

Chapitre 3 : Suites et séries de fonctions

I Suites de fonctions

Définition : Soit I un intervalle ouvert, et soit $E = \mathbb{R}$ ou \mathbb{C}

Une **suite de fonctions** est une application de \mathbb{N} dans $\mathcal{F}(I, E) = E^I$, l'ensemble des fonctions de I dans E . On la note $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$, où f_n est la fonction associée à l'entier naturel n .

Remarque : Cette notion est généralisable si I devient un disque de \mathbb{C} et E un espace vectoriel normé.

Exemple : $f_n : [0, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}$ définie par $f_n(x) = x^n$, pour tout $n \in \mathbb{N}$. On a aussi : $f_n : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $f_n(x) = \cos(nx)$, pour tout $n \in \mathbb{N}$. On peut tracer les graphes de ces suites de fonctions : f_0, f_1, f_2, \dots

A Convergence simple

Définition : Soit (f_n) une série de fonctions de I dans E .

On dit que (f_n) est **simplement convergente** sur I s'il existe une fonction $f : I \rightarrow E$ telle que, pour tout $x \in I$, la suite $(f_n(x))$ converge dans E .

On appelle dans ce cas la **limite simple** de la suite (f_n) la fonction f définie par : $f : x \mapsto \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x)$.

Exemple : On pose $f_n : [0, 1] \xrightarrow{x \mapsto x^n} \mathbb{R}$. Soit $x \in [0, 1]$.

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} x^n = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 1 \\ 1 & \text{si } x = 1 \end{cases}$$

Donc la suite (f_n) converge simplement sur $[0, 1]$ et sa limite simple est la fonction f définie par : $f : x \mapsto \begin{cases} 0 & \text{si } x < 1 \\ 1 & \text{si } x = 1 \end{cases} \xrightarrow{[0, 1] \rightarrow \mathbb{R}}$

Attention On atteint un premier problème : la limite de f_n est continue mais la limite simple f ne l'est pas.

Exemple : On pose $f_n = \begin{cases} n^2 x & \text{si } x \in [0, \frac{1}{n}] \\ n^2 (\frac{2}{n} - x) & \text{si } x \in [\frac{1}{n}, \frac{2}{n}] \\ 0 & \text{si } x > \frac{2}{n} \end{cases}$ définie de $[0, 1]$ dans \mathbb{R} .

On a que f_n converge simplement vers la fonction nulle sur $[0, 1]$. En effet, $f_n(0) = 0 \rightarrow 0$ et si $x \in]0, 1]$, alors il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $n \geq N \implies x > \frac{2}{n} \implies f_n(x) = 0$ (axiome d'Archimède). Donc $f_n(x) \rightarrow 0$, d'où le fait que la limite simple est la fonction nulle.

Cependant, $\max_{[0, 1]} f_n = f_n(\frac{1}{n}) = n$, qui diverge vers $+\infty$. Donc la "convergence n'est pas uniforme".

Autre chose étrange, $\int_0^1 f_n(x) dx = 1$, alors qu'on s'attendrait à ce que l'intégrale de la limite soit nulle.

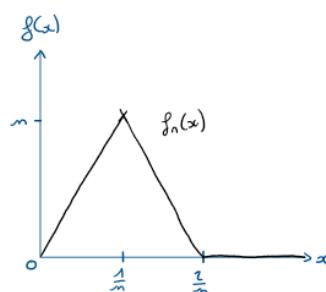


Figure 1: Graphique de f_n

B Convergence uniforme

Définition : On dit que (f_n) converge **uniformément** sur I vers f s'il existe une fonction $f : I \rightarrow E$ telle que : $\forall \varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N}, \forall n \geq n_0, \forall x \in I, |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$.

i Remarque : (f_n) converge simplement vers f si $\forall x \in I, \forall \varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N}, \forall n \geq n_0, |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$. Ce n'est donc pas la même chose que la convergence uniforme, où n_0 ne dépend pas de x .

Exemple : Dans l'exemple précédent (avec les $\frac{1}{n}$), $f_n(\frac{1}{n}) \rightarrow +\infty$, donc la convergence n'est pas uniforme sur $[0, 1]$ vers 0. En effet, $\forall n \geq 1, |f_n(\frac{1}{n}) - 0| = n \geq 1$.

Proposition :

1. Si (f_n) converge uniformément vers f sur I , alors elle converge simplement vers f sur I .
2. La limite simple de (f_n) est unique. Si f est limite simple de (f_n) par définition : $f(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x)$ (qui est unique).
3. La limite uniforme de (f_n) est unique (si elle existe).

i Remarque : Si on a la limite simple de (f_n) , alors c'est la seule candidate possible pour être la limite uniforme. Donc pour calculer une limite uniforme, on commence par chercher la limite simple, puis on prouve la convergence uniforme vers cette limite simple.

Exemple : Soit $a < 1$.

$f_n = x^n$ sur $[0, a] \rightarrow \mathbb{R}$.

(f_n) converge simplement vers 0.

1. Soit $x \in [0, a]$, $x < 1 \Rightarrow x^n \rightarrow 0$.
Donc 0 est la limite simple de (f_n) .
2. Soit $\varepsilon > 0$.
Soit $n_0 \in \mathbb{N}$ tel que soit $n \geq n_0, \forall x \in [0, a], |x^n - 0| < a^n \leq a^{n_0} < \varepsilon$ (car $a < 1$).

Contre-Exemple : Par contre, montrons que $f_n = x^n$ sur $[0, 1[$ ne converge pas uniformément vers 0 (remarquons qu'on a pas pris 1).

1. La limite simple est toujours 0 (même justification que tout à l'heure).
2. $(1 - \frac{1}{n})^n \rightarrow \frac{1}{e} \neq 0$. Donc il n'y a pas de convergence uniforme.

i Remarque : Pour montrer que f_n converge uniformément vers f , il suffit de trouver une majoration M_n indépendante de x telle que $|f_n(x) - f(x)| \leq M_n$ et $M_n \rightarrow 0$.

Définition : Soit f une fonction de I dans E .

La **norme uniforme (ou norme infinie)** de f est définie par : $\|f\|_{I, \infty} = \sup_{x \in I} |f(x)|$.

Proposition :

Soit (f_n) une suite de fonctions de I dans E .

Alors (f_n) converge uniformément vers f sur I si et seulement si

$$\begin{cases} f_n - f \text{ est bornée sur } I \text{ à partir d'un certain rang} \\ \|f_n - f\|_{I, \infty} \rightarrow 0 \end{cases}$$

Remarque : La première condition est là pour que la norme infinie soit bien définie et réelle.

Rappel : On dit que $f: I \rightarrow E$ est bornée sur I s'il existe $M \geq 0$ tel que $\forall x \in I, |f(x)| \leq M$. Autrement dit, $\{f(x) \mid x \in I\} = f(I)$ est une partie bornée de E , $\|f\|_\infty < +\infty$.

Démonstration :

Si $\|f_n - f\|_{I, \infty} \rightarrow 0$, alors $\forall x \in I, |f_n(x) - f(x)| \leq \|f_n - f\|_{I, \infty} \rightarrow 0$. Donc (f_n) converge uniformément vers f par la remarque.

Réciproquement, si $\|f_n - f\|_{I, \infty} \not\rightarrow 0$, alors il existe $\varepsilon > 0$ et une sous-suite φ strictement croissante telle que $\|f_{\varphi(n)} - f\|_{I, \infty} \geq \varepsilon$.

Donc il existe $x_n \in I$ tel que $|f_{\varphi(n)}(x_n) - f(x_n)| \geq \varepsilon$ par définition du sup. \square

Exemple : $f_n : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$

1. f_n converge simplement vers la fonction nulle. (CVS)
2. $\|f_n - 0\|_{[0, 1], \infty} = \sup_{x \in [0, 1]} |x^n - 0| = 1$. En effet, le prolongement par continuité de f_n est x^n sur $[0, 1]$ et est continue 1.
donc $\lim_{x \rightarrow 1^-} f_n(x) = 1$. Donc $\|f_n\|_\infty \geq 1$.

Note de rédaction : cf. Laurent pour la démo de $\|f_n\|_\infty \geq 1$

Remarque : On sait de plus que $\|f_n\|_{[0, 1], \infty} = 1$ car $\forall x \in [0, 1], |f_n(x)| = x^n < 1$. Donc $\|f_n\|_\infty \leq 1$. Donc $\|f_n\|_\infty = 1$.

Exemple : (suite) $f_n : [0, a] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^n$ avec $a < 1$.

Alors :

1. f_n converge simplement vers la fonction nulle sur $[0, a]$.
2. $\|f_n\|_{[0, a], \infty} = f_n(a) = a^n$ car f_n est continue sur $[0, a]$ et f_n est croissante sur $[0, a]$.
Donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} \|f_n\|_{[0, a], \infty}$ (car $= a^n$).
Donc f_n converge uniformément vers la fonction nulle sur $[0, a]$.

Remarque : L'hypothèse "continue sur $[0, a]$ " permet d'appliquer le théorème des bornes atteintes : $\|f_n\| = \max_{x \in [0, a]} f_n(x)$. et comme f_n est croissante, le maximum est atteint en a .

Remarque : En général, pour calculer des bornes supérieures (extrema en général) d'une fonction, il faut faire le tableau de variations.

Définition : Soit (f_n) une suite de fonctions de I dans E . On dit que (f_n) est une **suite de Cauchy uniforme** sur I s'il :

$$\forall \varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N}, \forall p, q \geq n_0, \forall x \in I, |f_p(x) - f_q(x)| < \varepsilon.$$

Théorème :

Soit (f_n) une suite de fonctions de I dans E .

Alors (f_n) est uniformément de Cauchy si et seulement si elle converge uniformément sur I .

Démonstration :

Supposons (f_n) est uniformément de Cauchy, donc elle est simplement de Cauchy. Donc $\forall x \in I$, la suite $(f_n(x))$ converge dans E (car E est complet).

On note $f(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x)$.

Donc $f_n \rightarrow f$ (simplement). Montrons que $f_n \rightarrow f$ uniformément.

A-t-on $\|f_n - f\|_{I, \infty} \rightarrow 0$?

Soit $\varepsilon > 0$.

Soit $n_0 \in \mathbb{N}$ tel que $\forall p, q \geq n_0$, $\|f_p - f_q\|_\infty < \varepsilon$.

Soit $n \geq n_0$.

Soit $x \in I$.

Soit $p_x \in \mathbb{N}$ tel que $|f_{p_x}(x) - f(x)| < \varepsilon$ (car $f_n(x) \rightarrow f(x)$).

On a pour $p \geq \max(p_x, n_0)$ $|f_n(x) - f(x)| \leq |f_n(x) - f_{p_x}(x)| + |f_{p_x}(x) - f(x)| < \|f_n - f_{p_x}\|_\infty + \varepsilon < 2\varepsilon$ car $p \geq n_0$.

En passant à la borne supérieur, $\|f_n - f\| \leq 2\varepsilon$.

Quitte à remplacer ε par $\frac{\varepsilon}{2}$, on a bien $\|f_n - f\|_{I, \infty} < \varepsilon$. Donc $f_n \rightarrow f$ uniformément. \square

II Propriétés de la limite uniforme

A Bornitude et continuité de la limite uniforme

Proposition : (admis)

Soit (f_n) une suite de fonctions de $I \rightarrow E$. On suppose $f_n \rightarrow f$ uniformément.

Alors, si f_n est bornée à partir d'un certain rang, alors f est bornée. De plus, $\lim_{n \rightarrow +\infty} \|f_n\|_{I, \infty} = \|f\|_{I, \infty}$.

💬 Note de rédaction : cf. Alex

Théorème d'interversion de limite : (admis)

Soit (f_n) une suite de fonctions de I dans E . On suppose que $f_n \rightarrow f$ uniformément sur I .

Soit $x_0 \in \bar{I}$. On suppose que $\lim_{x \rightarrow x_0} f_k(x) = l_k$. Alors $(l_k)_{k \in \mathbb{N}}$ converge.

Et $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x)$.

💬 Note de rédaction : cf. Yaïr × Alex

Corollaire :

Soit (f_n) une suite de fonctions de I dans E , et supposons que $f_n \rightarrow f$ uniformément sur I .

Si f_n continue sur I à partir d'un certain rang, alors f est continue sur I .

B Intégrabilité de la limite uniforme

Théorème :

Soit (f_n) une suite de fonctions de $[a, b]$ ($a < b$, finis) dans \mathbb{R} . On suppose que $f_n \rightarrow f$ uniformément sur $[a, b]$ et f_n continue par morceaux.

Alors on a $\int_a^b f_n(x) dx \rightarrow_{n \rightarrow +\infty} \int_a^b f(x) dx$.

💬 Note de rédaction : cf. Laurent

C Dérivabilité de la limite uniforme

Vocabulaire : Soit $A \subset I$.

On note pour $x \in I$, $1_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$.

Théorème :

Soit (f_n) une suite de fonctions de I dans E telle que :

- $\forall n \in \mathbb{N}, f_n \in \mathcal{C}^1(I, E)$.
- $\exists x_0 \in I$ tel que la suite $(f_n(x_0))$ converge dans E .
- La suite (f'_n) converge uniformément sur I vers une fonction g .

Alors, (f_n) converge uniformément sur tout segment $[a, b] \subset I$ vers une fonction $f : I \rightarrow E$, et de plus $f \in \mathcal{C}^1(I, E)$ et $f' = g$.

Démonstration :

Soit $x \in I$.

$f_n(x) = f_n(x_0) + \int_{x_0}^x f'_n(t)dt$ (Théorème fondamental de l'analyse).

On a $f_n(x_0)$ converge par hypothèse.

Et $\int_{x_0}^x f'_n(t)dt \longrightarrow \int_{x_0}^x g(t)dt$ par le théorème d'intégrabilité de la limite uniforme.

Donc $f_n(x)$ converge simplement vers f où $f(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x_0) + \int_{x_0}^x g(t)dt$.

On remarque que f est de classe $\mathcal{C}^1(I, E)$ et $f' = g$.

Il reste à montrer que $f_n \rightarrow f$ uniformément sur tout segment $[a, b] \subset I$.

Soit $x \in I$.

$$|f_n(x) - f(x)| = |f'_n(t)dt + \int_{x_0}^x f'_n(t)dt - \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x_0) - \int_{x_0}^x g(t)dt| \\ \leq |f_n(x_0) - \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x_0)| + |\int_{x_0}^x (f'_n(t) - g(t))dt|$$

$$\text{D'où } |f_n(x) - f(x)| \leq |f_n(x_0) - \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x_0)| + |x - x_0| \|f'_n - g\|_{I, \infty}.$$

$$\leq |f_n(x_0) - \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x_0)| + (\max(|a|, |b|) + |x_0|) \|f'_n - g\|_{I, \infty} \longrightarrow 0 \text{ indépendamment de } x.$$

D'où la convergence uniforme sur $[a, b]$ de (f_n) vers f . \square

Exemple : $f_n \rightarrow f$ uniformément et $f_n \in \mathcal{C}^1(I, E)$ ne suffit pas à garantir que $f \in \mathcal{C}^1(I, E)$.

Par exemple, $f_n : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \frac{x^{n+1}}{n+1}$.

On a $\|f_n\|_\infty = \frac{1}{n+1} \longrightarrow 0$. Donc $f_n \rightarrow 0$ uniformément vers 0.

Cependant, $f'_n : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^n$ qui converge simplement vers la fonction nulle, mais $f'_n \rightarrow 1_{\{1\}}$ (simplement) mais $f'_n \notin \mathcal{C}^0([0, 1], \mathbb{R})$ et $1_{\{1\}} \notin \mathcal{C}^0([0, 1], \mathbb{R})$.

Donc (f'_n) ne converge pas uniformément. (on ne satisfait pas les hypothèses du théorème).

Donc la limite simple $1_{\{1\}} \neq 0 = f'$.

Théorème (À VÉRIFIER) : (admis)

Soit (f_n) une suite de fonctions de I dans E telle que :

- $\forall n \in \mathbb{N}, f_n$ est dérivable
- $\exists x_0 \in I$ tel que $(f_n(x_0))$ converge.
- (f'_n) converge uniformément vers g sur I .

Alors, (f_n) converge uniformément sur tout segment $[a, b] \subset I$ vers une fonction f dérivable et $f' = g$.

Remarque : Ce théorème est plus général que le précédent. En effet, on ne demande pas que f_n soit de classe $\mathcal{C}^1(I, E)$, mais juste dérivable.

Note de rédaction : cf. Laurent pour la preuve

>Note de rédaction : Le prof. n'est pas sûr des hypothèses du théorème.

III Séries de fonctions

A Convergence d'une série

1 Définitions générales

Définition : On appelle **série de fonctions** une suite (S_n) de fonctions de I dans E de la forme :

$$S_n = \sum_{k=0}^n f_k$$

où f_k est son **terme général**, une fonction de I dans E . On appelle **somme partielle** de la série la fonction S_n .

Définition : On dit qu'une série est **convergente** au point $x \in I$ si la suite des sommes partielles $(S_n(x))$ converge dans E .

En particulier, on dit que la série de fonctions $\sum f_n$ converge **simplement** sur I s'il existe une fonction $S : I \rightarrow E$ telle que, pour tout $x \in I$, la série numérique $\sum f_n(x)$ converge dans E et $S(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} f_n(x)$.

Définition : On dit qu'une série de fonctions $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$ converge **uniformément** si (S_n) converge uniformément sur I .

Remarque : De manière équivalente, on dit qu'une série $\sum_{n \geq 0} f_n$ converge uniformément si $\sum_{k=0}^{+\infty} f_k$ existe et $\|\sum_{k=0}^n f_k - \sum_{k=0}^{+\infty} f_k\|_{I, \infty} \rightarrow 0$.

Autrement dit, $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$ converge uniformément $\Leftrightarrow \sum_{n=0}^{+\infty} f_n$ existe et $(\sum_{k=n+1}^{+\infty} f_k)$ converge uniformément vers la fonction nulle.

2 Convergence normale

Définition : On dit que $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$ converge **normalement** sur I si la série numérique $\sum_{n \geq 0} \|f_n\|_{I, \infty}$ converge.

Théorème :

Si $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$ converge normalement sur I , alors :

- $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$ converge uniformément sur I .
- $\forall x \in I$, $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n(x)$ converge absolument dans E .
- La limite $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$ est une fonction bornée sur I .

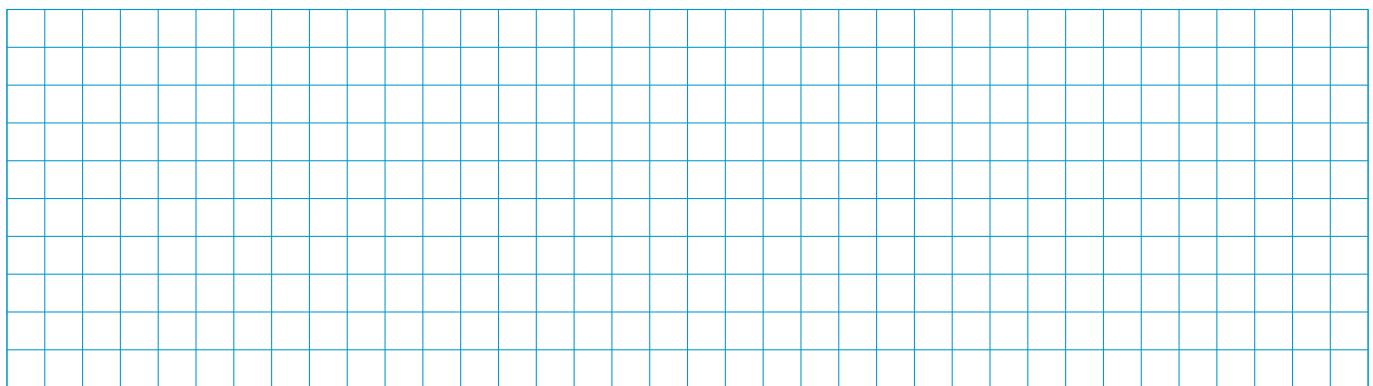
Note de rédaction : cf. Laurent pour la preuve.

Exemple : On considère la série $\sum_{n \geq 0} x^n$.

- Si $|x| < 1$, $\sum_{n \geq 0} x^n$ converge absolument (série géométrique) donc la limite existe sur $] -1, 1 [$. Si $|x| \geq 1$, $\sum_{n \geq 0} x^n$ diverge grossièrement.
- Soit $0 \leq a < 1$, alors $\sum_{n \geq 0} x^n$ converge normalement sur $[-a, a]$. En effet, $\|x^n\|_{[-a, a], \infty} = a^n$ et $\sum_{n \geq 0} a^n$ converge (série géométrique). Donc $\sum_{n \geq 0} x^n$ converge uniformément sur $[-a, a]$.

- Exercice : montrer que $\sum_{n \geq 0} x^n$ ne converge pas uniformément sur $[0, 1]$.

 **Application :** Montrer que la série $\sum_{n \geq 0} (-1)^n x^n$ converge uniformément sur $[0, 1]$, mais pas normalement.



B Propriétés de la limite uniforme d'une série de fonctions

Théorème :

On suppose que $\sum_{n \geq 0} f_n$ converge uniformément sur I .

- Si $\forall n$, f_n est bornée, alors $\sum_{n \geq 0} f_n$ est bornée.
- $x_0 \in \bar{I}$. On suppose que $\forall n, \lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) = l_n$. Alors la série numérique $\sum_{n \geq 0} l_n$ converge et

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \sum_{n=0}^{+\infty} f_n(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} l_n.$$

- Si $\forall n, f_n$ est continue en $x_0 \in I$, alors $\sum_{n \geq 0} f_n$ est continue en x_0 .
- Si f_n est continue par morceau, alors $\int_a^b \sum_{n=0}^{+\infty} f_n(x) dx = \sum_{n=0}^{+\infty} \int_a^b f_n(x) dx$.

Théorème :

- f_n de classe $C^1(I, E)$.
- Il existe $x_0 \in I$ tel que $f_n(x_0)$ converge.
- La série $\sum_{n \geq 0} f'_n$ converge uniformément sur I .

Alors, la série $\sum_{n \geq 0} f_n$ converge uniformément sur tout segment $[a, b] \subset I$ vers une fonction f dérivable et $(\sum_{n=0}^{+\infty} f_n)' = \sum_{n=0}^{+\infty} f'_n$.

Contents

I Suites de fonctions	1
A Convergence simple	1
B Convergence uniforme	2
II Propriétés de la limite uniforme	4
A Bornitude et continuité de la limite uniforme	4
B Intégrabilité de la limite uniforme	4
C Dérivabilité de la limite uniforme	5
III Séries de fonctions	6
A Convergence d'une série	6
1 Définitions générales	6
2 Convergence normale	6
B Propriétés de la limite uniforme d'une série de fonctions	7