

Chapitre 2 : Séries numériques

Dans ce chapitre $K = \mathbb{R}$ ou $K = \mathbb{C}$.

1 Séries

1.1 Généralités

Définitions. Soit $(u_n)_{n \geq n_0}$ une suite d'éléments de K . Alors, on pose : $\forall n \geq n_0 \quad S_n = \sum_{k=n_0}^n u_k$.

La nouvelle suite $(S_n)_{n \geq n_0}$ ainsi obtenue est appelée *série numérique de terme général u_n* . S_n est appelée *somme partielle* de cette série.

Remarques. Une série peut être vue comme une suite mais cette suite est définie de manière particulière, par son terme général. On essaiera d'obtenir des informations sur la série à partir de son terme général.

Une suite est une série particulière.

Remarque : "une suite est une série".

preuve:

1.2 Convergence, somme

Définitions. On dit qu'une série de terme général u_n est *convergente*

si et seulement si $\lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{n=n_0}^N u_n$ existe et est finie dans K .

Une série qui n'est pas convergente est dite *divergente*.

Deux séries toutes deux convergentes ou toutes deux divergentes sont dites de *même nature*.

Si la série est convergente alors on pose $\sum_{n=n_0}^{+\infty} u_n = \lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{n=n_0}^N u_n$. Cette valeur est appelée *somme de la série*.

On pose aussi $R_N = \sum_{n=N+1}^{+\infty} u_n = \sum_{n=n_0}^{+\infty} u_n - \sum_{n=n_0}^N u_n$, R_N qui est appelé *reste d'ordre N* de la série.

1.3 Exemples

1.3.1 Exemple 1

Série de terme général $u_n = (-1)^n$

1.3.2 Exemple 2

Série de terme général $u_n = \frac{1}{2^n}$

1.3.3 Exemple 3

Série de terme général $u_n = \frac{1}{n(n+1)}$

1.4 Importance des premiers termes, notations

Théorème . Soit une suite $(u_n)_{n \geq n_0}$ et $n_1 \geq n_0$.

Alors les séries associées aux suites $(u_n)_{n \geq n_0}$ et $(u_n)_{n \geq n_1}$ sont de même nature.

Remarque. Autrement dit les premiers termes n'influencent pas sur la nature de la série. Par contre, ATTENTION, ils ont une influence sur la somme.

Notations : On notera $\sum u_n$ la série de terme général u_n .

preuve :

1.5 Comportement asymptotique du terme général

1.5.1 Théorème

Théorème . Soit une suite $(u_n)_{n \geq n_0}$ d'éléments de K . Alors : $\sum u_n$ convergente $\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} u_n = 0$

preuve :

Définition. Une série dont le terme général ne tend pas vers 0 et qui est donc divergente est dite *grossièrement divergente*.

1.5.2 Contre exemple

Soit la série de terme général $u_n = \frac{1}{n}$, cette série est appelée série harmonique. Alors cette série est divergente bien que son terme général tende vers 0.

preuve :

1.6 Retour sur le lien suite-série

Théorème . Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite d'éléments de K . Alors :

la suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est convergente $\Leftrightarrow$ la série télescopique $\sum (u_{n+1} - u_n)$ est convergente

preuve :

1.7 Linéarité de la somme

Théorème . On considère deux suites $(u_n)_{n \geq n_0}$ et $(v_n)_{n \geq n_0}$ et les séries associées. Soit $\lambda \in K$ On a alors :

$$\begin{aligned} \sum u_n \text{ divergente et } \sum v_n \text{ convergente} &\Rightarrow \sum (u_n + \lambda v_n) \text{ divergente} \\ \sum u_n \text{ convergente et } \sum v_n \text{ convergente} &\Rightarrow \sum (u_n + \lambda v_n) \text{ convergente} \end{aligned}$$

De plus dans le dernier cas on a alors : $\sum_{n=n_0}^{+\infty} (u_n + \lambda v_n) = \sum_{n=n_0}^{+\infty} u_n + \lambda \sum_{n=n_0}^{+\infty} v_n$

Remarque. Si les deux séries sont divergentes on ne peut rien conclure dans le cas général

preuve :

Corollaire. L'ensemble des séries convergente est un K espace vectoriel.

Corollaire. (Séries à valeurs complexes)

Si $(u_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathbb{C}^{\mathbb{N}}$ alors

$\sum u_n$ convergente si et seulement si $\sum \operatorname{Re}(u_n)$ et $\sum \operatorname{Im}(u_n)$ sont convergentes

De plus, si il y a convergence alors : $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n = \sum_{n=0}^{+\infty} \operatorname{Re}(u_n) + i \sum_{n=0}^{+\infty} \operatorname{Im}(u_n)$

preuves :

2 Séries de références

2.1 Séries géométrique

2.1.1 Définition

Définition. On appelle série géométrique toute série dont le terme général est celui d'une suite géométrique.

2.1.2 Théorème

Théorème . Si $r \in \mathbb{C}$ alors : la série de terme général r^n est convergente $\Leftrightarrow |r| < 1$

De plus , si $|r| < 1$ alors $\sum_{n=0}^{+\infty} r^n = \frac{1}{1-r}$

Remarque. Par contraposition : la série de terme général r^n est *divergente* $\Leftrightarrow |r| \geq 1$

2.1.3 preuve

2.2 Séries de Riemann

2.2.1 Définition

Définition. On appelle *série de Riemann* toute série dont le terme général est de la forme $u_n = \frac{1}{n^\alpha}$ avec $\alpha \in \mathbb{R}$

2.2.2 Théorème

Théorème . Si $\alpha \in \mathbb{R}$ alors : $\sum \frac{1}{n^\alpha}$ est *convergente* $\Leftrightarrow \alpha > 1$

Remarques. Par contraposition : $\sum \frac{1}{n^\alpha}$ est *divergente* $\Leftrightarrow \alpha \leq 1$

Le cas limite est pour $\alpha = 1$ et correspond à la série harmonique qui diverge.

2.2.3 preuve

3 Séries à termes positifs

3.1 Lemme préliminaire

Lemme. Une série à termes positifs est convergente si et seulement si la suite de ses sommes partielles est *majorée*.

Remarque. Convention, si $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une suite de termes positifs divergente, alors on pose $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n = +\infty$

preuve :

3.2 Règle de comparaison

Théorème . Soit $(u_n)_{n \geq n_0}$ et $(v_n)_{n \geq n_0}$ deux suites à termes positifs.
On suppose que : $\exists N \in \mathbb{N}$ tel que $\forall n \geq N$, $0 \leq u_n \leq v_n$

Alors : $\sum v_n$ est convergente $\Rightarrow \sum u_n$ est convergente

De plus, si les séries convergent alors : $\sum_{n=n_N}^{+\infty} u_n \leq \sum_{n=N}^{+\infty} v_n$.

Remarque. Par contraposition : $\sum u_n$ divergente $\Rightarrow \sum v_n$ divergente

preuve :

Exemple. $\sum \frac{2+\sin(n)}{n^2}$

3.3 Règle de l'équivalent

Théorème . Soit $(u_n)_{n \geq n_0}$ et $(v_n)_{n \geq n_0}$ deux suites à termes positifs telles que : $u_n \sim v_n$
Alors les séries $\sum u_n$ et $\sum v_n$ sont de même nature.

preuve :

Exemple. $\sum \exp(\frac{1}{n})(\ln(1 + \frac{1}{n}) - \operatorname{sh}(\frac{1}{n}))$

4 Absolue convergence

4.1 Définition

Définition. On dit qu'une série $\sum u_n$ est absolument convergente si et seulement si $\sum |u_n|$ est convergente.

Remarque. On peut noter $\sum |u_n| < +\infty$ si $\sum |u_n|$ est convergente.

4.2 Théorème

4.2.1 Enoncé

Théorème . Soit $\sum u_n$ une série de nombres réels ou complexes. Alors :

$$\boxed{\sum u_n \text{ absolument convergente} \Rightarrow \sum u_n \text{ convergente}}$$

Remarques. Attention la réciproque est fausse, comme nous le verrons en exemple.

Si la série est convergente sans être absolument convergente, on dit qu'elle est semi-convergente (terme hors programme).

4.3 Exemples

4.3.1 Exemple 1

Série de terme général $u_n = \frac{(-1)^n}{n^2}$

4.3.2 Exemple 2 : série harmonique alternée

Série de terme général $u_n = \frac{(-1)^n}{n}$

preuve de la convergence et calcul de la somme.

4.4 Utilisation des dominées et des négligeables

Théorème . Soit $(u_n) \in K^{\mathbb{N}}$ et $(a_n) \in [0; +\infty[^{\mathbb{N}}$ telles que $u_n = O_{+\infty}(a_n)$, alors :

$$\sum a_n \text{ convergente} \Rightarrow \sum u_n \text{ absolument convergente} \Rightarrow \sum u_n \text{ convergente}$$

Remarques. Attention, il faut les a_n positifs

On a le même théorème avec $u_n = o_{+\infty}(a_n)$

preuve :

Exemple. $\sum e^{-\sqrt{n}}$

4.5 Comparaison à une série géométrique : Règle de D'Alembert

4.5.1 Théorème

Théorème . Soit $(u_n)_{n \geq n_0}$ une suite d'éléments de K^* .

Alors si $\lambda = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{u_{n+1}}{u_n} \right|$ existe dans $\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ on a :

$$\begin{array}{ll} \lambda < 1 \Rightarrow \sum u_n \text{ est convergente} \\ \lambda > 1 \Rightarrow \sum u_n \text{ est divergente} \end{array}$$

Remarques. Si $\lambda = 1$ alors on ne peut rien dire.

La limite n'existe pas à priori.

Par convention $1 < +\infty$

preuve :

4.5.2 Exemples

Exemple 1

$$\sum u_n \text{ avec } u_n = \frac{(-1)^n}{n}$$

Exemple 2

$$\sum u_n \text{ avec } u_n = \frac{1}{n}$$

Exemple 3

$$\sum u_n \text{ avec } u_n = \frac{1}{5^n} \binom{2n}{n}$$

5 Séries alternées

5.1 Définition

Soit $(u_n)_{n \geq 0}$ une suite de nombres réels. Alors on dit que la série $\sum u_n$ est **alternée** si et seulement si $\left[\forall n \in \mathbb{N} \quad u_n = (-1)^n |u_n| \right]$ ou $\left[\forall n \in \mathbb{N} \quad u_n = (-1)^{n+1} |u_n| \right]$.

Remarque. En fait, c'est le signe de u_n qui est alterné.

5.2 Etude

Dans cette section on étudie la série de terme général $u_n = (-1)^n a_n$ avec $(a_n)_{n \geq 0}$ une suite décroissante de limite nulle.

5.3 Théorème spécial

Soit $(u_n)_{n \geq 0}$ une suite réelle vérifiant :
$$\begin{cases} \text{la série } \sum u_n \text{ est alternée} \\ (|u_n|)_{n \in \mathbb{N}} \text{ est décroissante} \\ \lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = 0 \end{cases}$$

alors **la série $\sum u_n$ est convergente**

De plus, en posant $S_N = \sum_{n=0}^N u_n$ et $S = \sum_{n=0}^{+\infty} u_n$ on a :

- les suite $(S_{2n+1})_{n \in \mathbb{N}}$ et $(S_{2n})_{n \in \mathbb{N}}$ **sont adjacentes**
- S est du même signe que u_0 et $|S| \leq |u_0|$
- On a un encadrement simple du reste : $\forall n \in \mathbb{N}, |S - S_n| \leq |u_{n+1}|$.
- $S - S_n$ est du même signe que u_{n+1} .
- La somme de la série est comprise entre deux termes consécutifs de $(S_n)_{n \geq 0}$

5.4 Exemple

$$\sum \frac{(-1)^n \ln(n)}{\sqrt{n}}$$

5.5 Ordre des termes

Théorème . Si $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une suite telle que $\sum u_n$ est une série absolument convergente alors :

$\sum_{n=0}^{+\infty} u_n$ ne dépend pas de l'ordre des termes. On peut alors noter $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n = \sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$

preuve : HP

Remarque. Si la série est convergente sans être absolument convergente alors l'ordre des termes peut changer la somme !!

Exemple : $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{n} = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \dots = \ln(2)$

et $(1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{4}) + (\frac{1}{3} - \frac{1}{6} - \frac{1}{8}) + \dots + (\frac{1}{2k-1} - \frac{1}{4k-2} - \frac{1}{4k}) + \dots = \frac{1}{2} \ln(2)$

6 Produit de Cauchy

6.1 Définition

Définition. Soit deux séries numériques $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n$ et $\sum_{n=0}^{+\infty} v_n$, alors on appelle *produit de Cauchy* de ces deux séries la série de terme générale w_n avec $w_n = \sum_{k=0}^n u_k v_{n-k}$

Remarque. $w_n = \sum_{p+q=n} u_p v_q$

Interprétation : avec le produit de deux polynômes ...

6.2 Théorème

Théorème . Soit deux séries numériques *absolument convergente* $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n$ et $\sum_{n=0}^{+\infty} v_n$ alors la série produit de Cauchy $\sum w_n$ est *absolument convergente* et $\sum_{n=0}^{+\infty} w_n = (\sum_{n=0}^{+\infty} u_n)(\sum_{n=0}^{+\infty} v_n)$

Remarque. Il faut de la convergence absolue, sinon ça ne marche pas :

Contre exemple : $(\sum \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}})(\sum \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}) \dots$

preuve : non exigible

6.3 Application : exponentielle complexe

Théorème . $\forall z \in \mathbb{C}, \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{z^n}{n!}$ est convergente.

Définition. On pose : $\forall z \in \mathbb{C}, \exp(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{z^n}{n!}$

L'application $\exp$ ainsi définie est appelée *exponentielle complexe*

Théorème . On a : $\forall z, z' \in \mathbb{C}, \exp(z + z') = \exp(z)\exp(z')$

Remarque. Si $z \in \mathbb{R}$ on retrouve l'exp réelle et on retrouve l'exp vu en première année

preuve :

7 Complément : Formule de Stirling

7.1 Théorème

Théorème . $n! \underset{+\infty}{\sim} \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n \underset{+\infty}{\sim} \sqrt{2\pi n} n^{n+\frac{1}{2}} e^{-n}$

7.2 preuve(non exigible)

On pose $a_n = \frac{\sqrt{n}(\frac{n}{e})^n}{n!}$, on montre que $\ln(a_{n+1}) - \ln(a_n) = O(\frac{1}{n^2})$

On utilise Wallis : $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^{2n}(t) dt = \frac{\pi}{2} \frac{(2n)!}{4^n (n!)^2} \sim \sqrt{\frac{\pi}{4n}} \dots$

Sommaire

1	Séries	1
1.1	Généralités	1
1.2	Convergence, somme	1
1.3	Exemples	1
1.3.1	Exemple 1	1
1.3.2	Exemple 2	1
1.3.3	Exemple 3	1
1.4	Importance des premiers termes, notations	1
1.5	Comportement asymptotique du terme général	2
1.5.1	Théorème	2
1.5.2	Contre exemple	2
1.6	Retour sur le lien suite-série	2
1.7	Linéarité de la somme	2
2	Séries de références	3
2.1	Séries géométrique	3
2.1.1	Définition	3
2.1.2	Théorème	3
2.1.3	preuve	3
2.2	Séries de Riemann	3
2.2.1	Définition	3
2.2.2	Théorème	3
2.2.3	preuve	3
3	Séries à termes positifs	4
3.1	Lemme préliminaire	4
3.2	Règle de comparaison	4
3.3	Règle de l'équivalent	4
4	Absolue convergence	5
4.1	Définition	5
4.2	Théorème	5
4.2.1	Enoncé	5
4.3	Exemples	5
4.3.1	Exemple 1	5
4.3.2	Exemple 2 : série harmonique alternée	5
4.4	Utilisation des dominées et des négligeables	5
4.5	Comparaison à une série géométrique : Règle de D'Alembert	5
4.5.1	Théorème	5
4.5.2	Exemples	6
5	Séries alternées	7
5.1	Définition	7
5.2	Etude	7
5.3	Théorème spécial	7
5.4	Exemple	7
5.5	Ordre des termes	7
6	Produit de Cauchy	8
6.1	Définition	8
6.2	Théorème	8
6.3	Application : exponentielle complexe	8
7	Complément : Formule de Stirling	8
7.1	Théorème	8
7.2	preuve(non exigible)	8

preuve du 1.5.1. : comportement du terme général

Si $\sum u_n$ est convergente alors : $S_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \lambda \in \mathbb{R}$

Donc $u_n = S_n - S_{n-1} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \lambda - \lambda = 0$

preuve du 3.2. : règle de comparaison

On pose $S_n = \sum_{k=n_0}^{+\infty} u_k$ et $T_n = \sum_{k=n_0}^{+\infty} v_k$

En sommant les $u_k \leq v_k$ on obtient : $0 \leq S_n \leq T_n$

Alors : $\sum v_n$ est convergente

$\Rightarrow (T_n)$ est convergente

$\Rightarrow (S_n)$ est convergente puisque (S_n) est croissante (car les u_n sont positifs)

$\Rightarrow \sum u_n$ est convergente

preuve du 3.3. : règle de l'équivalent

Si $u_n \sim v_n$ alors $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{u_n}{v_n} = 1$ donc $\exists N, n \geq N \Rightarrow \frac{1}{2} \leq \frac{u_n}{v_n} \leq 2$

Et comme $v_n > 0$ alors : $0 \leq \frac{1}{2}v_n \leq u_n \leq 2v_n$

Ensuite on applique la règle de comparaison.

preuve du 4.2.1 : théorème de l'absolue convergence

Etape 1 : On suppose que (u_n) est une suite réelle telle que $\sum |u_n|$ est convergente et on montre que $\sum u_n$ est convergente.

On pose : $\begin{cases} u_n^+ = \max(u_n, 0) \\ u_n^- = \max(-u_n, 0) \end{cases}$

On a ainsi : $\begin{cases} 0 \leq u_n^+ \leq |u_n| \\ 0 \leq u_n^- \leq |u_n| \\ u_n = u_n^+ - u_n^- \end{cases}$

Ensuite, par règle de comparaison pour les séries à termes positifs : $\sum u_n^+$ et $\sum u_n^-$ sont convergentes, puis $\sum u_n$ est convergente comme somme de deux séries convergentes.

Etape 2 : On suppose maintenant que (u_n) est une suite complexe telle que $\sum |u_n|$ est convergente et on montre que $\sum u_n$ est convergente.

On remarque alors que : $\begin{cases} |Re(u_n)| \leq |u_n| \\ |Im(u_n)| \leq |u_n| \end{cases}$

En appliquant le résultat de l'étape 1 on a : $\sum Re(u_n)$ et $\sum Im(u_n)$ convergentes.

Comme $u_n = \Re(u_n) + i\Im(u_n)$ on en déduit que $\sum u_n$ est convergente.

preuve du 5.3 : théorème spécial

Notations

Soit $(u_n)_{n \geq 0}$ une suite réelle vérifiant : $\begin{cases} \text{la série } \sum u_n \text{ est alternée} \\ (|u_n|)_{n \in \mathbb{N}} \text{ est décroissante} \\ \lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = 0 \end{cases}$

Posons : $S_N = \sum_{n=0}^N u_n$ et $S = \sum_{n=0}^{+\infty} u_n$

Démonstration

- Posons pour tout $n \in \mathbb{N}$: $\begin{cases} A_n = S_{2n} \\ B_n = S_{2n+1} \end{cases}$

Posons $a_n = |u_n|$, on a alors, par hypothèse : (a_n) décroissante et $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 0$

- Alors : $A_{n+1} - A_n = S_{2n+2} - S_{2n} = \sum_{k=0}^{2n+2} u_k - \sum_{k=0}^{2n} u_k = u_{2n+2} + u_{2n+1} = a_{2n+2} - a_{2n+1} \leq 0$ car (a_n) est décroissante.

On en déduit (A_n) décroissante.

- De même $B_{n+1} - B_n = S_{2n+3} - S_{2n+1} = a_{2n+3} - a_{2n+2} \geq 0$ car (a_n) est décroissante.

On en déduit (B_n) croissante.

- $A_n - B_n = S_{2n} - S_{2n+1} = -u_{2n+1} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$

- On a donc $\begin{cases} (A_n) \text{ décroissante} \\ (B_n) \text{ croissante} \\ \lim_{n \rightarrow +\infty} (A_n - B_n) = 0 \end{cases}$

Les suites (A_n) et (B_n) sont donc adjacentes et on en déduit : $\exists \lambda \in \mathbb{R}$, $\lim_{n \rightarrow +\infty} A_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} B_n = \lambda = S$

Ou encore $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_{2n} = \lim_{n \rightarrow +\infty} S_{2n+1} = \lambda$

ce qui permet d'affirmer que $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = \lambda$ et donc que : $\boxed{\sum S_n \text{ est convergente.}}$

- Comme (A_n) est décroissante et (B_n) est décroissante alors : $B_n \leq \lambda \leq A_n \Rightarrow S_{2n+1} \leq \lambda \leq S_{2n}$ mais aussi $B_n \leq \lambda \leq A_{n+1} \Rightarrow S_{2n+1} \leq \lambda \leq S_{2n+2}$

On a donc : les suite $(S_{2n+1})_{n \in \mathbb{N}}$ et $(S_{2n})_{n \in \mathbb{N}}$ sont adjacentes et S est compris entre deux termes consécutifs de (S_n)

- De la même manière $S_0 \leq S \leq S_1 \Rightarrow u_0 \leq S \leq u_0 + u_1$

Donc si $u_0 \geq 0$ alors $S \geq 0$ et donc S est du signe de u_0

Si $u_0 < 0$ alors $u_0 \leq S \leq u_0 + u_1 \Rightarrow S \leq -a_0 + a_1 \leq 0$ car (a_n) décroissante et donc S est du signe de u_0

On en déduit : S est du même signe que u_0 et $|S| \leq |u_0|$

- On a un encadrement simple du reste : $\forall n \in \mathbb{N}$, $|S - S_n| \leq |u_{n+1}|$.

- $S - S_n$ est du même signe que u_{n+1} .

- La somme de la série est comprise entre deux termes consécutifs de $(S_n)_{n \geq 0}$

preuve du 6.2 : théorème sur le produit de Cauchy

- Posons : $C_n = \llbracket 0, n \rrbracket \times \llbracket 0, n \rrbracket$, $T_n = \{(i, j) \in C_n, i + j \leq n\}$

- Supposons dans un premier temps que les termes sont tous positifs (les u_k , v_k et donc w_n)

Alors :

$$T_n \subset C_n \subset T_{2n}$$

$$\Rightarrow \sum_{(i,j) \in T_n} u_i v_j \leq \sum_{(i,j) \in C_n} u_i v_j \leq \sum_{(i,j) \in T_{2n}} u_i v_j$$

$$\Rightarrow \sum_{k=0}^n w_k \leq \left(\sum_{i=0}^n u_i \right) \left(\sum_{j=0}^n v_j \right) \leq \sum_{k=0}^{2n} w_k$$

Puisque $\sum u_i$ et $\sum v_i$ sont convergente alors : $\sum_{k=0}^n w_k \leq \left(\sum_{i=0}^{+\infty} u_i \right) \left(\sum_{j=0}^{+\infty} v_j \right) < +\infty$

et donc $\sum w_k$ est convergente.

En passant à la limite dans : $\sum_{k=0}^n w_k \leq \left(\sum_{i=0}^n u_i \right) \left(\sum_{j=0}^n v_j \right) \leq \sum_{k=0}^{2n} w_k$

on obtient : $\sum_{k=0}^{+\infty} w_k \leq \left(\sum_{i=0}^{+\infty} u_i \right) \left(\sum_{j=0}^{+\infty} v_j \right) \leq \sum_{k=0}^{+\infty} w_k$

et donc : $\sum_{k=0}^{+\infty} w_k = \left(\sum_{i=0}^{+\infty} u_i \right) \left(\sum_{j=0}^{+\infty} v_j \right)$