

Table des matières

I Intégrales dépendant d'un paramètre	1
I.1 Cadre d'étude	1
I.2 Continuité	1
II Dérivabilité	3
II.1 Approche intuitive	3
II.2 Le théorème	3

I Intégrales dépendant d'un paramètre

I.1 Cadre d'étude

I.1.1 Transformée de Laplace

Soit f une fonction définie sur \mathbb{R}^+ au moins et continue.

La transformée de Laplace de f est la fonction $F(p) = \int_0^{+\infty} f(t)e^{-pt}dt$ quand cette fonction F est bien définie.

Si f est intégrable sur \mathbb{R}_+^* alors F est définie sur $]0, +\infty[$.

I.1.2 La fonction Gamma

Soit $\alpha \in \mathbb{R}$. A quelle condition sur α l'intégrale $\int_0^{+\infty} t^{\alpha-1}e^{-t}dt$ est-elle convergente ?

Remarquons que $f : t \mapsto t^{\alpha-1}e^{-t}$ est continue et positive sur $]0, +\infty[$ et même continue en 0 (par prolongement) si $\alpha \geq 1$.

— Etude en 0. On a $f(t) \underset{0}{\sim} t^{\alpha-1}$ qui est intégrable au voisinage de 0 ssi $-(\alpha - 1) < 1$ ie $\alpha > 0$. Par comparaison de fonctions positives, f est intégrable sur $]0, 1]$ ssi $\alpha > 0$.

— Etude en $+\infty$. On a $t^2 f(t) = t^{\alpha+1}e^{-t} \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0$ par croissances comparées et donc $f(t) = o_{+\infty}(\frac{1}{t^2})$. Par comparaison de fonctions positives, f est intégrable sur $[1, +\infty[$.

Conclusion : f est intégrable sur $]0, +\infty[$ ssi $\alpha > 0$.

On pose maintenant $\Gamma : \begin{cases}]0, +\infty[& \rightarrow \mathbb{R}^+ \\ x & \mapsto \int_0^{+\infty} t^{x-1}e^{-t}dt \end{cases}$. Cette fonction est bien définie.

I.1.3 Généralisation

Les intégrales qui nous intéressent dans ce chapitre seront toutes de la forme des deux exemples précédents. On note généralement x le paramètre et t la variable d'intégration.

En notant J l'intervalle d'intégration, on aura donc affaire à des intégrales de la forme

$$\int_J \varphi(x, t)dt$$

dont la valeur dépend de la valeur choisie pour x .

Pour étudier ces intégrales, on pose $f : x \mapsto \int_J \varphi(x, t)dt$. La première question est de connaître le domaine de définition de f , c'est à dire trouver les valeurs de x pour lesquelles l'intégrale existe et a une valeur finie.

I.1.4 Exemple

Donner l'ensemble de définition de $f : x \mapsto \int_0^\pi \cos(x \sin(t))dt$.

I.1.5 Exemple

Montrer que la fonction $f : x \mapsto \int_0^{+\infty} \frac{e^{-t}}{t^2+x}dt$ est bien définie sur $]0, +\infty[$.

I.1.6 Piège classique

Il ne faut pas confondre la forme des intégrales précédentes (où l'intégrande dépend de x , la variable de la fonction à étudier) avec des fonctions de la forme

$$\Phi : x \mapsto \int_a^x \varphi(t)dt$$

où on peut appliquer le théorème fondamental du calcul différentiel : si φ est continue sur un intervalle J et que $a \in J$ alors Φ est une primitive de φ et c'est même la primitive de φ qui s'annule en a .

I.2 Continuité

I.2.1 Théorème

(On s'intéresse ici à la continuité d'une fonction de la forme $f : x \mapsto \int_J \varphi(x, t)dt$)

Soit I, J deux intervalles non triviaux de \mathbb{R} , $\varphi : \begin{cases} I \times J & \rightarrow \mathbb{K} \\ (x, t) & \mapsto \varphi(x, t) \end{cases}$ une fonction. Supposons que :

1. Pour $x \in I$ fixé, $\varphi_x : t \mapsto \varphi(x, t)$ est continue sur J .
2. Pour $t \in J$ fixé, $\varphi_t : x \mapsto \varphi(x, t)$ est continue sur I .

3. (hypothèse de domination) Il existe $g : J \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction positive, continue et **intégrable** sur J telle que

$$\forall (x, t) \in I \times J \quad |\varphi(x, t)| \leq g(t)$$

Alors la fonction $f : \begin{cases} I & \rightarrow \mathbb{K} \\ x & \mapsto \int_J \varphi(x, t) dt \end{cases}$ est définie et continue sur l'intervalle I .

Preuve.

On montre juste que f est bien définie, ie que pour $x \in I$ fixé, $\int_J \varphi(x, t) dt$ converge.

Or pour x fixé, on a $\forall t \in J \quad |\varphi(x, t)| \leq g(t)$ avec g intégrable sur J . Par comparaison de fonctions positives, $t \mapsto \varphi(x, t)$ est intégrable sur J donc son intégrale converge. Ainsi $f(x)$ existe bien. ■

I.2.2 Remarque

1. La première hypothèse assure que le calcul éventuel de l'intégrale $\int_J \varphi(x, t) dt$ peut avoir du sens.
2. La deuxième hypothèse est "naturelle". On veut que la fonction f qui dépend de x soit continue. Il faut donc partir de fonctions de x qui soient continue.
3. La troisième hypothèse est la plus importante et la plus délicate en pratique. Il faut trouver un majorant de $|\varphi(x, t)|$ qui **ne dépend pas** de la valeur de x mais peut éventuellement dépendre de celle de t .

Ensuite on prouve que notre fonction majorante est bien intégrable, en utilisant souvent le théorème de comparaisons des fonctions positives.

I.2.3 Exemple

Montrer que $f : x \mapsto \int_0^\pi \cos(x \sin(t)) dt$ est continue sur \mathbb{R} . On pose $\varphi : (x, t) \mapsto \cos(x \sin(t))$ définie sur $\mathbb{R} \times [0, \pi]$.

1. Soit $x \in \mathbb{R}$ fixé. On a déjà vu que $t \mapsto \varphi(x, t)$ est continue sur $[0, \pi]$.
2. Soit $t \in [0, \pi]$ fixé. Alors $x \mapsto \cos(x \sin(t))$ est continue sur \mathbb{R} (de la forme $x \mapsto \cos(\alpha x)$ pour un $\alpha \in \mathbb{R}$ fixé).
3. Dominons! Soit $(x, t) \in \mathbb{R} \times [0, \pi]$. Alors $|\cos(x \sin(t))| \leq 1$. Comme la fonction constante 1 est intégrable sur $[0, \pi]$ on peut appliquer le théorème précédent.

Conclusion : f est continue sur \mathbb{R} .

I.2.4 Cas où J est un segment

Il suffit de dominer par une constante, ou par une fonction continue ne dépendant pas de x .

I.2.5 Exemple

Montrer que $x \mapsto \int_0^{+\infty} e^{-t} \cos(xt^2) dt$ est définie et continue sur $[0, +\infty[$.

I.2.6 Remarque sur la domination

Le raisonnement est très souvent (dans le cas où on parle d'intégrales impropres), de fixer $t \in J$ et trouver la plus grande valeur de $|\varphi(x, t)|$ pour x dans l'intervalle considéré.

I.2.7 Proposition

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{K}$ une fonction.

Pour $k \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$,

1. f est de classe \mathcal{C}^k sur I si et seulement si f est de classe \mathcal{C}^k sur tout segment $[a, b]$ inclus dans I .
2. Si $I =]0, +\infty[$, f est de classe \mathcal{C}^k sur I ssi f est de classe \mathcal{C}^k sur $[a, +\infty[$ pour tout $a > 0$.

Preuve.

Commençons par prouver la continuité (ou dérivabilité) de f sous l'hypothèse f est continue (respectivement dérivable) sur tout segment inclus dans I .

Soit $x_0 \in I$. Si x_0 est une borne de I , et J un segment (non réduit à un point) d'extrémité x_0 et inclus dans I . Alors la continuité de f en x_0 est une continuité à gauche ou à droite et est donc assurée par la continuité sur J .

Si x_0 n'est pas une extrémité de I , on prend cette fois un segment contenant x_0 (de la forme $[x_0 - \alpha, x_0 + \alpha]$ pour un $\alpha > 0$) et la continuité de f en x_0 est bien assurée (à gauche et à droite).

Les mêmes arguments assurent la dérivabilité.

Le reste de la preuve se fait par récurrence : si f est \mathcal{C}^{k+1} sur tout segment pour un $k \geq 0$ fixé, alors f est dérivable sur I et f' est \mathcal{C}^k sur tout segment donc \mathcal{C}^k et finalement f est bien \mathcal{C}^{k+1} .

On conclut grâce au principe de récurrence. ■

I.2.8 Domination locale

$$\Gamma : \begin{cases}]0, +\infty[& \rightarrow \mathbb{R}^+ \\ x & \mapsto \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \end{cases} .$$

Soit $a, b > 0$ avec $a < b$. Montrer que Γ est continue sur $[a, b]$. **Pour l'application du théorème, on a en fait $I = [a, b]$** On pose $\varphi : (x, t) \mapsto t^{x-1}e^{-t} = e^{(x-1)\ln(t)}e^{-t}$.

1. Pour $x \in [a, b]$ fixé, $t \mapsto \varphi(x, t)$ est continue sur $]0, +\infty[$.
2. Pour $t > 0$ fixé, $x \mapsto \varphi(x, t)$ est continue sur $[a, b]$.
3. Soit $x \in [a, b]$ et $t > 0$. $t^{x-1}e^{-t} \leq \begin{cases} t^{a-1}e^{-t} & \text{si } t \in]0, 1] \\ t^{b-1}e^{-t} & \text{si } t \geq 1 \end{cases}$.

Dans tous les cas $|t^{x-1}e^{-t}| \leq (t^{a-1} + t^{b-1})e^{-t}$ qui est intégrable sur $]0, +\infty[$ par somme et d'après l'étude du début de chapitre.

Finalement Γ est continue sur $[a, b]$.

Montrons maintenant que Γ est continue sur $]0, +\infty[$. Soit $x > 0$. Alors Γ est continue sur $[x/2, x+1]$ et donc continue en x . Ainsi Γ est continue sur $]0, +\infty[$.

II Dérivabilité

II.1 Approche intuitive

II.1.1 Le résultat désirable

On reprend le cadre précédent et on se demande si la fonction $f : x \mapsto \int_J \varphi(x, t)dt$ est dérivable. Il s'agit d'une fonction de la variable x , si tout se passait pour le mieux on pourrait dériver par rapport à x comme des brutes :

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \int_J \varphi(x, t)dt = \int_J \frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial x} dt$$

II.1.2 Hypothèses

Donner les hypothèses sur φ pour que les intégrales considérées puissent exister.

II.2 Le théorème

II.2.1 Théorème

(On s'intéresse ici à la classe \mathcal{C}^1 d'une fonction de la forme $f : x \mapsto \int_J \varphi(x, t)dt$)

Soit I, J deux intervalles non triviaux de \mathbb{R} , $\varphi : \begin{cases} I \times J & \rightarrow \mathbb{K} \\ (x, t) & \mapsto \varphi(x, t) \end{cases}$ une fonction. Supposons que :

1. Pour $x \in I$ fixé, $\varphi_x : t \mapsto \varphi(x, t)$ est continue sur J et **intégrable** sur J .

2. Pour $t \in J$ fixé, $\varphi_t : x \mapsto \varphi(x, t)$ est de classe \mathcal{C}^1 sur I .
3. Pour $x \in I$ fixé, $t \mapsto \frac{\partial \varphi}{\partial x}(x, t) = \varphi'_t(x)$ (la dérivée partielle dont on vient de prouver l'existence, mais comme fonction de t) est continue sur J
4. (hypothèse de domination) Il existe $g : J \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction positive, continue et **intégrable** sur J telle que

$$\forall (x, t) \in I \times J \quad \left| \frac{\partial \varphi}{\partial x}(x, t) \right| \leq g(t)$$

Alors la fonction $f : \begin{cases} I & \rightarrow \mathbb{K} \\ x & \mapsto \int_J \varphi(x, t)dt \end{cases}$ est définie et de classe \mathcal{C}^1 sur l'intervalle I . De plus, pour $x \in I$

$$f'(x) = \int_J \frac{\partial \varphi}{\partial x}(x, t)dt$$

II.2.2 Remarque sur les hypothèses

1. Vérifier l'intégrabilité de la fonction de t revient à déterminer le domaine de définition de f . En particulier, si on a déjà prouvé la continuité de f , c'est déjà prouvé !
2. On veut dériver par rapport à x , comme d'habitude, on s'assure que cette opération est licite.
3. Nous n'intégrons que des fonctions continues. Vu la conclusion (désirée, voir le point précédent), cette vérification est naturelle.
4. Cette fois, c'est la dérivée partielle par rapport à x qu'il faut dominer. Les mêmes remarques et techniques s'appliquent. En particulier, le but est d'obtenir un majorant **qui ne dépend pas de x** .

II.2.3 Exemple

Montrer que $f : x \mapsto \int_0^\pi \cos(x \sin(t))dt$ est de classe \mathcal{C}^1 sur \mathbb{R} .

La fonction $\varphi : (x, t) \mapsto \cos(x \sin(t))$ est dérivable par rapport à x par composition et $\frac{\partial \varphi}{\partial x} : (x, t) \mapsto -\sin(t) \sin(x \sin(t))$ est continue sur $\mathbb{R} \times [0, \pi]$. Ceci prouve les 3 premières hypothèses.

Pour $(x, t) \in \mathbb{R} \times [0, \pi]$, $|\frac{\partial \varphi}{\partial x}(x, t)| \leq 1$ et 1 est intégrable sur le segment $[0, \pi]$. D'après le théorème de dérivation des intégrales à paramètres, f est de classe \mathcal{C}^1 sur \mathbb{R} et $f' : x \mapsto \int_0^\pi \sin(t) \cos(x \sin(t))dt$.

II.2.4 Fonction Γ

Montrer que la fonction Γ est de classe \mathcal{C}^∞ sur tout $[a, b]$ segment non trivial de $]0, +\infty[$. On en déduit que Γ est de classe \mathcal{C}^∞ sur $]0, +\infty[$.

II.2.5 La classe \mathcal{C}^∞

En résumé, pour prouver que f est \mathcal{C}^∞

1. Justifier des continuités.
2. Calculer les dérivées partielles par rapport à x , justifier les continuités par rapport à t puis dominer chaque dérivée.

II.2.6 Exemple

Soit $f : x \mapsto \int_0^{+\infty} \ln(t)e^{-xt} dt$. Soit $a > 0$. Prouver que f est \mathcal{C}^1 sur $[a, +\infty[$ et calculer f' .

- Pour $x \geq a$ fixé, $t \mapsto \ln(t)e^{-xt}$ est continue sur $]0, +\infty[$
- Pour $t > 0$ fixé, $x \mapsto \ln(t)e^{-xt}$ est \mathcal{C}^1 sur $[a, +\infty[$ de dérivée $x \mapsto -t \ln(t)e^{-xt}$.
- Pour $x \geq a$ fixé, $t \mapsto -t \ln(t)e^{-xt}$ est continue sur $]0, +\infty[$.
- Pour $x \geq a$ et $t > 0$, on a $|-t \ln(t)e^{-xt}| = t |\ln(t)| e^{-xt} \leq t |\ln(t)| e^{-at}$ qui est majorant négligeable devant $\frac{1}{t^2}$ en $+\infty$ et prolongeable par continuité en 0.

D'après el théorème de dérivation des intégrales à paramètres, f est de classe \mathcal{C}^1 sur $[a, +\infty[$. Comme ce résultat est valable pour tout $a > 0$, f est de classe \mathcal{C}^1 sur $]0, +\infty[$ et

$$f' : x \mapsto - \int_0^{+\infty} t \ln(t) e^{-xt} dt$$

On effectue une IPP sur $[a, b]$ pour montrer que $f'(x) = -\frac{1}{x}f(x) + \frac{1}{x^2}$. Ainsi $f : x \mapsto \frac{\ln(x)}{x} + \frac{K}{x}$ où $K = f(1)$.

II.2.7 Exemple

On considère la fonction $\varphi : \begin{cases} \mathbb{R}^+ \times [0, 1] & \rightarrow \mathbb{R} \\ (x, t) & \mapsto \frac{e^{-x^2(1+t^2)}}{1+t^2} \end{cases}$ et $f : x \mapsto \int_0^1 \frac{e^{-x^2(1+t^2)}}{1+t^2} dt$.

Montrons que f est bien définie et de classe \mathcal{C}^1 sur \mathbb{R}^+

- Soit $x \geq 0$ fixé. Alors $\varphi_x : t \mapsto \frac{e^{-x^2(1+t^2)}}{1+t^2}$ est continue sur le segment $[0, 1]$ donc intégrable. Ainsi f est bien définie sur \mathbb{R}^+ .
- Soit $t \in [0, 1]$ fixé. Alors $\varphi_t : x \mapsto \frac{e^{-x^2(1+t^2)}}{1+t^2}$ est bien dérivable par composition (et produit par une constante) et pour $x \geq 0$ on a $\frac{\partial \varphi}{\partial x}(x, t) = -2xe^{-x^2(1+t^2)}$.
- Soit $x \geq 0$ fixé. Alors $t \mapsto 2xe^{-x^2(1+t^2)}$ est bien continue sur $[0, 1]$ par composition (et produit par une constante).

— Soient $a, b \geq 0$ avec $a < b$.

$\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ est continue sur $[a, b] \times [0, 1]$ qui est fermé et borné donc est bornée par une constante $M \in \mathbb{R}^+$ qui est intégrable sur $[0, 1]$.

On a montré que f est \mathcal{C}^1 sur tout segment $[a, b] \subset [0, +\infty[$ (on peut prendre $a = 0$) et donc f est \mathcal{C}^1 sur \mathbb{R}^+ .

De plus, pour $x \geq 0$

$$f'(x) = \int_0^1 -2xe^{-x^2} e^{-x^2 t^2} dt = -2e^{-x^2} \int_0^1 e^{-(xt)^2} x dt = -2e^{-x^2} \int_0^x e^{-u^2} dt$$

Si on pose $g : x \mapsto \int_0^x e^{-t^2} dt$ alors g est la primitive de $t \mapsto e^{-t^2}$ sur \mathbb{R} qui s'annule en 0 et on a $f'(x) = -2g'(x)g(x) = -(g^2)'(x)$.

Ainsi $f = -g^2 + K$ où K est une constante à déterminer. Comme $f(0) = \frac{\pi}{4}$ et $g(0) = 0$, on a $K = \frac{\pi}{4}$.

De plus, $f(x) \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} 0$ car f est positive et vérifie $0 \leq f(x) \leq \int_0^1 e^{-x^2} dt = e^{-x^2}$.

Comme $g(x) \geq 0$ pour $x \geq 0$ on en déduit que $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$.