \frac{1}{4} + \frac{1}{6} - \frac{1}{8} + \dots = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \dots \right) = \frac{\ln 2}{2}.$$

(Bien sûr, il faudrait le formaliser plus rigoureusement, mais c'est l'idée).

On peut en fait démontrer qu'en réordonnant les termes, on est capable d'obtenir n'importe quel nombre réel et même $\pm\infty$.

Par exemple, en regroupant les termes positifs par paquets toujours $\geq \frac{1}{4}$ (ce qui est toujours possible) :

$$(1) - \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{3}\right) - \frac{1}{4} + \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{7}\right) - \dots$$

on obtient une série qui diverge grossièrement (la suite extraite des termes de rangs pairs ne tend pas vers 0).

De plus, en faisant des regroupement de « paquets », il est possible de trouver des séries divergentes : c'est ce qui arriverait si on rassemblait d'une part les termes d'indice pair et d'autre part les termes d'indice impair.

Bref, la convergence n'est « ni commutative, ni associative », même si la série initiale était convergente.

Remarquons que dans une série divergente comme $\sum (-1)^n$, on peut avec des paquets, la rendre convergente : $(1-1) + (1-1) + (1-1) + \dots$ converge vers 0.

Toutes les séries ne demandent pas tant de précautions. Par exemple, la série absolument convergente

$\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^2}$ converge vers $\frac{\pi^2}{6}$ et ce, quel que soit l'ordre des termes, avec ou non des paquets, finis ou infinis : $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^2}$ peut être manipulée comme une somme finie.

Lorsque l'ordre des termes n'importe plus, on n'est plus obligé de se limiter à des sommes indexées par \mathbb{N} : on peut sommer des familles indexées par n'importe quel ensemble dénombrable : $\mathbb{Z}, \mathbb{N}^2, \mathbb{Q}, \dots$

2 Familles de réels positifs

a Calculs dans $[0, +\infty]$

Définition 4 : Opération et ordre dans $[0, +\infty]$

On note $[0, +\infty] = [0, +\infty] \cup \{+\infty\} = \mathbb{R}^+ \cup \{+\infty\}$.

On étend les lois $+$, \times ainsi que l'ordre \leq de la manière suivante : si $a \in [0, +\infty]$,

- $a + (+\infty) = (+\infty) + a = (+\infty) + (+\infty) = +\infty$.
- Si $a > 0$, $a \times (+\infty) = (+\infty) \times a = (+\infty) \times (+\infty) = +\infty$.
- $a < +\infty$ et $+\infty \leq +\infty$.

Enfin, on appelle **borne supérieure** d'une partie A non vide de $[0, +\infty]$ le plus petit des majorants de A dans $[0, +\infty]$.

Propriété 8 : Détermination de la borne supérieure

Si $A \subset \mathbb{R}$ est majorée dans \mathbb{R} , c'est le $\sup_{\mathbb{R}} A$ dans \mathbb{R} que l'on connaît bien.

Si $A \subset \mathbb{R}$ non majorée dans \mathbb{R} ou si A contient $+\infty$, alors $\sup A = +\infty$.

Remarque

R6 – Les propriétés de calcul dans $[0, +\infty]$ sont les mêmes que dans \mathbb{R} (associativité, commutativité, distributivité, compatibilité de l'ordre avec les opérations...), pourvu qu'on évite de multiplier $+\infty$ par 0...

b Sommes de familles de réels positifs

Définition 5 : Sommes de familles de réels positifs

Soit I ensemble quelconque (fini ou infini, éventuellement non dénombrable). On note ici $\mathcal{P}_f(I)$ l'ensemble des parties finies de I .

Soit $(u_i)_{i \in I} \in (\mathbb{R}_*^+)^I$ une famille de **réels positifs** indexée par I .

On appelle **somme** de la famille, notée $\sum_{i \in I} u_i$ la borne supérieure dans $[0, +\infty]$ de

$$A = \left\{ \sum_{i \in J} u_i, J \in \mathcal{P}_f(I) \right\} :$$

$$\sum_{i \in I} u_i =$$

Remarque

R7 – On va voir un peu plus loin qu'il est nécessaire que I soit au plus dénombrable pour que la somme (qui est une borne supérieure) soit finie.

Mais la particularité des réels positifs de pouvoir travailler dans $[0, +\infty]$ permet de considérer dans cette partie des ensembles d'indices I quelconque.



Propriété 9 : Cas des sommes finies

On suppose que $I = \{i_1, \dots, i_p\}$ est fini. Alors la somme de **réels positifs** définie précédemment est bien égale à $\sum_{k=1}^p u_{i_k}$, le sup étant ici fini (c'est même un max).

Propriété 10 : Cas des séries

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}} \in (\mathbb{R}_*^+)^{\mathbb{N}}$ une famille de **réels positifs**. Alors le nombre $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n \in [0, +\infty]$ défini précédemment est égal à $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n$ si la série est convergente, et $+\infty$ sinon.

On se permet donc d'utiliser les deux notations indifféremment, et de noter $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n = +\infty$ lorsque la série est divergente.

Propriété 11 : Comparaison

- Si pour tout $i \in I, 0 \leq a_i \leq b_i$
- Si $I' \subset I,$

c **Sommabilité dans le cas positif**

Définition 6 : Famille sommable de réels positifs

Soit I un ensemble, $(u_i)_{i \in I}$ une famille de **réels positifs**.

On dit que $(u_i)_{i \in I}$ est **sommable** lorsque $\sum_{i \in I} u_i < +\infty$.

Propriété 12 : Dénombrabilité de l'ensemble d'indice

Si $(u_i)_{i \in I}$ une famille sommable de réels positifs, alors $\{i \in I, u_i \neq 0\}$ est au plus dénombrable.

d **Invariance par permutation**

Remarque

R 8 – Une permutation de I est une bijection de I sur I .

Propriété 13 : Invariance par permutation

Soit $(u_i)_{i \in I}$ une famille de **réels positifs**, I étant dénombrable. Soit $\sigma \in \mathfrak{S}(I)$ une permutation de I . Alors dans $[0, +\infty]$.

Propriété 14 : Cas dénombrable : écriture sous forme de série

Soit $(u_i)_{i \in I}$ une famille de **réels positifs**, I étant **dénombrable**.
Soit $n \mapsto i_n$ une bijection de \mathbb{N} sur I (je une énumération de I).
Alors dans $[0, +\infty]$.

Remarque

R 9 – Dans le cas dénombrable, on se ramène à une étude de série. Dans le cas fini, c'est facile. Dans les autres cas, c'est $+\infty$.

Corollaire 3 : Invariance par permutation d'une série

Si $\sum a_n$ est une série à termes réels positifs et $\sigma \in \mathfrak{S}(\mathbb{N})$, alors

e **Linéarité**

Propriété 15 : Linéarité, cas des réels positifs

Si I est un ensemble quelconque, $a = (a_i)_{i \in I}$ et $b = (b_i)_{i \in I}$ des familles de réels positifs, $\lambda \in \mathbb{R}^+$. Alors
(Ici, on pose $0 \times (+\infty) = 0$.)

f **Sommation par paquets**

Théorème 4 : sommation par paquets

Soit I un ensemble quelconque, réunion disjointe des I_j pour $j \in J$:

(presque une partition : il peut y avoir des I_j vides. On parle de recouvrement disjoint.)
Soit $(u_i)_{i \in I}$ une famille de **réels positifs**. Alors

Remarque

R 10 – On travaille dans $[0, +\infty]$. Si l'une a des $\sum_{i \in I_j} u_i$ vaut $+\infty$,

$$\text{alors } \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I_j} u_i \right) = +\infty.$$

Autrement dit, dans une somme d'éléments de $[0, +\infty]$, si l'un des termes vaut $+\infty$, c'est aussi le cas de la somme.

^a Ici, on parle de borne supérieure plutôt que de somme, vous suivez ?.

Démonstration : Hors Programme

On a déjà que si l'une des $\sum_{i \in I_j} u_i = +\infty$, alors, comme les parties finies de I_j sont des parties finies de I , $+\infty = \sum_{i \in I_j} u_i \leq \sum_{i \in I} u_i$ qui vaut $+\infty$.

On peut donc supposer que pour tout $j \in J$, $\sum_{i \in I_j} u_i < +\infty$.

Notons $S = \sum_{i \in I} u_i$ et $S' = \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I_j} u_i \right)$.

Soit K une partie finie de I . Pour tout $k \in K$, il existe un unique $j_k \in J$ tel que $k \in I_{j_k}$. Soit $J' = \{j_k, k \in K\}$.

Alors $\sum_{k \in K} u_k \leq \sum_{j \in J'} \left(\sum_{i \in I_j} u_i \right) \leq \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I_j} u_i \right)$ et, en passant au sup

$$\sum_{i \in I} u_i \leq \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I_j} u_i \right).$$

Réciproquement, soit J' une partie finie de J . Ré-indexons I_1, \dots, I_p les I_j pour $j \in J'$. Pour toutes parties finies K_1, \dots, K_p de I_1, \dots, I_p respectivement, on a

$$\sum_{\ell=1}^p \left(\sum_{i \in K_\ell} u_i \right) = \sum_{i \in K_1 \cup \dots \cup K_p} u_i \leq \sum_{i \in I} u_i.$$

Soit $\varepsilon > 0$. Pour tout $\ell \in \llbracket 1, p \rrbracket$, il existe, par caractérisation de la borne supérieure, K_ℓ partie finie de I_ℓ telle que

$$\sum_{i \in I_\ell} u_i - \frac{\varepsilon}{p} \leq \sum_{i \in K_\ell} u_i.$$

On a alors

$$\sum_{j \in J'} \left(\sum_{i \in I_j} u_i \right) - \varepsilon \leq \sum_{\ell=1}^p \left(\sum_{i \in K_\ell} u_i \right).$$

Donc pour tout $\varepsilon > 0$,

$$\sum_{i \in I} u_i \geq \sum_{j \in J'} \left(\sum_{i \in I_j} u_i \right) - \varepsilon$$

puis, en faisant $\varepsilon \rightarrow 0$, $\sum_{i \in I} u_i \geq \sum_{j \in J} \left(\sum_{i \in I_j} u_i \right)$, qui est donc bien une égalité. ■

Exercice 4

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ une famille de réels positifs. Montrer que

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}} u_n = \sum_{n=0}^{+\infty} u_n + \sum_{n=1}^{+\infty} u_{-n}.$$



Théorème de Fubini positif

Théorème 5 : de Fubini, cas positif

Soit $(u_{m,n})_{(m,n) \in \mathbb{N}^2}$ une famille de réels positifs. Alors toujours dans $[0, +\infty]$.

Remarque

R11 – Voir le parallèle avec le théorème d'intégration terme à terme (intersion série-intégrale) dans le cas de fonctions à valeurs réelles positives.

R12 – Ce n'est pas la seule façon de procéder.

On peut former d'autres paquets, en sommant par exemple par diagonales au lieu de sommer par lignes ou par colonnes et obtenir des énoncés analogues.

Exercice 5

Calculer la somme de $\left(\frac{1}{(mn)^2} \right)_{(m,n) \in \mathbb{N}_*^2}$.

(Voir généralisation plus loin : sommes doubles produits)

Exercice 6

Montrer que la famille $\left(\frac{1}{(m+n)^4} \right)_{(m,n) \in \mathbb{N}^2 \setminus \{(0,0)\}}$ est sommable et exprimer sa somme comme somme d'une série.

Exercice 7

Montrer que $\left(\frac{1}{m^2 + n^2} \right)_{(m,n) \in \mathbb{N}_*^2}$ n'est pas sommable.

Exercice 8

- Pour quelles valeurs du réel α la famille $\left(\frac{1}{(m^2 + n^2)^\alpha} \right)_{(m,n) \in \mathbb{N}_*^2}$ est-elle sommable ?
- Démontrer que, pour tous m et n positifs, $\frac{1}{2}(m+n)^2 \leq m^2 + n^2 \leq (m+n)^2$.
- Étudier la sommabilité de la suite double $\left(\frac{1}{(m+n)^\beta} \right)_{(m,n) \in \mathbb{N}_*^2}$ suivant les valeurs du réel β . Retrouver le résultat de la première question.

Remarque

R13 – Assez souvent, on utilise le résultat plus simplement : on a à manipuler une quantité qui est déjà donné sous forme de somme de série. On fait apparaître une série double, la sommabilité est automatique en cas de positivité, et on peut échanger les sommes par le théorème.

Exercice 9

Si $x > 1$, $\zeta(x) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^x}$. Montrer que

$$\zeta(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} \sum_{n=k}^{+\infty} \frac{1}{n^{x+1}}.$$



3 Familles de réels quelconques ou de complexes

Différence majeure avec ce qui précède : on va devoir commencer par prouver la sommabilité avant d'utiliser les théorèmes, qui, parfois, la donnent aussi comme conclusion.

Bien voir le parallèle avec les intégrales généralisées.

α Définition, somme

Définition 7 : Famille sommable

Soit I un ensemble quelconque et $(u_i)_{i \in I} \in \mathbb{C}^I$.
On dit que la famille $(u_i)_{i \in I}$ est **sommable** lorsque la famille de réels positifs $(|u_i|)_{i \in I}$ l'est. Autrement dit

$$(u_i)_{i \in I} \text{ est sommable} \iff \sum_{i \in I} |u_i| < +\infty$$

Remarque

R 14 – Il est donc nécessaire, pour que $(u_i)_{i \in I}$ soit **sommable**, que $\{i \in I, u_i \neq 0\}$ soit au plus dénombrable.

R 15 – Définition théorique... Mais comment définir la somme ? Comme pour les séries...

Remarque : (Rappel) Parties positive et négative d'un réel

R 16 – Si $x \in \mathbb{R}$, $x^+ = \max(0, x)$ et $x^- = \max(0, -x)$. Alors $x = x^+ - x^-$ et $|x| = x^+ + x^-$.

Propriété 16 : Condition de sommabilité, cas réel

Soit I un ensemble quelconque et $(u_i)_{i \in I} \in \mathbb{R}^I$.
Si la famille $(u_i)_{i \in I}$ est sommable, alors les deux familles $(u_i^+)_{i \in I} \in \mathbb{R}^I$ et $(u_i^-)_{i \in I} \in \mathbb{R}^I$ le sont.

Remarque

R 17 – La réciproque est vraie, voir linéarité plus loin.

Définition 8 : Somme dans le cas réel

Soit I un ensemble quelconque et $(u_i)_{i \in I} \in \mathbb{R}^I$ une famille sommable.

On définit la **somme**

$$\sum_{i \in I} u_i = \sum_{i \in I} u_i^+ - \sum_{i \in I} u_i^-.$$

Remarque

R 18 – Définition théorique, jamais utile dans la pratique.

Propriété 17 : Condition de sommabilité, cas complexe

Soit I un ensemble quelconque et $(u_i)_{i \in I} \in \mathbb{C}^I$.
Si la famille $(u_i)_{i \in I}$ est sommable, alors les deux familles $(\Re(u_i))_{i \in I} \in \mathbb{R}^I$ et $(\Im(u_i))_{i \in I} \in \mathbb{R}^I$ le sont.

Remarque

R 19 – La réciproque est vraie, voir linéarité plus loin.

Définition 9 : Somme dans le cas complexe

Soit I un ensemble dénombrable et $(u_j)_{j \in I} \in \mathbb{C}^I$ une famille sommable.

Si la famille $(u_j)_{j \in I}$ est sommable, les deux familles $(\Re(u_j))_{j \in I} \in \mathbb{R}^I$ et $(\Im(u_j))_{j \in I} \in \mathbb{R}^I$ le sont.

Cela permet de définir la somme

Notation 1 : Ensemble $\ell^1(I)$

On note $\ell^1(I)$ l'ensemble des familles **sommables** de réels ou complexes indexées par un ensemble quelconque I .

Propriété 18 : Cas des séries

La famille $(u_i)_{i \in \mathbb{N}}$ de nombres réels ou complexes est sommable si et seulement si la série $\sum u_i$ est **absolument convergente**.

Sa somme est alors la somme de la série $\sum u_i$.

Remarque

R 20 – Si la famille $(u_i)_{i \in I}$ n'est pas sommable, elle n'a pas de somme... sauf si elle est à termes réels positifs, auquel cas $\sum_{i \in I} u_i = +\infty$.

Lemme 2

Si $(u_i)_{i \in I}$ est sommable, pour tout $\varepsilon > 0$, il existe une partie finie J de I telle que

$$\left| \sum_{i \in J} u_i - \sum_{i \in I} u_i \right| \leq \varepsilon$$

Propriété 19 : Sommabilité par comparaison

Soit I un ensemble quelconque, $(u_i)_{i \in I}$ une famille de nombres réels ou complexes et $(v_i)_{i \in I}$ une famille de **réels positifs** vérifiant

$$\forall i \in I, |u_i| \leq v_i.$$

Alors $(u_i)_{i \in I}$ est sommable.

b Invariance par permutation

Propriété 20 : Invariance par permutation

Soit I est un ensemble quelconque et $(u_i)_{i \in I}$ une famille **sommable** de nombres réels ou complexes.

Soit $\sigma \in \mathfrak{S}(I)$ une permutation de I .

Alors

Propriété 21 : Cas dénombrable : écriture sous forme de série

Soit I est un ensemble **dénombrable** et $(u_i)_{i \in I}$ une famille de nombres réels ou complexes, $k \mapsto i_k$ une bijection de \mathbb{N} sur I .

La famille $(u_i)_{i \in I}$ est sommable si et seulement si $\sum_{k \in \mathbb{N}} u_{i_k}$ est **absolument convergente**, et le cas échéant, on a

$$\sum_{i \in I} u_i = \sum_{k=0}^{+\infty} u_{i_k}.$$

Corollaire 4 : Invariance par permutation d'une série absolument convergente

Si $\sum a_n$ est une série **absolument** convergente à termes réels ou complexes et $\sigma \in \mathfrak{S}(\mathbb{N})$, alors la série

$$\sum a_{\sigma(n)} \text{ converge absolument et } \sum_{n=0}^{+\infty} a_{\sigma(n)} = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n.$$

c Linéarité

Propriété 22 : Linéarité, cas général

Si I est un ensemble dénombrable, si $(u_i)_{i \in I}$ et $(v_i)_{i \in I}$ sont deux familles sommables d'éléments de \mathbb{K} ($\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou \mathbb{C}), si $\lambda \in \mathbb{K}$, la famille $(\lambda u_i + v_i)_{i \in I}$ est sommable, et

$$\sum_{i \in I} (\lambda u_i + v_i) = \lambda \sum_{i \in I} u_i + \sum_{i \in I} v_i$$

Ainsi, $\ell^1(I)$ a une structure de \mathbb{K} -espace vectoriel.

d Sommation par paquets

Il va bien falloir, si on abandonne la positivité des termes, quelques hypothèses. Car sinon, avec des paquets judicieux :

$$(1 - 1) + (1 - 1) + \dots = 0$$

$$1 + (-1 + 1) + (-1 + 1) + \dots = 1$$

ce qui est fâcheux.

Théorème 6 : sommation par paquets

Soit I un ensemble quelconque, $(I_j)_{j \in J}$ un recouvrement disjoint de I :

$$p \neq q \Rightarrow I_p \cap I_q = \emptyset \quad \text{et} \quad \bigcup_{j \in J} I_j = I$$

On suppose que

H1

alors

C1

C2

C3

Remarque

R21 – La sommabilité se vérifie en général en appliquant le théorème de sommation par paquets à la famille de réels positifs $(|u_i|)_{i \in I}$. Dans ce cas, on peut aussi sommer par paquets la famille $(u_i)_{i \in I}$. Il suffit donc de vérifier que

H1 Pour tout n , $\sum_{i \in I_n} |u_i| < +\infty$.

H2 $\sum_{n \in \mathbb{N}} \left(\sum_{i \in I_n} |u_i| \right) < +\infty$.

pour écrire $\sum_{i \in I} u_i = \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\sum_{i \in I_n} u_i \right)$.

Propriété 23 : Cas où $I = \mathbb{Z}$

La famille $(u_i)_{i \in \mathbb{Z}}$ de nombres réels ou complexes est sommable si et seulement si les séries $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$ et

$\sum_{n \in \mathbb{N}} u_{-n}$ sont **absolument** convergentes.

Le cas échéant, $\sum_{n \in \mathbb{Z}} u_n = \sum_{n=0}^{+\infty} u_n + \sum_{n=0}^{+\infty} u_{-n}$.



IV

SOMMES DOUBLES : LE CAS OÙ $I = \mathbb{N}^2$

1

Théorème de Fubini

Théorème 7 : de Fubini

Soit $(a_{m,n})_{(m,n) \in \mathbb{N}^2}$ une famille de réels ou de complexes.

Si

H1 $(a_{m,n})_{(m,n) \in \mathbb{N}^2}$ est **sommable** (c'est-à-dire si $(|a_{m,n}|)_{(m,n) \in \mathbb{N}^2}$ l'est, par exemple avec le théorème de Fubini précédent)

alors

$$\sum_{(m,n) \in \mathbb{N}^2} a_{m,n} =$$

Exemple : Les deux membres peuvent exister sans être égaux, attention aux conclusions trop hâtives.

E7 – On définit $u_{p,q} = \frac{1}{p^2 - q^2}$ si $p \neq q$ et 0 sinon.

Il est clair, par comparaison (équivalent) à une série de Riemann, que pour tout q la série $\sum_{p \neq q} u_{p,q}$ converge. Notons

$$\sigma_q = \sum_{p \neq q} u_{p,q}$$

et essayons de calculer σ_q . Pour cela, on peut penser à se servir de la décomposition en éléments simples

$$\frac{1}{p^2 - q^2} = \frac{1}{2q} \left(\frac{1}{p - q} - \frac{1}{p + q} \right)$$

On peut regarder

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \sum_{p=2}^{+\infty} \left(\frac{1}{p-1} - \frac{1}{p+1} \right) =$$

(télescopisme pas trop compliqué) ; si $q > 1$, c'est un peu plus alambiqué, on ne peut guère échapper aux sommes partielles (pour ne pas couper en deux séries divergentes) : en supposant $N > q$,

$$\begin{aligned} \sigma_q^{(N)} &= \frac{1}{2q} \left(\sum_{p=1}^{q-1} \left(\frac{1}{p-q} - \frac{1}{p+q} \right) + \sum_{p=q+1}^N \left(\frac{1}{p-q} - \frac{1}{p+q} \right) \right) \\ &= \frac{1}{2q} \left(- \sum_{j=1}^{q-1} \frac{1}{j} - \sum_{j=q+1}^{2q-1} \frac{1}{j} + \sum_{j=1}^{N-q} \frac{1}{j} - \sum_{j=2q+1}^{q+N} \frac{1}{j} \right) \end{aligned}$$

On simplifie les deux premières sommes avec la troisième, en supposant $N - q > 2q - 1$ ce qui n'est pas gênant puisqu'on va prendre les limites quand $N \rightarrow +\infty$:

$$\sigma_q^{(N)} = \frac{1}{2q} \left(\frac{1}{q} + \sum_{j=2q}^{N-q} \frac{1}{j} - \sum_{j=2q+1}^{q+N} \frac{1}{j} \right)$$

et enfin on simplifie les deux sommes restantes entre elles :

$$\sigma_q^{(N)} = \frac{1}{2q} \left(\frac{1}{q} + \frac{1}{2q} - \sum_{j=N-q+1}^{N+q} \frac{1}{j} \right)$$

La somme restante tend vers 0 quand $N \rightarrow +\infty$ (il n'est pas nécessaire pour cela d'avoir le développement

asymptotique des sommes partielles de la série harmonique), donc

$$\sigma_q = \frac{3}{4q^2}$$

Conclusion : $\sum \sigma_q$ converge, et $\sum_{q=1}^{+\infty} \sigma_q = \frac{\pi^2}{8}$.

Mauvaise conclusion : C'est sommable.

Bonne conclusion : Ce n'est pas sommable, car en échangeant les rôles de p et de q , on va trouver $-\frac{\pi^2}{8}$ au lieu de trouver la même chose.

Chemin plus court pour arriver à la bonne conclusion : prendre $p = n$ et $q = n - 1$.

2

Cas particulier : suites doubles produits

Corollaire 5 : Sommes doubles produits

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ deux suites de nombres réels ou complexes.

Alors la suite double $(u_m v_n)_{(m,n) \in \mathbb{N}^2}$ est sommable si et seulement si (soit l'une des suites est nulle, soit les séries $\sum u_n$ et $\sum v_n$ sont **absolument** convergentes).

Lorsque la dernière condition est vérifiée, on a en outre

$$\sum_{(m,n) \in \mathbb{N}^2} u_m v_n =$$

Le résultat s'étend à un produit d'un nombre quelconque (mais fini) de termes.

Remarque

R22 – L'hypothèse de suites non nulles est juste là pour avoir une caractérisation de la sommabilité. Pour le sens \Leftarrow intéressant dans la pratique pour calculer la somme, on peut l'oublier.

3

Produit de Cauchy

Corollaire 6

H1 Soit $\sum u_n$ et $\sum v_n$ deux séries réelles ou complexes **absolument** convergentes.

On note, pour tout $n \in \mathbb{N}$:

$$w_n =$$

Alors

C1

C2

Propriété 24 : Exponentielle complexe

Si $z, z' \in \mathbb{C}$, $\exp(z + z') = \exp z \times \exp z'$.

Exercice 10

Si $a \in \mathbb{C}$ tel que $|a| < 1$, alors $\frac{1}{(1-a)^2} = \sum_{n=0}^{+\infty} (n+1)a^n$.

Remarque

R 23 – L'hypothèse d'absolue convergence est indispensable, le résultat n'est pas assuré pour des séries semi-convergentes.

Exemple

E 8 – Avec $u_n = v_n = \frac{(-1)^n}{\sqrt{n+1}}$