

236 Illustrer par des exemples quelques méthodes de calcul d'intégrales de fonctions d'une ou plusieurs variables.

I – Méthodes de base pour les fonction d'une variable

1. Primitives

THÉORÈME 1

Fondamental de l'analyse.

Soit $f : [a, b] \rightarrow E$ (où $[a, b] \subseteq \mathbb{R}$ est un segment et E un espace de Banach sur $\mathbb{R}$ ou $\mathbb{C}$).

(i) L'application

$$F : \begin{array}{ll} [a, b] & \rightarrow E \\ x & \mapsto \int_a^x f(t) dt \end{array}$$

est $\mathcal{C}^1$ par morceaux, continue, dérivable à gauche et à droite sur $[a, b]$ telle que

$$F'_g(x) = \lim_{\substack{t \rightarrow x \\ t < x}} f'(t) \text{ et } F'_d(x) = \lim_{\substack{t \rightarrow x \\ t > x}} f'(t)$$

(ii) Si f est continue sur $[a, b]$, F est de classe $\mathcal{C}^1$ sur $[a, b]$ avec $F'(x) = f(x)$ pour tout $x \in [a, b]$.

[GOU20]
p. 127

COROLLAIRE 2

Soit $[a, b] \subseteq \mathbb{R}$ un segment. Toute application continue $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ admet au moins une primitive, et pour toute primitive F de f sur $[a, b]$, on a

$$\int_a^b f(x) dx = [F(x)]_a^b = F(b) - F(a)$$

EXEMPLE 3

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on note $W_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(x)^n dx$. Alors, $W_0 = \frac{\pi}{2}$ et $W_1 = 1$.

PROPOSITION 4

Soit $F \in \mathbb{R}(X)$. Pour intégrer $x \mapsto F(x)$, on fait une décomposition en éléments simples de F , qui nous ramène à calculer des primitives de la forme

$$\int \frac{dx}{(x-a)^h} dx \text{ et } \int \frac{ax+b}{(x^2+cx+d)^h} dx$$

où $h \in \mathbb{N}^*$ et $c-4d < 0$.

p. 137

EXEMPLE 5

$$\int^x \frac{1-x}{(x^2+x+1)^2} dx = \frac{x+1}{x^2+x+1} + \frac{2}{\sqrt{3}} \arctan\left(\frac{2x+1}{\sqrt{3}}\right) + k \text{ avec } k \in \mathbb{R}$$

2. Changement de variable

THÉORÈME 6

Changement de variable.

Soit $[a, b] \subseteq \mathbb{R}$ un segment. Soit $\varphi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ une application de classe $\mathcal{C}^1$ et $f : I \rightarrow E$ où I est un intervalle tel que $\varphi([a, b]) \subseteq I$. Alors,

$$\int_a^b f(\varphi(t)) \varphi'(t) dt = \int_{\varphi(a)}^{\varphi(b)} f(u) du$$

p. 127

EXEMPLE 7

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(\sin(x)) dx = -\frac{\pi \ln(2)}{2}$$

p. 178

PROPOSITION 8

Règle de Bioche.

Soit $R \in \mathbb{R}(X, Y)$. Pour calculer une primitive d'une fonction de la forme $f : x \mapsto R(\sin(x), \cos(x))$, on peut utiliser la règle de Bioche :

- (i) Si $f(x) dx$ reste inchangé en changeant x en $\pi - x$, on pose $t = \sin(x)$.
- (ii) Si $f(x) dx$ reste inchangé en changeant x en $-x$, on pose $t = \cos(x)$.
- (iii) Si $f(x) dx$ reste inchangé en changeant x en $\pi + x$, on pose $t = \tan(x)$.

p. 139

EXEMPLE 9

$$\int^u \frac{\sin(x)^3}{1 + \cos(x)^2} dx \stackrel{t=\cos(x)}{=} \int^{\cos(u)} \frac{1-t^2}{1+t^2} (-dt) = \cos(u) - 2 \arctan(\cos(u)) + k \text{ avec } k \in \mathbb{R}$$

3. Intégration par parties

THÉORÈME 10

Intégration par parties.

Soit $[a, b] \subseteq \mathbb{R}$ un segment. Soient $u, v : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ deux fonctions de classe $\mathcal{C}^1$. Alors,

$$\int_a^b u(x)v'(x) dx = [u(x)v(x)]_a^b - \int_a^b u'(x)v(x) dx$$

p. 127

EXEMPLE 11

Fonction Γ d'Euler.

On pose

$$\forall x > 0, \Gamma(x) = \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$$

Alors,

$$\forall x > 0, \Gamma(x+1) = x\Gamma(x)$$

et en particulier, $\forall n \in \mathbb{N}, \Gamma(n) = n!$.

p. 162

EXEMPLE 12

Intégrales de Wallis.

En reprenant l'Exemple 3, on a

$$\forall p \in \mathbb{N}^*, W_{2p} = \frac{(2p-1)(2p-3)\dots 1}{2p(2p-2)\dots 2} \frac{\pi}{2} \text{ et } W_{2p+1} = \frac{2p(2p-2)\dots 2}{(2p-1)(2p-3)\dots 1}$$

p. 130

APPLICATION 13

Intégrale de Gauss.

$$I = \int_0^{+\infty} e^{-t^2} dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

p. 167

II – Méthodes pour les fonctions de plusieurs variables

1. Intégration sur un espace produit

THÉORÈME 14

Théorème de Fubini-Tonelli.

Soient $(X, \mathcal{A}, \mu)$ et $(Y, \mathcal{B}, \nu)$ deux espaces mesurés et $f : (X \times Y) \rightarrow \overline{\mathbb{R}^+}$. On suppose μ et ν σ -finies. Alors :

(i) $x \mapsto \int_Y f(x, y) d\nu(y)$ et $y \mapsto \int_X f(x, y) d\mu(x)$ sont mesurables.

(ii) Dans $\overline{\mathbb{R}^+}$,

$$\int_{X \times Y} f d(\mu \otimes \nu) = \int_X \left(\int_Y f(x, y) d\nu(y) \right) d\mu(x) = \int_Y \left(\int_X f(x, y) d\mu(x) \right) d\nu(y)$$

[B-P]
p. 237

THÉORÈME 15

Théorème de Fubini-Lebesgue.

Soient $(X, \mathcal{A}, \mu)$ et $(Y, \mathcal{B}, \nu)$ deux espaces mesurés et $f \in \mathcal{L}_1(\mu \otimes \nu)$. Alors :

(i) Pour tout $y \in Y$, $x \mapsto f(x, y)$ et pour tout $x \in X$, $y \mapsto f(x, y)$ sont intégrables.

(ii) $x \mapsto \int_Y f(x, y) d\nu(y)$ et $y \mapsto \int_X f(x, y) d\mu(x)$ sont intégrables, les fonctions étant définies pp.

(iii) On a :

$$\int_{X \times Y} f d(\mu \otimes \nu) = \int_X \left(\int_Y f(x, y) d\nu(y) \right) d\mu(x) = \int_Y \left(\int_X f(x, y) d\mu(x) \right) d\nu(y)$$

CONTRE-EXEMPLE 16

On considère $f : (x, y) \mapsto 2e^{-2xy} - e^{-xy}$. Alors, $\int_{[0,1]} \left(\int_{\mathbb{R}^+} f(x, y) dx \right) dy = 0$, mais $\int_{\mathbb{R}^+} \left(\int_{[0,1]} f(x, y) dy \right) dx = \ln(2)$.

EXEMPLE 17

Soient $f : (x, y) \mapsto xy$ et $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x, y \geq 0 \text{ et } x + y \leq 1\}$. Alors,

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_0^1 x \frac{(1-x)^2}{2} dx = \frac{1}{24}$$

[GOU20]
p. 359

2. Changement de variable généralisé

THÉORÈME 18

Soient U un ouvert de $\mathbb{R}^n$ et $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ un $\mathcal{C}^1$ -difféomorphisme. On pose $V = \varphi(U)$. Alors V est un ouvert de $\mathbb{R}^n$. De plus, pour toute fonction mesurable $f : V \rightarrow \mathbb{R}$, on a

$$f \in L^1(V) \iff (y \mapsto f(\varphi(y)) |\det \text{Jac } \varphi(y)|) \in L^1(U).$$

Dans ce cas,

$$\int_V f(x) dx = \int_U f(\varphi(y)) |\det \text{Jac } \varphi(y)| dy.$$

[BMP]
p. 9

EXEMPLE 19

Coordonnées polaires.

L'application

$$\begin{aligned} \mathbb{R}^+ \times [0, 2\pi] &\rightarrow \mathbb{R} \times \mathbb{R} \\ (r, \theta) &\mapsto (r \cos(\theta), r \sin(\theta)) \end{aligned}$$

est un difféomorphisme de classe $\mathcal{C}^1$ donc le jacobien en $(r, \theta) \in \mathbb{R}^+ \times [0, 2\pi]$ vaut r .

[GOU20]
p. 355

EXEMPLE 20

Coordonnées sphériques.

L'application

$$\begin{aligned} \mathbb{R}^+ \times [0, 2\pi] \times \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] &\rightarrow \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \\ (r, \theta, \varphi) &\mapsto (r \cos(\varphi) \cos(\theta), r \cos(\varphi) \sin(\theta), r \sin(\varphi)) \end{aligned}$$

est un difféomorphisme de classe $\mathcal{C}^1$ donc le jacobien en $(r, \theta, \varphi) \in \mathbb{R}^+ \times [0, 2\pi] \times \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ vaut $r^2 \cos(\varphi)$.

APPLICATION 21

Intégrale de Gauss.

En passant en coordonnées polaires,

$$\int_{\mathbb{R}} e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi}$$

III – Utilisation des théorèmes d'intégration

Soit $(X, \mathcal{A}, \mu)$ et $(Y, \mathcal{B}, \nu)$ un espace mesuré.

1. Convergence dominée

THÉORÈME 22

Convergence dominée.

Soit (f_n) une suite d'éléments de $\mathcal{L}_1$ telle que :

- (i) pp. en x , $(f_n(x))$ converge dans $\mathbb{K}$ vers $f(x)$.
- (ii) $\exists g \in \mathcal{L}_1$ positive telle que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \text{ pp. en } x, |f_n(x)| \leq g(x)$$

Alors,

$$\int_X f \, d\mu = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_X f_n \, d\mu \text{ et } \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_X |f_n - f| \, d\mu = 0$$

[B-P]
p. 140

EXEMPLE 23

Soit $\alpha > 1$. On pose $\forall n \geq 1$, $I_n(\alpha) = \int_0^n \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n e^{-\alpha x} \, dx$. Alors,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} I_n(\alpha) = \int_0^{+\infty} e^{(1-\alpha)x} \, dx = \frac{1}{\alpha - 1}$$

EXEMPLE 24

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^{+\infty} \frac{x^n}{x^{2n} + 1} \, dx = 0$$

[AMR11]
p. 156

EXEMPLE 25

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{3n+1} = \int_0^1 \frac{dx}{x^3+1} = \frac{3\ln(2) + \sqrt{3}\pi}{9}$$

[G-K]
p. 104

2. Régularité sous l'intégrale

Soit $f : E \times X \rightarrow \mathbb{C}$ où (E, d) est un espace métrique. On pose $F : t \mapsto \int_X f(t, x) d\mu(x)$.

[Z-Q]
p. 312

THÉORÈME 26

Continuité sous le signe intégral.

On suppose :

- (i) $\forall t \in E, x \mapsto f(t, x)$ est mesurable.
- (ii) pp. en $x \in X, t \mapsto f(t, x)$ est continue en $t_0 \in E$.
- (iii) $\exists g \in L_1(X)$ positive telle que

$$|f(t, x)| \leq g(x) \quad \forall t \in E, \text{ pp. en } x \in X$$

Alors F est continue en t_0 .

EXEMPLE 27

La fonction Γ de l'Exemple 11 est bien définie et continue sur $\mathbb{R}_*^+$.

p. 318

On suppose maintenant que E est un intervalle I ouvert de $\mathbb{R}$.

p. 313

THÉORÈME 28

Dérivation sous le signe intégral.

On suppose :

- (i) $\forall t \in I, x \mapsto f(t, x) \in L_1(X)$.
- (ii) pp. en $x \in X, t \mapsto f(t, x)$ est dérivable sur I . On notera $\frac{\partial f}{\partial t}$ cette dérivée définie presque partout.
- (iii) $\forall K \subseteq I$ compact, $\exists g_K \in L_1(X)$ positive telle que

$$\left| \frac{\partial f}{\partial t}(t, x) \right| \leq g_K(x) \quad \forall t \in K, \text{ pp. en } x$$

Alors $\forall t \in I, x \mapsto \frac{\partial f}{\partial t}(t, x) \in L_1(X)$ et F est dérivable sur I avec

$$\forall t \in I, F'(t) = \int_X \frac{\partial f}{\partial t}(t, x) d\mu(x)$$

APPLICATION 29

Transformée de Fourier d'une Gaussienne.

En résolvant une équation différentielle linéaire, on a

$$\forall \alpha > 0, \forall x \in \mathbb{R}, \int_{\mathbb{R}} e^{-\alpha t^2} e^{-itx} dt = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{-\frac{x^2}{4\alpha}}$$

[GOU20]
p. 169

DEV

APPLICATION 30

Intégrale de Dirichlet.On pose $\forall x \geq 0$,

$$F(x) = \int_0^{+\infty} \frac{\sin(t)}{t} e^{-xt} dt$$

alors :

- (i) F est bien définie et est continue sur $\mathbb{R}^+$.
- (ii) F est dérivable sur $\mathbb{R}_*^+$ et $\forall x \in \mathbb{R}_*^+, F'(x) = -\frac{1}{1+x^2}$.
- (iii) $F(0) = \int_0^{+\infty} \frac{\sin(t)}{t} dt = \frac{\pi}{2}$.

[G-K]
p. 107

IV – Utilisation de l'analyse complexe

1. Formule intégrale de Cauchy

Soit Ω un ouvert de $\mathbb{C}$. Soit $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$.[QUE]
p. 134

THÉORÈME 31

Cauchy homologique.Soit Γ un cycle homologue à zéro dans Ω (ie. tel que $a \notin \Omega \implies I(a, \Gamma) = 0$). On suppose $f \in \mathcal{H}(\Omega)$. Alors,

$$\int_{\Gamma} f(z) dz = 0$$

COROLLAIRE 32

Formule intégrale de Cauchy.Soit Γ un cycle homologue à zéro dans Ω . On suppose $f \in \mathcal{H}(\Omega)$. Alors,

$$z_0 \in \Omega \setminus \Gamma^* \implies \frac{1}{2i\pi} \int_{\Gamma} \frac{f(z)}{z - z_0} dz = I(z_0, \Gamma) f(z_0)$$

COROLLAIRE 33

On a $\mathcal{H}(\Omega) \subseteq \mathcal{A}(\Omega)$. De plus, si $a \in \Omega$ et si $r \in]0, d(a, \mathbb{C} \setminus \Omega)[$, on a

$$f(a+h) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n h^n \text{ pour } |h| < r \text{ avec } a_n = \frac{f^{(n)}(a)}{n!} = \frac{1}{2i\pi} \int_{C^+(a,r)} \frac{f(z)}{(z-a)^{n+1}} dz$$

p. 85

[BMP]
p. 64

DEV

APPLICATION 34

Transformée de Fourier d'une gaussienne.

On définit $\forall a \in \mathbb{R}_*^+$,

$$\gamma_a : \begin{array}{ccc} \mathbb{R} & \rightarrow & \mathbb{R} \\ x & \mapsto & e^{-ax^2} \end{array}$$

Alors,

$$\forall \xi \in \mathbb{R}, \widehat{\gamma_a}(\xi) = \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{-\frac{\xi^2}{4a}}$$

[AMR08]
p. 156

2. Théorème des résidus

THÉORÈME 35

des résidus.

On suppose f méromorphe sur Ω et on note A l'ensemble de ses pôles. Soit γ une courbe homologue à zéro dans Ω et ne rencontrant pas A . Alors,

$$\int_{\gamma} f(z) dz = 2i\pi \sum_{a \in A} I(a, \gamma) \operatorname{Res}(f, a)$$

[QUE]
p. 169

EXEMPLE 36

$$\int_0^{2\pi} \frac{1}{3 + 2 \cos(t)} dt = \frac{2\pi}{\sqrt{5}}$$

p. 173

EXEMPLE 37

Intégrale de Dirichlet.

$$\int_0^{+\infty} \frac{\sin(x)}{x} dx = \frac{\pi}{2}$$

V – Calcul approché d'intégrales

Soit f une fonction réelle continue sur un intervalle $[a, b]$. On se donne $n + 1$ points $x_0, \dots, x_n \in [a, b]$ distincts deux-à-deux.

[DEM]
p. 21

DÉFINITION 38

Pour $i \in \llbracket 0, n \rrbracket$, on définit le i -ième **polynôme de Lagrange** associé à $x_0, \dots, x_n$ par

$$\ell_i : x \mapsto \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}$$

THÉORÈME 39

Il existe une unique fonction polynomiale p_n de degré inférieur ou égal à n telle que $\forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket, p_n(x_i) = f(x_i)$:

$$p_n = \sum_{i=0}^n f(x_i) \ell_i$$

THÉORÈME 40

On note $\pi_{n+1} : x \mapsto \prod_{j=0}^n (x - x_j)$ et on suppose f $n + 1$ fois dérivable $[a, b]$. Alors, pour tout $x \in [a, b]$, il existe un réel $\xi_x \in]\min(x, x_0, \dots, x_n), \max(x, x_0, \dots, x_n)[$ tel que

$$f(x) - p_n(x) = \frac{\pi_{n+1}(x)}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\xi_x)$$

COROLLAIRE 41

$$\|f - p_n\|_{\infty} \leq \frac{1}{(n+1)!} \|\pi_{n+1}\|_{\infty} \|f^{(n+1)}\|_{\infty}$$

APPLICATION 42

Calculs approchés d'intégrales.

On note $I(f) = \int_a^b f(t) dt$. L'objectif est d'approximer $I(f)$ par une expression $P(f)$ et de majorer l'erreur d'approximation $E(f) = |I(f) - P(f)|$.

(i) Méthode des rectangles. On suppose f continue. Avec $P(f) = (b-a)f(a)$, on a $E(f) \leq \frac{(b-a)^2}{2} \|f'\|_{\infty}$.

(ii) Méthode du point milieu. On suppose f de classe $\mathcal{C}^2$. Avec $P(f) = (b-a)f\left(\frac{a+b}{2}\right)$, on a $E(f) \leq \frac{(b-a)^3}{24} \|f''\|_{\infty}$.

(iii) Méthode des trapèzes. On suppose f de classe $\mathcal{C}^2$. Avec $P(f) = \frac{b-a}{2}(f(a) + f(b))$, on a $E(f) \leq \frac{(b-a)^3}{12} \|f''\|_{\infty}$.

(iv) Méthode de Simpson. On suppose f de classe $\mathcal{C}^4$. Avec $P(f) = \frac{b-a}{6}(f(a) + f(b) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right))$, on a $E(f) \leq \frac{(b-a)^5}{2880} \|f^{(4)}\|_{\infty}$.

[DAN]
p. 506