Séries de Fourier

Table des matières

1. Séries trigonométriques. **1**
1.1. Définitions. 1

2. Critères de convergence. **1**
2.1. Convergence uniforme. 1
2.2. Une série fondamentale. 3

3. Séries de Fourier. **4**
3.1. Récupération des coefficients d'une série trigonométrique. 4
3.2. Développement en série de Fourier. 6
3.3. Convergence. 6
3.4. Convergence des coefficients de Fourier. 8

4. Formule de Parseval. **8**

5. Prolongement Dirichlet **9**

1. Séries trigonométriques.

1.1. Définitions.

Définition 1.1 (Série trigonométrique.). Une série trigonométrique est une série de la forme

$$a_0 + \sum_{n\geq 1} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx), a_n, b_n \in \mathbb{C}.$$

Remarque 1.2. Si cette série converge au point x, on note $S(x)$ sa somme. En notant E l'ensemble de ces points j'obtiens une fonction $S : E \to \mathbb{C}; x \mapsto S(x)$.

Remarque 1.3. S est 2π-périodique signifie $S(x+2\pi) = S(x)$.

Remarque 1.4 (Autre notation). On peut noter

$$\begin{cases} c_0 = a_0 \\ c_n = \frac{a_n - ib_n}{2} \\ c_{-n} = \frac{a_n + ib_n}{2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} a_n = c_n + c_{-n} \\ b_n = i(c_n - c_{-n}) \end{cases}.$$

Ainsi, on a

$$\begin{aligned} a_0 + \sum_{n=1}^{N} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) &= c_0 + \sum_{n=1}^{N} (c_n + c_{-n}) \cos(nx) + i(c_n - c_{-n}) \sin(nx) \\ &= c_0 + \sum_{n=1}^{N} c_n(\cos(nx) + i \sin(nx)) + c_{-n}(\cos(nx) + i \sin(nx)) \\ &= c_0 e^{i0x} + \sum_{n=1}^{N} c_n e^{inx} + c_{-n} e^{-inx} = \sum_{n=-N}^{N} c_n e^{inx}. \end{aligned}$$

2. Critères de convergence.

2.1. Convergence uniforme.

Remarque 2.1. $\sup_{x\in\mathbb{R}}(|a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)|) \leq |a_n| + |b_n|$.

Théorème 2.2. Soit $A = \sum a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)$ une série trigonométrique telle que $\sum |a_n| + |b_n|$ converge. Alors A converge uniformément sur $\mathbb{R}$ et $S(x)$ est continue.

Démonstration. Soit $x \in \mathbb{R}$, on a

$$\left|\sum a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)\right| \leq \sum |a_n| \cdot 1 + |b_n| \cdot 1 \leq \sum |a_n| + |b_n|.$$

$\square$

Exemple 2.3. $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{\cos(nx)}{n^2} = \frac{x^2}{4} - \pi\frac{x}{2} + \frac{\pi^2}{6}$ si $x \in [0, 2\pi]$.

Théorème 2.4. Soit $(c_n)_{n\in\mathbb{N}}, (d_n)_{n\in\mathbb{N}}$ deux suites dans $\mathbb{C}$, $C_n = \sum c_n, D_n = \sum d_n$. Pour tous $N \leq M$, on a

$$\sum_{n=N}^{M} c_n d_n = C_M D_M - C_N D_{N-1} + \sum_{n=N}^{M-1} (c_n - c_{n+1} D_n).$$

Démonstration. Pour le voir poser $d_n = D_n - D_{n-1}$. $\square$

Corollaire 2.5. Si la suite $(D_n)_{n\in\mathbb{N}}$ est bornée par un nombre $D > 0$ et $(C_n)_{n\in\mathbb{N}}$ est décroissante, alors

$$\begin{aligned}\left|\sum_{n=N}^{M} c_n d_n\right| &\leq |C_M D_M| + \sum_{n=N}^{M-1} |c_n - c_{n+1} D_n| + |C_n D_{n-1}| \\ &\leq D\left(|C_M| \sum_{n=N}^{M-1} (c_n - c_{n+1}) + c_N\right).\end{aligned}$$

Si de plus $(c_n) \in \mathbb{R}_+$, $\left|\sum_{n=N}^{M} c_n d_n\right| \leq 2DC_N$

Théorème 2.6 (Critère d'Abel). Soit $(a_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite positive à valeurs réelles décroissante et $(b_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite dans $\mathbb{C}$ telle que $\exists D \in \mathbb{R}, \forall n \in \mathbb{N}, \forall m > n, |b_n + b_{n+1} + \ldots + b_m| < D$. Alors $\sum a_n b_n$ converge et $\forall n \in \mathbb{N}$, $\sum_{n=N}^{M} a_n b_n \leq 2Dc_N$.

Exemple 2.7.

$$\begin{aligned}\sum_{k=0}^{n} e^{ik\theta} &= \sum_{k=0}^{n} e^{(i\theta)^k} \\ &= \frac{\left(e^i\theta\right)^{n+1} - 1}{e^{i\theta} - 1} = \cdot\text{passage par l'angle moitié}\cdot = \frac{\sin\left(\frac{n+1}{2}\theta\right)}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} e^{in\theta}.\end{aligned}$$

D'où

$$\sum_{k=0}^{n} \cos(k\theta) = \mathrm{Re}\left(\sum_{k=0}^{n} e^{ik\theta}\right) = \frac{\sin\left(\frac{n+1}{2}\theta\right)}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \cos\left(n\frac{\theta}{2}\right)$$

et abs $\left(\sum_{k=0}^{n} \cos(k\theta)\right) \leq \frac{1}{\sin(\frac{\theta}{2})}$

Proposition 2.8. Soit $(a_n)_n \in \mathbb{N}$ une suite positive décroissante, $A = \sum a_n \cos(nx)$, $B = \sum a_n \sin(nx)$ deux séries trigonométriques. Alors A et B convergent uniformément sur $[\varepsilon, 2\pi - \varepsilon]$, $\forall \varepsilon > 0$. En particulier leurs sommes sont continues sur $]0, 2\pi[$.

Exemple 2.9.
1. $\sum_{n\geq 1} \frac{\cos(nx)}{n} = -\ln\left(2\sin\left(\frac{x}{2}\right)\right)$ sur $]0, 2\pi[$.

2.2. Une série fondamentale.

Lemme 2.10. Soit $f : [a, b] \to \mathbb{R}$ une fonction continue. Alors,

$$\lim_{A\to+\infty} \int_a^b f(t)\sin(At)\,\mathrm{d}t = 0, \lim_{A\to+\infty} \int_a^b f(t)\cos(At)\,\mathrm{d}t = 0$$

Démonstration. EN EXO. □

Exercice 2.11. Montrer que $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{\sin(nx)}{n} = \frac{\pi-x}{2}$ en posant $D_n(x) = 1 + 2\cos x + 2\cos(2x) + \ldots + 2\cos(nx) = \frac{\sin((n+\frac{1}{2})x)}{\sin(\frac{x}{2})}$

$$\begin{aligned}
D_n(x) = \sum_{k=-n}^{n} e^{ikx} &= q^{-n} + q^{-n+1} + \ldots + q^{-1} + 1 + q^1 + \ldots + q^n \\
&= q^{-n}\left(1 + q + q^2 + \ldots + q^{2n}\right) = q^{-n}\frac{q^{2n+1}-1}{q-1} = \frac{q^{n+1}-q^{-n}}{q-1} \\
&= \frac{e^{(i(n+1)x)-e^{-inx}}}{e^{ix}-1} = \frac{2\sin\left(\left(n+\frac{1}{2}\right)x\right)}{2\sin\left(\frac{x}{2}\right)}\frac{e^{i\frac{x}{2}}}{e^{i\frac{x}{2}}} \\
&= \frac{\sin\left(\left(n+\frac{1}{2}\right)x\right)}{\sin\left(\frac{x}{2}\right)}
\end{aligned}$$

Proposition 2.12.

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{\sin(nx)}{n} = \frac{\pi - x}{2}, x \in]0, 2\pi[.$$

Démonstration. Soit $x \in]0, 2\pi[$.

$$\begin{aligned}
\int_\pi^x D_{n(t)}\,\mathrm{d}t &= \int_\pi^x \left(1 + 2\sum_{k=1}^{n}\cos(kx)\right)\mathrm{d}t \\
&= (x-\pi) + 2\sum_{k=1}^{n}\left[\frac{\sin(kt)}{k}\right]_\pi^x = (x-\pi) + 2\sum_{k=1}^{n}\frac{\sin(kx)}{k}
\end{aligned}$$

$$\text{Donc} = \sum_{k=1}^{+\infty}\frac{\sin(kx)}{k} = \frac{\pi-x}{2}) + \frac{1}{2}\int_\pi^x \frac{\sin\left(\left(n+\frac{1}{2}\right)t\right)}{\sin\left(\frac{t}{2}\right)}\,\mathrm{d}t$$

Or $t \mapsto \frac{1}{\sin(\frac{t}{2})}$ est continue sur $[\pi, x]$ donc

$$\lim_{n\to+\infty}\int_\pi^x \frac{\sin\left(\left(n+\frac{1}{2}\right)t\right)}{\sin\left(\frac{t}{2}\right)}\,\mathrm{d}t = 0$$

d'après le Lemme 2.10 □

3. Séries de Fourier.

3.1. Récupération des coefficients d'une série trigonométrique.

Remarque 3.1 (Calcul préliminaire).

$$\int_0^{2\pi} e^{inx}\,\mathrm{d}x \overset{n\neq 0}{=} \left[\frac{e^{inx}}{in}\right]_0^{2\pi} = \frac{e^{in2\pi}-e^{in0}}{in} = 0$$

$$\text{et } = \int_0^{2\pi} e^{i0}\,\mathrm{d}x = 2\pi$$

Donc

$$\int_0^{2\pi} e^{inx}\,\mathrm{d}x = \begin{cases} 0 \text{ si } n \neq 0 \\ 1 \text{ si } n = 0 \end{cases}$$

Proposition 3.2. Soit A une série trigonométrique uniformément convergente de somme $f(x) \coloneqq a_0 + \sum a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) = \sum_{n=-\infty} c_n e^{inx}$. Alors a_0, a_n, b_n sont donnés par:

$$\begin{cases} a_0 = c_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\,\mathrm{d}x \\ a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\cos(nx)\,\mathrm{d}x \text{ et } c_n = \dfrac{1}{2\pi}\displaystyle\int_{-\pi}^{\pi} f(x)e^{-inx}. \\ b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\sin(nx)\,\mathrm{d}x \end{cases}$$

Démonstration. Par convergence uniforme, on peut intervertir $\int$ et $\sum$ Donc

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(x)e^{-inx}\,\mathrm{d}x = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k \int_0^{2\pi} e^{ikx}e^{-inx} = \begin{cases} 0 \text{ si } k \neq n \\ 1 \text{ si } k = n \end{cases} = c_n$$

Donc

$$c_n = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(x)e^{-inx}\,\mathrm{d}x, n \in \mathbb{Z}$$

et donc

$$a_0 = c_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\,\mathrm{d}x, a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\cos(nx)\,\mathrm{d}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\sin(nx)\,\mathrm{d}x.$$

□

Remarque 3.3. Dans nos calcul on peut toujours remplacer l'intervalle$[0, 2\pi]$ par un autre intervalle de longueur 2π car on travaille avec des fonctions 2π périodique. Cela peut permettre de faciliter certains calculs.

Exemple 3.4. On a que la somme d'une certaine série trigo uniformément convergente est $f(x) = x^2$.
Quels sont ses coeffs ?

$$
\begin{aligned}
a_0 &= \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x^2 \,\mathrm{d}x = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{x^3}{3}\right]_{-\pi}^{\pi} = \frac{1}{2\pi}\frac{\pi^3+\pi^3}{3} = \frac{\pi^2}{3} \\
b_n &= \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x^2 \sin(nx)\,\mathrm{d}x = 0 \text{ (car c'est une fonction impaire or f est paire)} \\
a_n &= \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x^2 \cos(nx)\,\mathrm{d}x = \frac{2}{\pi}\int_{0}^{\pi} x^2 \cos(nx)\,\mathrm{d}x \\
&\overset{\text{ipp}}{=} \frac{2}{\pi}\left(\left[\frac{x^2\sin(nx)}{n}\right]_0^{\pi} - 2\int_0^{\pi}\frac{x\sin(nx)}{n}\,\mathrm{d}x\right) = -\frac{4}{\pi}\int_0^{\pi}\frac{x\sin(nx)}{n}\,\mathrm{d}x \\
&= -\frac{4}{\pi}\left(\left[\frac{-x\cos(nx)}{n^2}\right]_0^{\pi} + \int_0^{\pi}\frac{\cos(nx)}{n^2}\,\mathrm{d}x\right) = -\frac{4}{\pi}\left(\frac{-\pi\cos(n\pi)}{n^2}\right) + \frac{4}{\pi}\left[\frac{\sin(nx)}{n^3}\right]_0^{\pi} \\
&= 4\frac{\cos(n\pi)}{n^2} = 4\frac{(-1)^n}{n^2}
\end{aligned}
$$

Ainsi, $f(x) = \frac{\pi^2}{3} + 4\sum \frac{(-1)^n}{n^2}\cos(nx)$ Donc sur $]-\pi,\pi[$,

$$
\sum_{n=1}^{+\infty}\frac{(-1)^n}{n^2}\cos(nx) = \frac{1}{4}\left(x^2 - \frac{\pi^2}{3}\right) \Rightarrow \sum_{n=1}^{+\infty}\frac{(-1)^n}{n^2} = -\frac{\pi^2}{12}
$$

non démontré pour l'instant.

Théorème 3.5. Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ une fonction 2π-périodique et C^1 par morceaux. Alors pour tout $n \in \mathbb{N} \setminus 0$,

$$
c_n(f) = \frac{1}{in}c_n(f').
$$

Démonstration. Soit $n \in \mathbb{Z}$, on a

$$
\begin{aligned}
c_n(f) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(t)e^{-int}\,\mathrm{d}t &= \frac{1}{2\pi}\left[f(t)e^{-int}\right]_0^{2\pi} + \frac{1}{in}\int_0^{2\pi} f'(t)e^{-int}\,\mathrm{d}t \\
&= \frac{1}{in}c_n(f') \text{ car } t \mapsto f(t)e^{-int} 2\pi\text{-périodique.}
\end{aligned}
$$

□

Corollaire 3.6. Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ une fonction 2π-périodique et C^1 par morceaux. Alors pour tout $n \in \mathbb{N} \setminus 0$,

$$
\begin{cases}
a_n(f) = \frac{-b_n(f')}{n} \\
b_n(f) = \frac{a_n(f')}{n}
\end{cases}.
$$

Démonstration.

$$
\begin{aligned}
a_n(f) &= c_n(f) + c_{-n}(f) = \frac{1}{in}c_n(f') - \frac{1}{in}c_{-n}(f') = -\frac{i}{n}(c_n(f') - c_{-n}(f')) = \frac{-b_n(f')}{n} \\
b_n(f) &= i(c_n(f) - c_{-n}) = \frac{1}{in}c_n(f') + \frac{1}{in}c_{-n}(f') = \frac{a_n(f')}{n}.
\end{aligned}
$$

□

3.2. Développement en série de Fourier.

Définition 3.7. Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$, une fonction 2π-périodique et continue par morceaux. On appelle *série de Fourier* de f la série $a_0 + \sum a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) = \sum c_n e^{inx}$ avec a_0, a_n, b_n définit par la Proposition 3.2.

Remarque 3.8. Vulgairement, cela signifie que la série de fourier sera égale à f aux points continus, et différente aux autres points.

Théorème 3.9. Soit f une fonction paire alors ses coefficients de Fourier vérifient les propriétés suivantes :

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \cos(nx) \text{ et } b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx)\, \mathrm{d}x = 0.$$

Théorème 3.10. Soit f une fonction impaire alors ses coefficients de Fourier vérifient les propriétés suivantes :

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx)\, \mathrm{d}x = 0 \text{ et } b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \sin(nx).$$

3.3. Convergence.

Lemme 3.11. Soit $f :]a,b[\to \mathbb{R}$ une fonction continue et dérivable. On suppose que $f(c^+) = \lim_{x\to c^+} f(x)$ et $f'(c^+) = \lim_{x\to c^+} f'(x)$ existent dans $\mathbb{R}$. Alors:

$$f'(c^+) = \lim_{x\to c^+} \frac{f(x) - f(c^+)}{x - c}$$

Démonstration. Utiliser le théorème des accroissements finis. □

Définition 3.12. Soit $f : [a,b] \to \mathbb{R}$. On dit que f est de classe C^k par morceaux sur $[a,b]$ s'il existe une subdivision $P = \{a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b\}$ de $[a,b]$ telle que pour tout $i \in \{0, -, n-1\}$, $f_i := f_{|]t_i, t_{i+1}[}$ soit de classe C^k sur $]t_i, t_{i+1}[$ et pour tout $k \in \{0, -, n\}$,

$$\lim_{x\to t_i^+} f_i^{(k)}(x) \in \mathbb{R} \text{ et } \lim_{x\to t_{i+1}^-} f_i^{(k)}(x) \in \mathbb{R}.$$

Définition 3.13. Soit $f : [a,b] \to \mathbb{C}$. On dit que f est de classe C^k si sa partie réelle et sa partie imaginaire sont C^k par morceaux.

Remarque 3.14. Dans le TD, « f est de classe C^k » sous-entend sur $\mathbb{R}$.

Exemple 3.15.

1. $f(x) = |x|$ est C^0 mais pas C^1 mais est C^1 par morceaux car
$$\mathbb{R} \ni \lim_{x\to 0^+} f(x) = -1 \neq \lim_{x\to 0^-} f(x) = 1 \in \mathbb{R}.$$
2. $f(x) = \sqrt{|x|}$ n'est pas C^1 par morceaux.

Définition 3.16. Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ une fonction 2π-périodique. On dit que f est C^k par morceaux si $f_{|[0,2\pi]}$ est C^k par morceaux.

Théorème 3.17 (Théorème de Dirichlet)**.** Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ une fonction 2π-périodique et de classe C^1 par morceaux. Alors pour tout $x \in \mathbb{R}$, la série de Fourier de f est convergente et

$$S(x) = \frac{f(x^-) + f(x^+)}{2}.$$

Démonstration. $S_N(x) = \sum_{n=-N}^{N} c_n e^{inx}$ avec $c_n = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(t)e^{-int}\,\mathrm{d}t$. On a

$$S_{N(x)} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sum_{n=-N}^{N} e^{in(x-t)}\,\mathrm{d}t = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)D_{N(x-t)}\,\mathrm{d}t,$$

$$D_N(y) = 1 + 2\cos y + \ldots + 2\cos(ny) = \begin{cases} \frac{\sin((n+\frac{1}{2})y)}{\sin(\frac{y}{2})} \text{ si } y \notin 2\pi\mathbb{Z} \\ 1 + 2N \text{ si } y \in 2\pi\mathbb{Z} \end{cases}$$

Or D_n est une fonction paire d'où $\int_{-\pi}^{\pi} D_{n(y)}\,\mathrm{d}y = 2\pi$ (calcul) et $\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} D_N(y)\,\mathrm{d}y = 1$. De plus, en posant $t = x + u$,

$$\begin{aligned} S_N(x) &= \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi-x}^{\pi-x} f\big(x + uD_{N(-u)}\big)\,\mathrm{d}u = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x+u)D_N(u)\,\mathrm{d}u, \text{car } 2\pi\text{-périodique} \\ &= \frac{1}{2}\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} f(x+u)D_N(u)\,\mathrm{d}u + \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{0} f(x+u)D_N(u)\,\mathrm{d}u. \end{aligned}$$

On pose $I = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} f(x+u)D_N(u)\,\mathrm{d}u$ et on a:

$$\begin{aligned} I - f(x^+) = I - f(x^+)\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} D_N(u)\,\mathrm{d}u &= \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}(f(x+u) - f(x^+))D_N(u)\,\mathrm{d}u \\ &= \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} \frac{f(x+u) - f(x^+)}{\sin\left(\frac{u}{2}\right)} \sin\left(\left(n + \frac{1}{2}\right)u\right)\mathrm{d}u. \end{aligned}$$

Posons $g(x) = \frac{f(x+u)-f(x^+)}{\sin(\frac{u}{2})}$. g est continue par morceaux sur $]0,\pi]$, on a $\sin\left(\frac{u}{2}\right) \underset{u\to 0}{\sim} \frac{u}{2}$ Donc

$$\frac{f(x+u) - f(x^+)}{\sin\left(\frac{u}{2}\right)} \sim 2\frac{f(x+u) - f(x^+)}{u} \longrightarrow 2f'(x^+)$$

Ainsi, g se prolonge par continuité en 0 et d'après le Lemme 2.10, $\lim_{N\to+\infty} I - f(x^+) = 0$;
On traite II de la meme manière et on obtient le résultat du théorème. □

Exemple 3.18. $f(x) = x^2$. pour $x \in [-\pi,\pi]$ que l'on prolonge par 2π-périodicité.
On a vu que $a_0 = \frac{\pi^2}{3}, a_n = \frac{4}{n^2}(-1)^n, b_n = 0$

De plus, f est C^1 par morceaux. D'où, par Dirichlet:

$$\pi^2 + \int_{n=1}^{+\infty} 4\frac{(-1)^n}{n^2}\cos(nx) = \frac{f(x^+) + f(x^-)}{2} = f(x) = x^2.$$

Avec $x = 0$, on trouve

$$\frac{\pi^2}{3} + 4\sum_{n=1}^{+\infty}\frac{(-1)^n}{n^2} = 0 \Rightarrow \sum_{n=1}^{+\infty}\frac{(-1)^n}{n^2} = \frac{\pi^2}{12}.$$

3.4. Convergence des coefficients de Fourier.

Proposition 3.19. Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ une fonction 2π-périodique.
(1) Si f est continue par morceaux alors $\lim_{n\to\pm\infty} c_n = 0$ i.e $\lim_{n\to+\infty} a_n = \lim_{n\to+\infty} b_n = 0$.
(2) Si f est C^k, et C^{k+1} par morceaux, $\lim_{n\to\pm\infty} n^{k+1}|c_n| = 0$ i.e $\lim n^{k+1}a_n = \lim n^{k+1}b_n = 0$.

Démonstration. Voir moodle
Idée: I: $a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\cos(nx)\,\mathrm{d}x \underset{n\to+\infty}{\longrightarrow} 0$ et $b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\sin(nx)\,\mathrm{d}x \underset{n\to+\infty}{\longrightarrow} 0$ par Lemme 2.10
II: On montre d'abord que si f est C^k et C^{k+1} par morceaux alors $c_n(f) = \frac{1}{(in)^{k+1}} c_n f^{(k+1)}$ $\square$

Corollaire 3.20. Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ 2π-périodique de classe C^1, et C^2 par morceaux alors la série de Fourier de f converge normalement vers f.

Démonstration. D'après la Proposition 3.19, $c_n = o\left(\frac{1}{n^2}\right)$ donc $\sum_{n\in\mathbb{Z}} c_n e^{inx}$ est normalement convergente car $\exists K \in \mathbb{R}, \sup_{x\in\mathbb{R}}|c_n e^{inx}| = |c_n| \leq \frac{K}{n^2}$.
De plus, par Théorème de Dirichlet, $\sum c_n e^{inx} = \frac{f(x^+)+f(x^-)}{2} = f(x)$ car f est continue. $\square$

Définition 3.21. Soit $a_0 \in \mathbb{C}$, $(a_n)_{n\in\mathbb{N}}, (b_n)_{n\in\mathbb{N}} \in \mathbb{C}$. On appelle polynome trigonométrique toute expression de la forme :

$$P(x) := a_0 + \sum_{n=1}^{N} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)$$

Exemple 3.22. La N-ième somme partielle d'une fonction f est un polynome trigonométrique.

Corollaire 3.23. Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ une fonction 2π-périodique continue par morceaux. Pour tout $\varepsilon > 0$, il existe $P(x)$, un polynome trigonométrique tel que

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} |f(x) - P(x)|^2\,\mathrm{d}x \leq \varepsilon.$$

Démonstration.
Etape 1: Si f est C^∞ sur $\mathbb{R}$, alors S_N converge uniformément vers f. donc il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $\sup_{x\in\mathbb{R}}|S_N(x) - f(x)| \leq \sqrt{\varepsilon}$. Alors

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} |S_N(x) - f(x)|^2\,\mathrm{d}x \leq \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \sqrt{\varepsilon}\,\mathrm{d}x = \varepsilon$$

Etape 2: poly. $\square$

4. Formule de Parseval.

Théorème 4.1 (Inégalité de Bessel). Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ une fonction 2π-périodique et continue par morceaux

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2 \leq \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} |f(x)|^2\,\mathrm{d}x$$

Théorème 4.2 (Théorème de Parseval). Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ une fonction 2π-périodique et continue par morceaux, Les coefficients de Fourier de f satisfont

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}|f(x)|^2\,\mathrm{d}x = \sum_{n=-\infty}^{+\infty}|c_n|^2 = |a_0|^2 + \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{+\infty}|a_n|^2 + |b_n|^2.$$

Exercice 4.3. Vérification de la formule de parseval avec les suites $a_n$et b_n. On a :

$$\begin{cases} a_n = c_n + c_{-n} \\ b_n = i(c_n - c_{-n}) \end{cases}$$

$|a_n|^2 = |c_n + c_{-n}| = |c_n|^2 + 2\,\mathrm{Re}\big(c_n\overline{c_{-n}}\big) + |c_n|^2$
$|b_n|^2 = |c_n - c_{-n}| = |c_n|^2 - 2\,\mathrm{Re}\big(c_n\overline{c_{-n}}\big) + |c_n|^2$.
Donc $|a_n|^2 + |b_n|^2 = 2\big(|c_n|^2 + |c_{-n}|^2\big)$ et $|a_0| = |c_0|$

Exemple 4.4.

1. $f(x) = \begin{cases} \frac{x}{2} \text{ sur}]-\pi,\pi[\\ 0 \text{ si } x=\pi \end{cases}.$

$$\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{+\infty} b_n^2 = \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{+\infty}\frac{1}{n^2} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}|f(x)|^2\,\mathrm{d}x = \frac{\pi^2}{6}$$

2. $f(x) = \frac{\pi}{2} - x$ sur $[0,\pi]$ + paire $+2\pi$-périodique. On a $b_n = 0, a_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n \text{ pair} \\ \frac{4}{\pi n^2} & \text{si } n \text{ impair} \end{cases}.$

   Parseval :

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}|f(x)|^2 = \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{+\infty}|a_n|^2 = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\left(\frac{\pi}{2} - x\right)^2\mathrm{d}x \underset{y=\frac{\pi}{2}-x}{=} \frac{1}{\pi}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} y^2\,\mathrm{d}y$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[\frac{y^3}{3}\right]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{3\pi}\cdot 2\cdot\frac{\pi^3}{8} = \frac{\pi^2}{12}.$$

D'où,

$$\frac{\pi^2}{12} = \frac{1}{2}\sum_{(n=1),(n\text{ impair})}^{+\infty}\frac{16}{\pi^2 n^4}$$

d'où $\sum_{n=1}^{+\infty}\frac{1}{(2n+1)^4} = \frac{\pi^4}{12} * 8 = \frac{\pi^4}{96}$. En déduire $\sum_{n=1}^{+\infty}\frac{1}{n^4} =??$

5. Prolongement Dirichlet

Remarque 5.1. Lorsqu'on rajoute l'hypothèse de continuité au théorème de dirchlet, il y a continuité uniforme.

Proposition 5.2. Soit $a_1, -, a_n \in \mathbb{R}, b_1, -, b_n \in \mathbb{R}$. On a

$$\left|\sum_{k=1}^{n} a_k b_k\right| \leq \sqrt{\sum_{k=1}^{n} a_k^2 \sum_{k=1}^{n} b_k^2}$$

avec égalité si et seulement si $(a_1, -, a_n)$ et $(b_1, -, b_n)$ sont liés.

Exercice 5.3. Soit $x_1, -, x_n > 0$ avec $\sum_{k=1}^{n} x_k = 1$ Montrer que $\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{x_k} \geq n^2$ et déterminer les cas d'égalité.

Proposition 5.4 (Dirchlet bis)**.** Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ une fonction 2π-périodique, continue et C^1 par morceaux. Alors $\sum_{n\in\mathbb{Z}} |c_n|$ est convergente et la série de Fourier de f converge uniformément vers f.

Démonstration. Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ une fonction 2π-périodique, continue et C^1 par morceaux. On sait que $c_n(f) = \frac{1}{in} c_n(f')$ D'après Parseval, $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |c_n(f')|^2$ converge. En appliquant Cauchy-Schwarz, $n \neq 0$

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |c_n(f)| = \sum_{n=-N}^{N} \left| \frac{c_n(f')}{in} \right| = \sum_{n=-N}^{N} \frac{1}{n} |c_n(f')| \leq \sqrt{\sum_{n=-N}^{N} \frac{1}{n^2} \cdot \sum_{n=-N}^{N} |c_n(f')|^2}$$

D'où

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |c_n(f)| \leq \sqrt{2 \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^2} \cdot \left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |c_n(f')|^2 \right)_{\in\mathbb{R}}}$$

, D'où $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |c_n(f)|$ est convregente $\square$

Théorème 5.5 (Théorème de Fejer)**.** Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ 2π-périodique, continue telle que $\sum(|c_n(f)|)$ est convergente alors la série de Fourier de f converge uniformément vers f.