VI – Suites de fonctions

I. Limite uniforme d'un produit

1) Puisque $\|f_n - f\|_\infty \xrightarrow[n\to+\infty]{} 0$, à partir d'un certain rang n_0 nous avons $\|f_n - f\|_\infty \leqslant 1$.
En particulier $\|f_n\|_\infty \leqslant \|f\|_\infty + 1$, donc si f est bornée, les f_n le sont aussi, au moins à partir du rang n_0.
Et de même, s'il existe un rang n_1 à partir duquel les f_n sont bornées, alors si n_2 est un entier fixé tel que $n_2 \geqslant \max(n_0, n_1)$ nous avons $\|f\|_\infty \leqslant \|f_{n_2}\|_\infty + 1$, et f est bien bornée.

2) Grâce à la question précédente, les f_n et les g_n sont bornées à partir d'un certain rang. De plus, nous avons vu à la question précédente qu'à partir d'un certain rang $\|f_n\|_\infty \leqslant 1 + \|f\|_\infty$, la suite $(\|f_n\|_\infty)$ est bornée. Donc

$$\begin{aligned}\|f_ng_n - fg\|_\infty &= \|f_n(g_n - g) + (f_n - f)g\|_\infty \\ &\leqslant \|f_n\|_\infty \|g_n - g\|_\infty + \|g\|_\infty \|f_n - f\|_\infty \\ &\xrightarrow[n\to+\infty]{} 0\end{aligned}$$

par somme de produits d'une suite bornée par une suite tendant vers 0.

3) $\|f_nh - fh\|_\infty \leqslant \|h\|_\infty \|f_n - f\|_\infty \xrightarrow[n\to+\infty]{} 0$, en tant que produit d'une suite bornée par une suite tendant vers 0.

4) Considérons par exemple sur $[0,1[$ les fonctions $f_n \ : x \mapsto x^n(1-x)$ et $h \ : x \mapsto \dfrac{1}{1-x}$. La suite (f_n) converge simplement vers la fonction nulle.
Une étude de fonction assure que $|f_n|$ atteint son maximum en $\dfrac{n}{n+1}$, ce maximum vaut $\left(\dfrac{n}{n+1}\right)^n \times \dfrac{1}{n+1} \sim \dfrac{1}{\mathrm{e}\, n} \xrightarrow[n\to+\infty]{} 0$, donc (f_n) converge bien uniformément vers 0 sur $[0,1[$.
Mais $hf_n \ : x \mapsto x^n$, qui converge simplement vers 0, mais pas uniformément, car $\sup\limits_{[0,1[} hf_n = 1$.

II. Étude du type de convergence (banque CCP MP)

1) Soit $g_n : X \longrightarrow \mathbb{C}$ et $g : X \longrightarrow \mathbb{C}$.
Dire que (g_n) converge uniformément vers g sur X signifie que :

$$\forall \varepsilon > 0, \exists\, N \in \mathbb{N} / \forall\, n \in \mathbb{N}, n \geqslant N \Longrightarrow \forall\, x \in X, |g_n(x) - g(x)| \leqslant \varepsilon.$$

Ou encore, (g_n) converge uniformément vers g sur $X \iff \lim\limits_{n\to+\infty}\left(\sup\limits_{x\in X} |g_n(x) - g(x)|\right) = 0$.

2) a) On pose pour tout $x \in \mathbb{R}$, $f_n(x) = \dfrac{n+2}{n+1}\mathrm{e}^{-nx^2}\cos(\sqrt{n}x)$.
Soit $x \in \mathbb{R}$.
Si $x = 0$, alors $f_n(0) = \dfrac{n+2}{n+1}$, donc $\lim\limits_{n\to+\infty} f_n(0) = 1$.
Si $x \neq 0$, alors $\lim\limits_{n\to+\infty} f_n(x) = 0$.
En effet, $|f_n(x)| \underset{+\infty}{\sim} \mathrm{e}^{-nx^2}|\cos(\sqrt{n}x)|$ et $0 \leqslant \mathrm{e}^{-nx^2}|\cos(\sqrt{n}x)| \leqslant \mathrm{e}^{-nx^2} \xrightarrow[n\to+\infty]{} 0$.
On en déduit que (f_n) converge simplement sur $\mathbb{R}$ vers la fonction f définie par :

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si} \quad x \neq 0 \\ 1 & \text{si} \quad x = 0 \end{cases}$$

b) Pour tout $n \in \mathbb{N}$, f_n est continue sur $[0,+\infty[$ et f non continue en 0 donc (f_n) ne converge pas uniformément vers f sur $[0,+\infty[$.

c) Soit $a > 0$.
On a : $\forall\, x \in [a,+\infty[$, $|f_n(x) - f(x)| = |f_n(x)| \leqslant \dfrac{n+2}{n+1}\mathrm{e}^{-na^2}$ (majoration indépendante de x).
Donc $||f_n - f||_\infty \leqslant \dfrac{n+2}{n+1}\mathrm{e}^{-na^2}$.
Par ailleurs, $\lim\limits_{n\to+\infty} \dfrac{n+2}{n+1}\mathrm{e}^{-na^2} = 0$ (car $\dfrac{n+2}{n+1}\mathrm{e}^{-na^2} \underset{+\infty}{\sim} \mathrm{e}^{-na^2}$).
Donc (f_n) converge uniformément vers f sur $[a,+\infty[$.

d) On remarque que pour tout $n \in \mathbb{N}$, f_n est bornée sur $]0,+\infty[$ car pour tout $x \in]0,+\infty[$, $|f_n(x)| \leqslant \dfrac{n+2}{n+1} \leqslant 2$.
D'autre part, f est bornée sur $]0,+\infty[$, donc, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\sup\limits_{x\in]0,+\infty[} |f_n(x) - f(x)|$ existe.

On a $\left|f_n(\frac{1}{\sqrt{n}}) - f(\frac{1}{\sqrt{n}})\right| = \frac{(n+2)\mathrm{e}^{-1}\cos 1}{n+1}$ donc

$$\lim_{n\to+\infty}\left|f_n(\frac{1}{\sqrt{n}}) - f(\frac{1}{\sqrt{n}})\right| = \mathrm{e}^{-1}\cos 1 \neq 0.$$

Or $\sup\limits_{x\in]0,+\infty[}|f_n(x)-f(x)| \geqslant \left|f_n(\frac{1}{\sqrt{n}}) - f(\frac{1}{\sqrt{n}})\right|$, donc

$$\sup_{x\in]0,+\infty[}|f_n(x)-f(x)| \underset{n\to+\infty}{\not\to} 0.$$

Donc (f_n) ne converge pas uniformément vers f sur $]0,+\infty[$.

III. Limite uniforme d'une suite de fonctions polynomiales

1) Il existe $N\in\mathbb{N}$ tel que $\forall\, n\geqslant N$, $\|P_n-f\|_\infty\leqslant 1/2$ et donc $\|P_n-P_N\|_\infty\leqslant 1$.
Seules les fonctions polynomiales constantes sont bornées sur $\mathbb{R}$ donc P_n-P_N est une fonction polynomiale constante. Posons λ_n la valeur de celle-ci.

2) $\lambda_n = P_n(0)-P_N(0)\to f(0)-P_N(0)=\lambda_\infty$. $P_n=P_N+P_n-P_N \underset{CS}{\longrightarrow} P_N+\lambda_\infty$ donc par unicité de limite $f=P_N+\lambda_\infty$ est une fonction polynomiale.

IV. Interversion limite - intégrale sur un segment (banque CCP MP)

1) Pour $x\in[0,1]$, $\lim\limits_{n\to+\infty} f_n(x) = (x^2+1)\mathrm{e}^x$.
La suite de fonctions (f_n) converge simplement vers $f : x\mapsto (x^2+1)\mathrm{e}^x$ sur $[0,1]$.
On a $\forall\, x\in[0,1]$, $f_n(x)-f(x) = (x^2+1)\dfrac{x(\mathrm{e}^{-x}-\mathrm{e}^x)}{n+x}$,
et donc : $\forall x\in[0,1]$, $|f_n(x)-f(x)|\leqslant\dfrac{2\mathrm{e}}{n}$ (majoration indépendante de x).
Donc $||f_n-f||_\infty\leqslant\dfrac{2\mathrm{e}}{n}$.
De plus, $\lim\limits_{n\to+\infty}\dfrac{2\mathrm{e}}{n}=0$ donc la suite de fonctions (f_n) converge uniformément vers f sur $[0,1]$.

2) Par convergence uniforme sur le segment $[0,1]$ de cette suite de fonctions continues sur $[0,1]$, on peut intervertir limite et intégrale.
On a donc $\lim\limits_{n\to+\infty}\displaystyle\int_0^1 (x^2+1)\frac{n\mathrm{e}^x+x\mathrm{e}^{-x}}{n+x}\,\mathrm{d}x = \int_0^1 (x^2+1)\mathrm{e}^x\,\mathrm{d}x$.
Puis, en effectuant deux intégrations par parties, on trouve $\displaystyle\int_0^1 (x^2+1)\mathrm{e}^x\,\mathrm{d}x = 2\mathrm{e}-3$.

V. Utilisation du théorème de convergence dominée

Essayons d'appliquer le théorème de convergence dominée.
Notons, pour tout $n\in\mathbb{N}^*$:

$$f_n\ :\ ]0,a]\longrightarrow\mathbb{R},\ x\longmapsto\frac{1}{x}\left(\left(1+\frac{x}{n}\right)^n-1\right)$$

— Pour tout $n\in\mathbb{N}^*$, f_n est continue par morceaux (car continue) sur $]0,a]$.

— Soit $x\in]0,a]$. On sait : $\left(1+\dfrac{x}{n}\right)^n \underset{n\to+\infty}{\longrightarrow} \mathrm{e}^x$, donc : $f_n(x)\underset{n\to+\infty}{\longrightarrow}\dfrac{\mathrm{e}^x-1}{x}$.
Ainsi, $f_n \overset{C.S}{\underset{n\to+\infty}{\longrightarrow}} f$ sur $]0,a]$, où :

$$f\ :\ ]0,a]\longrightarrow\mathbb{R},\ x\longmapsto\frac{\mathrm{e}^x-1}{x}$$

— f est continue par morceaux (car continue) sur $]0,a]$.

— Soit $n\in\mathbb{N}^*$.

Puisque $: \forall t \in]-1,+\infty[,\ \ln(1+t) \leqslant t$,
on a : $\quad \forall t \in [0,+\infty[,\ 1+t \leqslant \mathrm{e}^t$,
d'où, pour tout $x \in]0,a]$: $\left(1+\dfrac{x}{n}\right)^n \leqslant \left(\mathrm{e}^{\frac{x}{n}}\right)^n = \mathrm{e}^x$,
puis : $\quad 0 \leqslant \left(1+\dfrac{x}{n}\right)^n - 1 \leqslant \mathrm{e}^x - 1$,
et enfin : $\quad 0 \leqslant f_n(x) \leqslant f(x)$.
L'application f est continue par morceaux sur $]0,a]$, positive, et intégrable sur $]0,a]$ car $f(x) = \dfrac{\mathrm{e}^x - 1}{x} \underset{x \longrightarrow 0}{\longrightarrow} 1$.
Ainsi, la suite $(f_n)_{n \geqslant 1}$ vérifie l'hypothèse de domination.
D'après le théorème de convergence dominée, on déduit :

$$\int_0^a f_n \underset{n \to +\infty}{\longrightarrow} \int_0^a f$$

c'est-à-dire :

$$\int_0^a \frac{1}{x}\left(\left(1+\frac{x}{n}\right)^n - 1\right) \mathrm{d}x \underset{n \to +\infty}{\longrightarrow} \int_0^a \frac{\mathrm{e}^x - 1}{x}\ \mathrm{d}x$$

VI. Recherche d'un équivalent d'une intégrale à paramètre entier naturel

D'abord, pour tout $n \in \mathbb{N}^*, I_n$ existe comme intégrale d'une application continue sur un segment.

1) Comme, pour tout $x \in]0,1], \sqrt{1-x^n} \underset{n \to +\infty}{\longrightarrow} 1$,

on peut conjecturer : $I_n \underset{n \to +\infty}{\longrightarrow} 1$.

Le théorème de convergence dominée s'applique, mais un simple calcul de majoration est possible. En effet, on a, pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, en utilisant une expression conjuguée :

$$\begin{aligned}
|I_n - 1| &= \left|\int_0^1 \sqrt{1-x^n}\ \mathrm{d}x - \int_0^1 1\ \mathrm{d}x\right| \\
&= \int_0^1 \left(1 - \sqrt{1-x^n}\right) \mathrm{d}x = \int_0^1 \frac{x^n}{1+\sqrt{1-x^n}}\ \mathrm{d}x \\
&\leqslant \int_0^1 x^n\ \mathrm{d}x = \left[\frac{x^{n+1}}{n+1}\right]_0^1 = \frac{1}{n+1},
\end{aligned}$$

donc $|I_n - 1| \underset{n \to +\infty}{\longrightarrow} 0$, puis : $I_n \underset{n \to +\infty}{\longrightarrow} 1$.

2) Reprenons le calcul de $I_n - 1$ effectué ci-dessus (sans la valeur absolue) :

$$I_n - 1 = -\underbrace{\int_0^1 \frac{x^n}{1+\sqrt{1-x^n}}\ \mathrm{d}x}_{\text{notée } J_n}.$$

Pour étudier J_n, effectuons le changement de variable $t = x^n, x = t^{\frac{1}{n}},\ \mathrm{d}x = \dfrac{1}{n} t^{\frac{1}{n}-1}\ \mathrm{d}t$:

$$J_n = \int_0^1 \frac{t}{1+\sqrt{1-t}} \frac{1}{n} t^{\frac{1}{n}-1}\ \mathrm{d}t = \frac{1}{n} \underbrace{\int_0^1 \frac{t^{\frac{1}{n}}}{1+\sqrt{1-t}}\ \mathrm{d}t}_{\text{notée } K_n}.$$

Pour trouver la limite de K_n (si elle existe) lorsque l'entier n tend vers l'infini, nous allons essayer d'utiliser le théorème de convergence dominée.
Notons, pour tout $n \in \mathbb{N}^*$:

$$f_n :]\,0,1] \longrightarrow \mathbb{R}, t \longmapsto \frac{t^{\frac{1}{n}}}{1+\sqrt{1-t}}$$

— Pour tout $n \in \mathbb{N}^*, f_n$ est continue par morceaux (car continue) sur $]0,1]$.
— Pour tout $t \in]0,1]$, on a $: t^{\frac{1}{n}} \underset{n \to +\infty}{\longrightarrow} 1$, donc $f_n \underset{n \to +\infty}{\overset{C.S}{\longrightarrow}} f$ sur $]0,1]$, où $: f :]0,1] \longrightarrow \mathbb{R}, t \longmapsto \dfrac{1}{1+\sqrt{1-t}}$.
— f est continue par morceaux (car continue) sur $]0,1]$.
— On a :

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, \forall t \in]\,0,1]\,, |f_n(t)| = \frac{t^{\frac{1}{n}}}{1+\sqrt{1-t}} \leqslant 1$$

et l'application constante 1 est continue par morceaux, $\geqslant 0$, intégrable sur l'intervalle borné $]0,1]$.
Ainsi, la suite $(f_n)_{n \geqslant 1}$ vérifie l'hypothèse de domination.
D'après le théorème de convergence dominée, on déduit :

$$K_n = \int_0^1 f_n \underset{n \to +\infty}{\longrightarrow} \int_0^1 f = \underbrace{\int_0^1 \frac{1}{1+\sqrt{1-t}}\ \mathrm{d}t}_{\text{notée } L}$$

Pour calculer L, on effectue le changement de variable $u = \sqrt{1-t}, t = 1-u^2,\ \mathrm{d}t = -2u\ \mathrm{d}u$:

$L = \displaystyle\int_1^0 \frac{1}{1+u}(-2u)\mathrm{d}u = 2\int_0^1 \frac{u}{1+u}\ \mathrm{d}u$

$= 2\displaystyle\int_0^1 \left(1 - \frac{1}{1+u}\right)\mathrm{d}u = 2[u - \ln(1+u)]_0^1 = 2(1-\ln 2).$

Ainsi : $K_n \underset{n\to+\infty}{\longrightarrow} 2(1-\ln 2)$,

et on conclut :

$$I_n - 1 = -J_n = -\frac{1}{n}K_n \underset{n\to+\infty}{\sim} -\frac{2(1-\ln 2)}{n}.$$