

L'intégration numérique par la méthode double-exponentielle

Pascal Molin

30 novembre 2016

Résumé

On propose une théorie complète de l'intégration numérique par la méthode double-exponentielle, en démontrant un certain nombre de théorèmes de convergence explicites permettant d'intégrer rigoureusement et à grande précision une large classe de fonctions, sous des hypothèses de régularité minimales.

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Formule de Poisson	2
1.2	Méthode double-exponentielle	4
1.3	Extensions et exemples	5
1.4	Fonctions L	6
1.5	Historique	6
1.6	Quelques notations	6
2	Formule des trapèzes	8
2.1	Complexité d'intégration	8
2.2	Régularité et décroissance	10
2.3	Décroissance des fonctions holomorphes	11
2.4	Énoncé du théorème double-exponentiel	14
2.5	Optimalité du principe double-exponentiel	17
2.6	Cas des fonctions méromorphes	20
3	Application à l'intégration sur divers domaines	21
3.1	Droite réelle	22
3.2	Demi-droite	27
3.3	Intervalle compact	30
3.4	Hypothèses affaiblies	34
3.5	Cas des fonctions oscillantes quasi-périodiques	36

4 Stratégies d'application concrète	38
4.1 En résumé	38
4.2 Prendre en compte les résidus	39
4.3 Décaler le chemin	39
4.4 Subdivisions	42
4.5 Exemple : fonction gamma incomplète	42
5 Conclusion	44
5.1 Implantation	45
6 Formulaire	45

1 Introduction

La méthode «double-exponentielle» fournit des formules très simples permettant d'évaluer numériquement des intégrales à grande précision. À titre d'exemple, pour l'intégration sur un segment, le théorème 3.10 de cet article peut se spécialiser de la manière suivante :

Théorème 1.1. *Si f est une fonction définie sur $[-1, 1]$, holomorphe sur $D(0, 2) = \{z \in \mathbb{C}, |z| < 2\}$, alors pour tout $n \geq 1$*

$$\left| \int_{-1}^1 f(x) dx - \sum_{k=-n}^n a_k f(x_k) \right| \leq \left(e^4 \sup_{D(0,2)} |f| \right) \exp \left(-\frac{5n}{\log(5n)} \right)$$

avec $h = \frac{\log(5n)}{n}$, $a_k = \frac{h \cosh(kh)}{\cosh(\sinh(kh))^2}$ et $x_k = \tanh(\sinh(kh))$.

Il s'agit d'une convergence exceptionnellement bonne, à comparer avec les estimations de convergence d'ordre polynomial des méthodes de quadrature classiques (des trapèzes, de Simpson). De surcroît, les estimations de convergence sont aisées à obtenir et la méthode se programme très simplement ; elle ne requiert en particulier aucune phase de précalculs coûteux, comme ce peut être le cas pour des méthodes de type Gauss.

1.1 Formule de Poisson

L'intégration double-exponentielle peut être vue comme une tentative d'exploiter de manière optimale la formule de Poisson à des fins d'intégration numérique.

En effet, la formule de Poisson décrit très précisément l'erreur de quadrature commise en appliquant la méthode des trapèzes sur \mathbb{R} . Dans tout ce qui suit, g désigne une fonction de la classe de Schwartz des fonctions \mathcal{C}^∞ à décroissance rapide, de sorte que sa transformée de Fourier

$$\hat{g}(x) = \int_{\mathbb{R}} e^{-2i\pi xt} g(t) dt \tag{1}$$

est également dans la classe de Schwartz. On a alors [IK04, th 4.4]

Proposition 1.2 (formule de Poisson). *Pour tout $h > 0$,*

$$h \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(kh) = \int_{\mathbb{R}} g(t) dt + \sum_{k \in \mathbb{Z}^*} \hat{g}\left(\frac{k}{h}\right), \quad (2)$$

En particulier, si g est à spectre fini, la somme de droite peut disparaître et l'on obtient une sommation exacte.

Proposition 1.3 (formule sommatoire de Poisson). *Soit g telle que $\hat{g}(x)$ est à support compact $[-B, B]$. Alors pour tout $h < 1/B$,*

$$\int_{\mathbb{R}} g(t) dt = h \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(kh). \quad (3)$$

Remarque : Ces formules s'étendent à un cadre de fonctions L^2 plus général que la classe de Schwartz dont nous n'aurons pas besoin. Notons toutefois qu'en considérant la fonction $g(t) = \frac{\sin(t)}{t}$ dont la transformée de Fourier est le créneau $\hat{g}(x) = \mathbb{1}_{[-2\pi, 2\pi]}$, la formule sommatoire de Poisson explique le fait amusant que $\int_{\mathbb{R}} \frac{\sin(mt)}{t} dt = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \frac{\sin(mk)}{k}$ pour $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, l'égalité devenant fautive pour $m > 2\pi$.

Ce résultat n'est toutefois pas satisfaisant pour l'intégration numérique, en effet l'exactitude de la discrétisation se paie par la lente décroissance de $g(t)$, et donc l'impossibilité de calculer $h \sum g(kh)$ efficacement¹.

Notre but pour l'intégration numérique est de rechercher les couples $g(t), \hat{g}(t)$ pour lesquels l'équation (2) fournisse, après troncature des deux membres à une certaine précision, un nombre de points minimum.

Plus précisément, définissons l'erreur de quadrature

$$e_q(g, h) = \sum_{k \in \mathbb{Z}^*} \left| \hat{g}\left(\frac{k}{h}\right) \right| \quad (4)$$

et l'erreur de troncature

$$e_t(g, n, h) = \sum_{|k| > n} |hg(kh)|. \quad (5)$$

L'intégration numérique par la formule des trapèzes sur \mathbb{R} s'écrit alors

$$\int_{\mathbb{R}} g = h \sum_{k=-n}^n g(kh) + \varepsilon \quad (6)$$

avec une erreur

$$|\varepsilon| \leq e(g, n, h) = e_q(g, h) + e_t(g, n, h). \quad (7)$$

1. La section 3.5 apporte par la suite une réponse à ce problème.

On mesure la complexité d'une intégration à précision absolue D par le nombre d'évaluations nécessaires pour contrôler les erreurs de quadrature et de troncature :

$$n(g, D) = \min \left\{ n, \exists h > 0, e(g, n, h) \leq e^{-D} \right\}. \quad (8)$$

Dans l'exemple $g(t) = \sin(t)/t$, on obtient une complexité exponentielle $n(g, D) \sim \exp(D)$.

Donnons deux autres exemples pour avoir une vue d'ensemble : le cas optimal (théorème 2.18) est donné par la gaussienne $g(t) = \exp(-\sigma t^2)$, qui est sa propre transformée de Fourier. Dans ce cas la formule de Poisson est la plus équilibrée, et la complexité $n(g, D) \sim D$ est linéaire (proposition 2.1).

Toutefois, ce cas ne se produit que pour des fonctions extrêmement régulières, et l'on démontre en section 2.5.2 :

Théorème 1.4. *Si g est non-nulle, alors $n(g, D) \geq \frac{D}{\pi}$. Si de plus g n'est pas entière, alors \hat{g} a une décroissance au plus exponentielle et $n(g, D) \notin O(D)$.*

Ainsi, pour intégrer des fonctions présentant des singularités, c'est du côté de g qu'il faut chercher la décroissance.

Le second exemple type est la fonction $g(t) = e^{-\alpha \cosh(t)}$, dont la transformée de Fourier est la fonction de Bessel $\hat{g}(x) = 2K_{i2\pi x}(\alpha)$ (on a en effet par définition $K_\nu(\alpha) = \int_0^\infty e^{-\alpha \cosh(t)} \cosh(\nu t) dt$). Dans ce cas, $|\hat{g}(x)| \sim 2 \frac{e^{-\pi^2 x}}{\sqrt{x}}$ et l'intégration se fait en complexité quasi-linéaire $n(g, D) \sim D \log D$.

C'est cet exemple qui offre la plus grande généralité. Notre but est en effet de démontrer le théorème 2.12, qui est une version explicite du résultat suivant

Théorème 1.5. *Soit $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ telle que*

1. $|g(x)| \leq M_1 e^{-\alpha e^{\beta|x|}}$ sur \mathbb{R} , pour $\alpha, \beta > 0$;
2. g possède un prolongement holomorphe borné à une bande $\Delta_\tau = \mathbb{R} + i] - \tau, \tau[$, alors \hat{g} a décroissance exponentielle et $n(g, D) = O(D \log D)$.

La première hypothèse du théorème est l'hypothèse double-exponentielle, qui permet de contrôler la quadrature. La seconde est l'hypothèse de régularité, qui équivaut ici à ce que $\hat{g}(x)$ ait décroissance exponentielle. Le lien entre régularité de g et décroissance de \hat{g} est étudié dans la section 2.2.

1.2 Méthode double-exponentielle

La «méthode d'intégration» double exponentielle consiste, pour des fonctions définies sur un intervalle I et ayant des hypothèse de régularité données au voisinage de I , à se ramener au théorème ci-dessus à l'aide d'un changement de variable.

En pratique, un certain nombre de changements de variables standard (table 1) permettent d'obtenir facilement l'hypothèse de décroissance 1. Pour que la

TABLE 1: changements de variables double-exponentiels

intervalle	type de décroissance	changement de variable	
\mathbb{R}	$O(e^{-\alpha x })$	$x \mapsto \sinh(x)$	théorème 3.3
\mathbb{R}	$O(x^{-\alpha})$	$x \mapsto \sinh(\sinh(x))$	théorème 3.5
$]0, \infty[$	$O(e^{-\alpha x})$	$x \mapsto \exp(x - \exp(-x))$	théorème 3.7
$]0, \infty[$	$O(x^{-\alpha})$	$x \mapsto \exp(\sinh(x))$	
$[-1, 1]$	$O(1)$	$x \mapsto \tanh(\sinh(x))$	théorème 3.10

méthode soit rigoureuse, il faut réussir à contrôler l'impact de ces changements de variable sur l'hypothèse de régularité 2.

C'est ce que nous faisons de manière systématique dans la section 3, en fournissant une liste de recettes prêtes à l'emploi pour intégrer de larges classes de fonctions.

1.3 Extensions et exemples

On propose également un certain nombre d'extensions de la théorie : aux fonctions méromorphes tout d'abord, qui peuvent être intégrées de la même manière sous réserve d'apporter un terme correctif correspondant aux pôles (lemme 2.21). Un certain nombre de fonctions spéciales peuvent se calculer de cette manière, par exemple la fonction d'erreur [Mol].

On donne aussi une interprétation de la méthode d'Ooura [OM99], dans le cas de fonctions oscillantes.

Enfin cet article est l'occasion de donner un certain nombre d'exemples d'applications concrètes de la méthode, dans la section 4. Nous présentons quelques transformations et stratégies complémentaires qui permettent d'améliorer l'intégration dans des cas de non-application des théorèmes principaux. De plus amples illustrations sont disponibles sur [Mol10b]. Un exemple complet est traité pour finir, l'évaluation de la fonction gamma incomplète dans le domaine complexe, où l'on démontre

Théorème 1.6. *Pour tout $s \in \mathbb{C}$, et tout $x \notin \mathbb{R}_-$, la méthode double-exponentielle permet de calculer*

$$\Gamma_{\text{inc}}(s, x) = \int_x^\infty t^{s-1} e^{-t} dt \quad (9)$$

à précision relative D avec

$$\frac{D \log D}{\pi^2} + o(D \log D)$$

évaluations d'exponentielles en précision $D + O(\log D)$.

1.4 Fonctions L

L'étude présentée ici est issue de la thèse de l'auteur [Mol10a], où l'intégration double-exponentielle est employée pour obtenir des stratégies de calcul de valeurs de fonctions L générales, avec une complexité prouvée. Nous n'avons pas jugé opportun d'inclure ces applications ici, et nous nous contentons d'évoquer les deux directions principales d'application de ce travail à ce domaine :

- la transformée de Fourier d'une fonction L (complétée) sur sa droite critique est naturellement une fonction à décroissance doublement exponentielle, si bien que le théorème 2.12 fournit directement par inversion de Fourier une stratégie de calcul efficace et rigoureux dans le cas de facteurs gamma qui sont transformées de Mellin de fonctions calculables.
- la transformée de Mellin inverse d'une fonction L est une intégrale de fonction méromorphe satisfaisant les hypothèse du théorème 2.22, ce qui fournit un algorithme également très efficace, et dont l'avantage principal est d'autoriser l'introduction de fonctions test.

1.5 Historique

Le principe des changements de variables «double-exponentiels» est apparu d'abord de manière assez heuristique dans [TM73] et a été étudié plus en détail dans [Sug97].

D'un point de vue pratique, la méthode obtenue est remarquable. Elle fait partie des routines d'intégration numériques de Maple ou Mathematica, et sous-tend la routine d'intégration `intnum` de PARI/gp. Un certain nombre de travaux ont accompagné ce succès : les deux articles cités ci-dessus visaient surtout à justifier l'optimalité de l'approche double-exponentielle, notons également [TSM09] qui explore plus avant la validité de l'approche double-exponentielle.

1.6 Quelques notations

On rappelle que g désigne une fonction $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ de la classe de Schwartz, dont on calcule l'intégrale par la méthode des trapèzes ; pour tout réel $\tau > 0$ on note $\Delta_\tau = \mathbb{R} + i] - \tau, \tau[$ la bande complexe de largeur τ autour de l'axe réel, et $\Delta_\tau^+ = \mathbb{R}_+ + i] - \tau, \tau[$ la demi-bande positive ; lorsque g possède un prolongement holomorphe à une bande Δ_τ , on désignera par g ce prolongement et on dira que g est définie sur Δ_τ .

On introduit la notation

$$a(D) \ll b(D) \Leftrightarrow \limsup_{D \rightarrow \infty} \frac{b(D)}{a(D)} \leq 1. \quad (10)$$

1.6.1 Restes intégraux

La théorie présentée ici fait intervenir de nombreuses estimations de restes intégraux. Pour rendre les énoncés aussi explicites que possible nous en donnons des majorations en termes de fonctions élémentaires. En pratique on peut

obtenir des estimations plus précises par un calcul numérique. On introduit ici les quelques grands types de restes rencontrés

Soient $\alpha, \beta > 0$ et $\lambda \in \mathbb{R}$, pour $X > 0$ on pose

$$R_\lambda^{\alpha, \beta}(X) = \int_X^\infty e^{\lambda x - \alpha e^{\beta x}} dx. \quad (11)$$

Soient de plus $A, \gamma > 0$ avec $\gamma < \beta$, on pose

$$I_{\lambda, A, \gamma}^{\alpha, \beta} = \int_0^\infty e^{\lambda x + A e^{\gamma x} - \alpha e^{\beta x}} dx \quad (12)$$

Lemme 1.7 (fonction gamma incomplète). Soient a, x tels que $x > a > 0$,

$$\Gamma_{\text{inc}}(1 + a, x) \leq \frac{x^{1+a} e^{-x}}{x - a} \quad (13)$$

Démonstration : Par intégration par parties $\Gamma_{\text{inc}}(a + 1, x) = a\Gamma_{\text{inc}}(a, x) + x^a e^{-x}$, et on peut majorer $x\Gamma_{\text{inc}}(a, x) \leq \Gamma_{\text{inc}}(a + 1, x)$. \square

Lemme 1.8. Avec les notations précédentes, on a

$$R_\lambda^{\alpha, \beta}(X) = (\beta \alpha^{\frac{\gamma}{\beta}})^{-1} \Gamma_{\text{inc}}\left(\frac{\gamma}{\beta}, \alpha e^{\beta X}\right) \quad (14)$$

et si $\lambda = 0$,

$$R_0^{\alpha, \beta}(X) \leq \frac{e^{-\alpha e^{\beta X}}}{\alpha \beta e^{\beta X}}. \quad (15)$$

Démonstration : la première égalité s'obtient par changement de variable, la seconde en complétant la dérivée $\int_X^\infty e^{-\alpha e^{\beta x}} dx \leq \frac{1}{\alpha \beta e^{\beta X}} \int_X^\infty \alpha \beta e^{\beta x} e^{-\alpha e^{\beta x}} dx$. \square

Lemme 1.9. Avec les notations précédentes, on a

$$I_{\lambda, A, \gamma}^{\alpha, \beta} \leq \left(\frac{\lambda + 1 + A\gamma}{\alpha \beta} \right)^{\frac{\lambda+1}{\beta-\gamma}} \exp \left[A \left(\frac{\lambda + 1 + A\gamma}{\alpha \beta} \right)^{\frac{\gamma}{\beta-\gamma}} - \alpha \left(\frac{A\gamma}{\alpha \beta} \right)^{\frac{\beta}{\beta-\gamma}} \right] \quad (16)$$

et si $A = 0$,

$$R_\lambda^{\alpha, \beta}(0) = \int_0^\infty e^{\lambda x - \alpha e^{\beta x}} dx \leq \left(\frac{\lambda + 1}{\alpha \beta e} \right)^{\frac{\lambda+1}{\beta}}. \quad (17)$$

Démonstration : En sortant $\int_0^\infty e^{-x} dx = 1$, on majore l'intégrale par $\sup e^{(\lambda+1)x + A e^{\gamma x} - \alpha e^{\beta x}}$, lequel est obtenu pour $\frac{(\lambda+1)e^{-\gamma x} + A\gamma}{\alpha \beta} = e^{(\beta-\gamma)x}$. Avec l'encadrement $0 < e^{-\gamma x} < 1$ on obtient le premier résultat. Le second correspond à $e^{-\gamma x} = 1$. \square

Enfin, lorsqu'il s'agit de contrôler exactement le reste, on introduit la fonction implicite suivante pour des valeurs α, β et D strictement positives

$$L_\lambda^{\alpha, \beta}(D) = \inf \left\{ X, \int_X^\infty e^{-\alpha x^\beta} dx \leq e^{-D} \right\} \sim \left(\frac{D}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (18)$$

2 Formule des trapèzes

2.1 Complexité d'intégration

On mesure la complexité d'une intégration à précision D via le nombre d'évaluations nécessaires $n(g, D)$ défini en (8).

Si $n(g, D) \in O(D)$, on dit que le procédé a une complexité linéaire, quand $n(g, D) \in O(D \log D)$ elle est dite quasi-linéaire, et quand $n(g, D) \in O(D^\alpha)$, $\alpha > 1$, on la qualifie de polynomiale.

Décroissance simplement exponentielle

Proposition 2.1. *Supposons que g vérifie*

$$|g(x)| \leq M_1 e^{-\alpha_1 |x|^{\beta_1}} \quad (19)$$

$$|\hat{g}(x)| \leq M_2 e^{-\alpha_2 |x|^{\beta_2}}. \quad (20)$$

pour $x \in \mathbb{R}$ et des constantes $M_i, \alpha_i > 0$ et $\beta_i \geq 1$. Alors la méthode des trapèzes a une complexité

$$n(g, D) \ll \frac{D^{\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}}}{\alpha_1^{\frac{1}{\beta_1}} \alpha_2^{\frac{1}{\beta_2}}}, \quad (21)$$

que l'on réalise avec les paramètres

$$nh \geq \max \left(\left(\frac{D + \log\left(\frac{4M_1}{\alpha_1 \beta_1}\right)}{\alpha_1} \right)^{1/\beta_1}, 1 \right)$$

$$\frac{1}{h} \geq \left(\frac{D + \log(4M_2 + e^{-D})}{\alpha_2} \right)^{1/\beta_2}.$$

Démonstration : — Sous ces hypothèses l'erreur de troncature vérifie

$$\begin{aligned} \left| h \sum_{k=n+1}^{\infty} g(kh) \right| &\leq M_1 h \sum_{k=n+1}^{\infty} e^{-\alpha_1 (kh)^{\beta_1}} \\ &\leq M_1 h \int_n^{\infty} e^{-\alpha_1 (th)^{\beta_1}} dt \\ &\leq \frac{M_1}{\alpha_1 \beta_1 (nh)^{\beta_1 - 1}} \int_{nh}^{\infty} \alpha_1 \beta_1 u^{\beta_1 - 1} e^{-\alpha_1 u^{\beta_1}} du \quad (\text{car } \beta_1 \geq 1) \\ &\leq \frac{M_1}{\alpha_1 \beta_1} e^{-\alpha_1 (nh)^{\beta_1}} \quad \text{si } n \geq 1, \end{aligned}$$

la même estimation valant pour $k < -n$, si bien que résoudre

$$\left| h \sum_{|k|>n} g(kh) \right| \leq \frac{2M_1}{\alpha_1 \beta_1} e^{-\alpha_1 (nh)^{\beta_1}} \leq \frac{e^{-D}}{2}$$

donne la condition annoncée.

— si $\beta_2 \geq 1$, alors $e^{-\alpha_2 (\frac{k}{h})^{\beta_2}} \leq e^{-\alpha_2 \frac{k}{h^{\beta_2}}}$, et l'erreur de quadrature est majorée par la série géométrique :

$$\sum_{k \neq 0} \left| \hat{g}\left(\frac{k}{h}\right) \right| \leq 2 \sum_{k \geq 1} M_2 e^{-\alpha_2 \frac{k}{h^{\beta_2}}} = \frac{2M_2}{e^{\frac{\alpha_2}{h^{\beta_2}}} - 1} \quad (22)$$

qui donne immédiatement la condition sur h . \square

Pour avoir une bonne convergence, l'important est donc de minimiser la moyenne $\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}$.

Décroissance doublement exponentielle Anticipant sur la proposition 2.19, nous considérons uniquement $\beta_2 = 1$ dans ce paragraphe, sans perte de généralité.

Proposition 2.2 (DE). *Supposons que g vérifie*

$$|g(x)| \leq M_1 e^{-\alpha_1 e^{\beta_1 |x|}} \quad (23)$$

$$|\hat{g}(x)| \leq M_2 e^{-\alpha_2 |x|} \quad (24)$$

pour $x \in \mathbb{R}$ et des constantes $M_i, \alpha_i > 0$ et $\beta_1 \geq 1$. Alors la méthode des trapèzes a une complexité

$$n(g, D) \ll \frac{D \log(D)}{\beta_1 \alpha_2} \quad (25)$$

que l'on réalise avec les paramètres

$$\begin{aligned} nh &\geq \frac{\log(D + \log(\frac{4M_1}{\alpha_1 \beta_1}))}{\beta_1} \\ \frac{1}{h} &\geq \frac{D + \log(4M_2 + e^{-D})}{\alpha_2}. \end{aligned}$$

Démonstration : Comme précédemment on majore

$$\begin{aligned} \left| h \sum_{k=n+1}^{\infty} g(kh) \right| &\leq M_1 h \sum_{k=n+1}^{\infty} e^{-\alpha_1 e^{\beta_1 kh}} \\ &\leq M_1 h \int_n^{\infty} e^{-\alpha_1 e^{\beta_1 xh}} dx \\ &\leq \frac{M_1}{\alpha_1 \beta_1 e^{\beta_1 nh}} e^{-\alpha_1 e^{\beta_1 nh}} \end{aligned}$$

(en utilisant (1.8)). On a la même majoration pour les termes négatifs. En négligeant la division par $e^{\beta_1 nh} > 1$, majorer ces deux erreurs de troncature par $e^{-D}/2$ donne la condition. \square

2.2 Régularité et décroissance

Le lien entre la régularité d'une fonction g et la décroissance de sa transformée de Fourier \hat{g} est explicité par des théorèmes de type Paley-Wiener, dont l'archétype est le résultat suivant [PW87, th X] :

Théorème 2.3 (Paley-Wiener). *Soit g, \hat{g} un couple de Fourier de classe L^2 sur \mathbb{R} , et $B > 0$. Alors on a équivalence entre*

- g est une fonction entière telle que $g(z) \ll e^{B|z|}$
- \hat{g} est à support compact dans $[-B, B]$.

On démontre dans cette section la quasi-équivalence entre le fait que g soit holomorphe et bornée sur une bande Δ_τ , et le fait que $\hat{g} \in O(e^{-2\pi\tau|x|})$.

Du fait de la réciprocity de Fourier $\widehat{\hat{g}}(x) = g(-x)$, tous les résultats peuvent être formulés indifféremment en remplaçant g par \hat{g} .

2.2.1 Régularité de g d'après la décroissance de \hat{g}

Tout d'abord, l'hypothèse d'une décroissance exponentielle de la transformée de Fourier implique immédiatement l'holomorphie de la fonction g au voisinage de l'axe réel.

Proposition 2.4. *Soit $\hat{g} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction vérifiant*

$$\hat{g}(x) = O(e^{-2\pi\tau|x|}), \tau > 0,$$

alors \hat{g} est la transformée de Fourier d'une fonction g holomorphe sur une bande Δ_τ . De plus, pour tout $|t| < \tau$, on a $g \in L^2(\mathbb{R} + it)$.

Démonstration : Sous ces hypothèses, \hat{g} est L^1 , de même que $\hat{g}(x)e^{2i\pi xt}$ pour tout $|t| < \tau$, d'où l'existence de $g(x + it)$. De plus, $(2i\pi x)e^{2i\pi xt}\hat{g}(x)$ est elle aussi L^1 , donc g est dérivable sur Δ_τ par dérivation sous le signe intégral. L'égalité de Plancherel assure l'intégrabilité L^2 . \square

Corollaire 2.5. *En particulier, si $\hat{g}(x) = O(e^{-\alpha|x|^\beta})$ avec $\beta > 1$, alors g est une fonction entière.*

2.2.2 Décroissance de \hat{g} d'après la régularité de g

Réciproquement, et c'est ce qui importe pour l'intégration numérique, on peut chercher à assurer la décroissance exponentielle de \hat{g} à partir d'hypothèses sur g . Si l'on ajoute des conditions convenables qui permettent de décaler la droite d'intégration dans la direction imaginaire, on obtient le résultat suivant :

Proposition 2.6. *Soit $\tau > 0$ et $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction L^1 , telle que*

- g possède un prolongement analytique holomorphe sur un voisinage ouvert de Δ_τ (que l'on note toujours g);
- $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \int_{x-i\tau}^{x+i\tau} |g(z)| dz = 0$;

— $g \in L^1(\mathbb{R} \pm i\tau)$;
alors on a pour tout $x \geq 0$

$$|\hat{g}(\pm x)| \leq \|g(\cdot \mp i\tau)\|_1 e^{-2\pi\tau x}$$

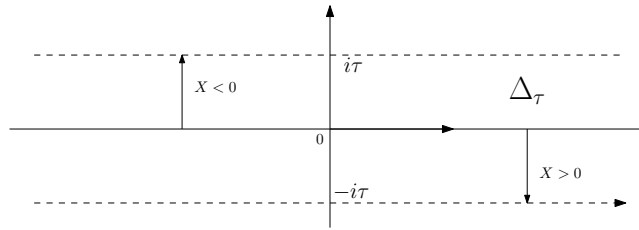


FIGURE 1: décalage de la droite d'intégration

Démonstration : Les hypothèses permettent, via la formule de Cauchy, de dire que pour tout $|t| \leq \tau$, on a $\int_{\mathbb{R}} g(u) e^{2i\pi x u} du = \int_{\mathbb{R}+it} g(u) e^{2i\pi x u} du$.

Ce qui donne en décalant la droite d'intégration vers le bas de $-i\tau$ pour $x > 0$:

$$\begin{aligned} |\hat{g}(x)| &= \left| \int_{\mathbb{R}} e^{-2i\pi x(z-i\tau)} g(z-i\tau) dz \right| \\ &\leq e^{-2\pi x\tau} \int_{\mathbb{R}} |g(z-i\tau)| dz \\ &\leq \|g(\cdot - i\tau)\|_1 e^{-2\pi x\tau} \end{aligned}$$

d'après l'hypothèse d'intégrabilité. De même pour $x < 0$, en décalant vers le haut

Les deux dernières hypothèses de la proposition 2.6 sont nécessaires. Toutefois, quand g est une fonction à décroissance doublement exponentielle, la proposition 2.9 de la section suivante permettra de les obtenir.

2.3 Décroissance des fonctions holomorphes

La grande rigidité des fonctions holomorphes permet d'étendre des hypothèses de croissance ou de décroissance à un voisinage de l'endroit où on en dispose.

En simplifiant, on peut dire que si une fonction possède un certain type de décroissance exponentielle selon une direction, elle est soumise à une croissance qui lui est directement liée dans une direction transverse. Ainsi l'exponentielle a-t-elle une croissance et une décroissance symétrique selon les moitiés de chaque axe ; la gaussienne $x \mapsto e^{-x^2}$ compense sa décroissance sur l'axe réel par une croissance correspondante $it \mapsto e^{t^2}$ le long de l'axe imaginaire ; enfin la double exponentielle décroissante $e^{-\cosh x}$ explose en $e^{\cosh(x)}$ au bord de la bande $\Delta_{\frac{\pi}{2}}$.

Nous démontrons ici quelques résultats de rigidité obtenus à partir du principe du maximum (Phrägmen-Lindelöf) sur une demi-bande

$$\Delta_{\tau}^+ = \mathbb{R}_+ + i[-\tau, \tau]. \quad (26)$$

Proposition 2.7. *Soit f une fonction holomorphe sur la demi-bande Δ_{τ}^+ et telle que*

- $|f| \leq M$ sur le bord $\partial\Delta_{\tau}^+$;
 - $f(x + it) = O(e^{\alpha e^{\beta x}})$ sur Δ_{τ}^+ avec $\beta > 0$ tel que $\beta\tau < \frac{\pi}{2}$;
- alors $|f| \leq M$ uniformément sur Δ_{τ}^+ .

Remarque : La condition $\beta\tau < \frac{\pi}{2}$ est optimale comme le montre pour $\tau = \frac{\pi}{2}$ la fonction e^{e^x} qui vérifie les autres conditions de la proposition mais n'est pas bornée.

Démonstration : Par homothétie sur la variable, on se ramène au cas où $\tau = \frac{\pi}{2}$ en remplaçant la condition $\beta\tau < \frac{\pi}{2}$ par $\beta < 1$. On considère un exposant $\gamma \in]\beta, 1[$. Alors pour tout $\varepsilon > 0$, la fonction $h(z) = e^{-\varepsilon e^{\gamma z}}$ vérifie $|h(x + it)| \leq e^{-\varepsilon \cos(\gamma t) e^{\gamma x}}$, donc h est en particulier bornée sur $\partial\Delta_{\frac{\pi}{2}}^+$ (car $\cos(\gamma \frac{\pi}{2}) > 0$) et sa décroissance l'emporte sur celle de f :

$$|fh(x + it)| \leq e^{e^{\beta x} - \varepsilon \cos(\gamma t) e^{\gamma x}} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} 0.$$

Donc d'après le principe du maximum, fh est bornée sur $\Delta_{\frac{\pi}{2}}^+$ par M . Ceci pour tout $\varepsilon > 0$, donc on obtient le résultat en prenant (à x fixé) la limite $\varepsilon \rightarrow 0$. \square

2.3.1 Décroissance maximale

De même, on limite la décroissance de fonctions qui possèdent une certaine bande d'holomorphie sur laquelle elles restent bornées.

Théorème 2.8. *Soit f une fonction holomorphe et bornée sur une demi-bande Δ_{τ}^+ , qui possède sur une demi-droite $\mathbb{R}_+ + it$, pour une certaine valeur $t \in]-\tau, \tau[$, une décroissance*

$$f(x + it) = O(e^{-\alpha e^{\beta x}}), \quad x > 0$$

avec $\beta\tau > \frac{\pi}{2}$. Alors f est la fonction nulle.

Démonstration : Notons M un majorant de f sur $\partial\Delta_{\tau}^+$. Posons $\gamma = \frac{\pi}{2\tau}$, alors $\gamma < \beta$ et pour tout $A > 0$, la fonction $h(z) = e^{Ae^{\gamma z}}$ vérifie $|h| \leq e^A$ sur $\partial\Delta_{\tau}^+$. Notons $M_D = \sup |fh|$ sur la demi-droite $D = \mathbb{R}_+ + it$. Notons Δ_1 et Δ_2 les deux demi-bandes respectivement au-dessus et au-dessous de D , de largeurs respectives $\tau - t$ et $\tau + t$. Alors fh est borné sur $\partial\Delta_1$ et de croissance double-exponentielle d'ordre γ à l'intérieur avec $\gamma(\tau - t) < \pi$, donc d'après la proposition 2.7 fh est uniformément bornée sur Δ_1 par le maximum sur le bord $M_1(M, A) \leq \max(Me^A, M_D)$. De même sur Δ_2 $|f| \leq M_2(M, A)$ sur Δ_2 , avec un maximum atteint au bord. En outre puisque $fh \rightarrow 0$ le long du bord commun D , d'après le principe du maximum (sur Δ_{τ}^+) $M_D \leq M_1$ et $M_D \leq M_2$, ainsi $|fh| \leq Me^A$ uniformément sur Δ_{τ}^+ . En particulier on a pour tout $x > 0$ $|f(x)| \leq Me^A e^{-Ae^x}$, ceci pour tout $A > 0$. En faisant tendre $A \rightarrow \infty$ on en déduit que $f = 0$. \square

Remarque : La condition f bornée sur Δ_τ^+ peut être relâchée en une condition de croissance modérée $f(x+it) = O(e^{ae^{\gamma x}})$ avec $\gamma\tau \leq \frac{\pi}{2}$ à l'intérieur de la bande (démonstration identique).

Si une fonction décroît fortement, elle va exploser fortement à proximité. Un exemple est donné par la fonction $f(z) = e^{-e^{4z}}$ qui est bornée sur le bord de $\Delta_{\frac{\pi}{2}}^+$ et a une décroissance très forte. Mais qui a une croissance exponentielle sur les droites $\mathbb{R} \pm i\frac{\pi}{4}$.

2.3.2 Extension de la décroissance

Par les mêmes arguments de type Phrügmen-Lindelöf, toute décroissance double-exponentielle s'étend à un voisinage.

Proposition 2.9. *Si f est une fonction holomorphe sur une demi-bande Δ_τ^+ vérifiant*

- $|f(x)| \leq M_1 e^{-\alpha e^{\beta x}}$ sur \mathbb{R}_+ ;
- $|f| \leq M_2$ sur Δ_τ^+ ;

alors pour tout $0 \leq t \leq \tau$,

$$|f(x \pm it)| \leq M e^{-\alpha_t e^{\beta x}} \quad (27)$$

où $\alpha_t = \alpha(\cos(\beta t) - \frac{\sin(\beta t)}{\tan(\beta\tau)})$ et $M = \max(M_2 e^\alpha, M_1)$.

Démonstration : Si f est nulle, la conclusion est vraie. On suppose donc f non nulle, et le théorème 2.8 impose $\tau \leq \frac{\pi}{2\beta}$. On considère une fonction $h(z) = e^{(a+ib)e^{\beta z}}$ de sorte que hf soit bornée sur \mathbb{R}_+ et $\mathbb{R}_+ + i\tau$. Puisque

$$|h(x+it)| = e^{(a \cos(\beta t) - b \sin(\beta t))e^{\beta x}}$$

il suffit de choisir $a = \alpha$ et $b = \frac{\alpha}{\tan(\beta\tau)}$ (ou $b = 0$ si $\beta\tau = \frac{\pi}{2}$). On a alors $|fh| \leq M_2$ sur $\mathbb{R}_+ + i\tau$, $|fh| \leq M_1$ sur \mathbb{R}_+ , et $|fh| \leq M_2 e^\alpha$ sur le segment $[0, i\tau]$. Puisque en outre fh a une croissance d'ordre β sur la demi-bande supérieure $\Delta_{0,\tau}^+ = \mathbb{R}_+ + i[0, \tau]$ de largeur $\tau \leq \frac{\pi}{2\beta} < \frac{\pi}{\beta}$, on a $|fh| \leq M$ sur $\Delta_{0,\tau}^+$. La même chose est vraie sur la demi-bande inférieure en prenant l'opposé de b , ce qui démontre le résultat. \square

Remarque : Si au lieu de considérer la demi-bande on considère la bande entière, la conclusion reste vraie en enlevant le facteur e^α du majorant M (il provient de la majoration sur le segment $[-i\tau, i\tau]$, intérieur à la bande complète).

Proposition 2.10. *Si f est une fonction holomorphe sur une bande Δ_τ vérifiant*

- $|f(x)| \leq M_1 e^{-\alpha e^{\beta x}}$ sur \mathbb{R}_+ pour des valeurs $\alpha, \beta > 0$;
- $|f(x+it)| \leq M_2 e^{\lambda x + A e^{\gamma x}}$ sur Δ_τ avec $\gamma < \beta$;

alors pour tout $|t| < \tau$,

$$|f(x+it)| \leq M e^{\lambda x + A_t e^{\gamma x} - \alpha_t e^{\beta x}} \quad (28)$$

où $\alpha_t = \alpha(\cos(\beta t) - \frac{\sin(\beta t)}{\tan(\beta\tau)})$, $A_t = A \frac{\cos(\gamma t)}{\cos(\gamma\tau)}$ et $M = \max(M_1, M_2 e^\alpha)$.

Démonstration : D'après 2.8, on a $\beta\tau \leq \frac{\pi}{2}$ donc $\cos(\gamma\tau) > 0$. On applique alors simplement le théorème précédent au produit fh , où on pose $h(z) = e^{-\lambda z - \frac{A}{\cos(\gamma\tau)} e^{\gamma z}}$ \square

2.4 Énoncé du théorème double-exponentiel

Le théorème général d'intégration des fonctions à décroissance doublement exponentielle consiste simplement à utiliser les résultats de la section précédente pour appliquer la proposition 2.2 uniquement en terme de la fonction g .

Nous donnons trois versions du théorème d'intégration pour les fonctions à décroissance doublement exponentielle : le premier fait appel à des hypothèses assez précises mais permet d'obtenir en pratique les meilleures constantes, tandis que les suivants affaiblissent les hypothèses au prix d'une perte de précision sur les constantes.

Théorème 2.11 (intégration double exponentielle 1). *Soit $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction vérifiant*

1. f possède un prolongement holomorphe borné sur une bande Δ_τ ;
2. $|f(x)| \leq M_1 e^{-\alpha e^{\beta|x|}}$ sur \mathbb{R} ;
3. $\int_{\mathbb{R}} |f(x - i\tau)| + |f(x + i\tau)| dx \leq M_2$;

alors, pour tout $D > 0$, en posant

$$h \leq \frac{2\pi\tau}{D + \log(2M_2 + 2e^{-D})} \quad (29)$$

$$\text{et } n \geq \frac{\log(D + \log(\frac{4M_1}{\alpha\beta}))}{h\beta} \quad (30)$$

on a

$$\left| \int_{\mathbb{R}} f - h \sum_{k=-n}^n f(kh) \right| \leq e^{-D}.$$

Démonstration : D'après la proposition 2.9, f est décroissante en l'infini, donc on peut appliquer la proposition 2.6 qui donne la majoration $|\hat{g}(x) + \hat{g}(-x)| \leq M_2 e^{-2\pi\tau x}$ pour tout $x > 0$. On choisit donc les paramètres d'intégration suivant la proposition 2.2. \square

En raison des résultats de la section 2.3, on peut assouplir l'hypothèse d'intégrabilité L^1 au moyen de calculs génériques :

Théorème 2.12 (intégration double exponentielle 2). *Soit $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction vérifiant*

1. g possède un prolongement holomorphe sur une bande Δ_τ ;
2. $|g(x)| \leq M_1 e^{-\alpha e^{\beta|x|}}$ sur \mathbb{R} ;
3. $|g(z)| \leq M_2$ sur Δ_τ ;

alors, pour tout $D > 0$ et tout $t \in]0, \tau[$, en posant $\delta = \tan(\beta\tau)^{-1}$ ($\delta = 0$ si $\beta\tau = \frac{\pi}{2}$), $M = \max(M_2 e^\alpha, M_1)$,

$$\alpha_t = \alpha(\cos(\beta t) - \delta \sin(\beta t)) \quad (31)$$

$$h \leq \frac{2\pi t}{D + \log\left(\frac{8Me^{-\alpha t}}{\alpha_t \beta} + 2e^{-D}\right)} \quad (32)$$

$$\text{et } n \geq \frac{\log\left(D + \log\left(\frac{4M_1}{\alpha\beta}\right)\right)}{h\beta} \quad (33)$$

on a

$$\left| \int_{\mathbb{R}} g - h \sum_{k=-n}^n g(kh) \right| \leq e^{-D}.$$

Démonstration : D'après la proposition 2.9, pour tout $t < \tau$,

$$|g(x \pm it)| \leq Me^{-\alpha_t e^{\beta|x|}}$$

En particulier, pour tout $|t| < \tau$, g vérifie les hypothèses de la proposition 2.6 avec $\|g(\cdot + it)\|_1 \leq 2M \int_0^\infty e^{-\alpha_t e^{\beta x}} dx \leq \frac{2Me^{-\alpha t}}{\alpha_t \beta}$. On a donc

$$|\hat{g}(X)| \leq \frac{2Me^{-\alpha t}}{\alpha_t \beta} e^{-2\pi X t}. \quad (34)$$

Une fois t fixé, les paramètres sont issus de la proposition 2.2. \square

Théorème 2.13 (complexité). *Sous les hypothèses et avec les notations du théorème 2.12, le choix de la valeur*

$$t = \frac{1}{\beta} \arctan\left(\frac{D - \beta\delta\tau}{\delta D + \beta\tau}\right) \quad (35)$$

donne une complexité d'intégration

$$n(g, D) \sim \frac{(D + \log\left(\frac{8MD}{\beta \sin(\beta\tau)(1+\delta^2)}\right)) \log\left(D + \frac{4M_1}{\alpha\beta}\right)}{2\pi\tau\beta}. \quad (36)$$

Démonstration : On a $\alpha_t \rightarrow 0$ pour $t \rightarrow \tau$. À X fixé, en négligeant le terme $e^{-\alpha_t}$, on minimise le membre de droite de (34) au maximum de $2\pi t X + \log(\alpha_t)$, soit en posant $\tan(\beta t) = \frac{2\pi X - \beta\delta}{\beta + 2\pi X\delta}$. Pour $D \rightarrow \infty$, on a $t \rightarrow \tau$ et $2\pi t X \sim D$, donc $X \sim \frac{D}{2\pi\tau}$. On pose donc

$$t = \frac{1}{\beta} \arctan\left(\frac{D - \beta\delta\tau}{\delta D + \beta\tau}\right).$$

De plus, on a

$$\tan(\beta t) = \tan(\beta\tau)\left(1 - \frac{\delta + \delta^{-1}}{D}\right) + O(D^{-2})$$

donc

$$t = \tau - \frac{1 + \delta^{-2}}{\beta(1 + \delta^{-2})D} + O(D^{-2}) = \tau - \frac{1}{\beta D} + O(D^{-2}).$$

On en déduit

$$\alpha_t = 0 + (\beta \sin(\beta\tau) + \beta\delta \cos(\beta\tau)) \frac{1}{\beta D} + O(D^{-2}) = \frac{\sin(\beta\tau)(1 + \delta^2)}{D} + O(D^{-2})$$

et donc pour $D \rightarrow \infty$

$$n \sim \frac{(D + \log(\frac{8MD}{\beta \sin(\beta\tau)(1 + \delta^2)})) \log(D + \frac{4M_1}{\alpha\beta})}{2\pi\tau\beta}.$$

□

Enfin, si l'on affaiblit encore l'hypothèse de régularité, on peut écrire le théorème très général suivant.

Théorème 2.14 (intégration double exponentielle 3). *Soit $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction vérifiant*

1. g possède un prolongement holomorphe sur une bande Δ_τ ;
2. $|g(x)| \leq M_1 e^{-\alpha e^{\beta|x|}}$ sur \mathbb{R} ;
3. $|g(z)| \leq M_2 e^{\lambda|x| + A e^{\gamma|x|}}$ sur Δ_τ ;

pour des constantes positives telles que $\beta > \gamma$. Alors pour tout $D > 1$ et tout $t \in]0, \tau[$, en posant $\delta = \tan(\beta\tau)^{-1}$ ($\delta = 0$ si $\beta\tau = \frac{\pi}{2}$), $M = \max(M_2 e^\alpha, M_1)$,

$$\alpha_t = \alpha(\cos(\beta t) - \delta \sin(\beta t)) \quad (37)$$

$$A_t = A \frac{\cos(\gamma t)}{\cos(\gamma \tau)} \quad (38)$$

$$C_t = I_{\lambda, A_t, \gamma}^{\alpha_t, \beta} \quad (39)$$

$$h \leq \frac{2\pi t}{D + C_t + \log(4M_2 + 2e^{-D - C_t})} \quad (40)$$

$$\text{et } n \geq \frac{\log(D + \log(\frac{4M_1}{\alpha\beta}))}{h\beta} \quad (41)$$

on a

$$\left| \int_{\mathbb{R}} g - h \sum_{k=-n}^n g(kh) \right| \leq e^{-D}.$$

Démonstration : À présent, d'après la proposition 2.10 on étend la décroissance de g en

$$|g(x + it)| \leq M e^{\lambda|x| + A_t e^{\gamma|x|} - \alpha_t e^{\beta|x|}}$$

d'où l'on tire (cf. lemme 1.9)

$$\|g(\cdot + it)\|_1 \leq 2M \exp(C_t)$$

avec la constante C_t (39).

□

Remarque : On recherchera numériquement une valeur de t qui minimise la complexité.

D'un point de vue asymptotique, on peut remplacer α_t par son équivalent $\alpha_t \sim \alpha\beta(\sin(\beta\tau) + \delta \sin(\beta\tau)^{-1})(\tau - t) = a(\tau - t)$, avec $a = \alpha\beta \sin(\beta\tau)(1 + \delta^2)$, et maximiser la valeur de h , c'est-à-dire résoudre numériquement sur $t \in]0, \tau[$

$$D + \log(4M_2 + 2e^{-D}) + U(\tau - t)^{-\frac{\gamma}{\beta-\gamma}} = \frac{\gamma}{\beta-\gamma} U t (\tau - t)^{-\frac{\beta}{\beta-\gamma}}$$

avec $U = A \left(\frac{A\gamma + \lambda + 1}{a\beta} \right)^{\frac{\gamma}{\beta-\gamma}} - a \left(\frac{A\gamma}{a\beta} \right)^{\frac{\beta}{\beta-\gamma}}$.

En posant $\tilde{D} = D + \log(4M_2 + 2e^{-D})$, on maximise $X = \frac{1}{h}$ en les zéros de

$$2\pi t^2 \frac{dX}{dt} = t \frac{d}{dt} C_t - C_t - \tilde{D}.$$

Pour $t \rightarrow \tau$, on remplace α_t par son équivalent $a(\tau - t)$, où $a = \alpha\beta \sin(\beta\tau)(1 + \delta^2)$, et A_t par son équivalent A .

Si $A = 0$, $C_t \sim \frac{\lambda+1}{\beta} \log\left(\frac{\lambda+1}{a(\tau-t)\beta e}\right)$ et on résout

$$\frac{\lambda+1}{\beta} \frac{t}{\tau-t} = \tilde{D} + \frac{\lambda+1}{\beta} \log\left(\frac{\lambda+1}{a(\tau-t)\beta e}\right),$$

soit, en posant $D_1 = \frac{\beta}{\lambda+1} \tilde{D} + \log\left(\frac{\lambda+1}{a\beta e}\right)$,

$$(\tau - t) \log(\tau - t) + t = (\tau - t) D_1.$$

2.5 Optimalité du principe double-exponentiel

2.5.1 Principe d'incertitude

Le théorème 2.8 s'inscrit dans une famille plus générale de résultats d'incertitude, qui limitent la décroissance simultanée de g et \hat{g} .

Les résultats énoncés dans la section 2.3 permettent d'obtenir très simplement des résultats dans ce sens :

Lemme 2.15. Si $|\hat{g}(x)| \leq M_2 e^{-\alpha_2 |x|^{\beta_2}}$, $\beta_2 > 1$, alors

$$|g(x + it)| \leq 2M_2 e^{\frac{(2\pi|t|+1)^{\lambda+1}}{(\alpha_2 \beta_2)^\lambda}}, \quad \text{où } \lambda = \frac{1}{\beta_2 - 1}. \quad (42)$$

Démonstration : Par transformée de Fourier, $|g(x + it)| \leq M_2 \int_{\mathbb{R}} e^{2\pi i u t - \alpha_2 |u|^{\beta_2}} du$, on majore ensuite l'intégrale par $\sup(2\pi u t + 1 - \alpha_2 |u|^{\beta_2}) \int_0^\infty e^{-x} dx$, avec un sup obtenu en $u = \left(\frac{2\pi u t + 1}{\alpha_2 \beta_2}\right)^{\frac{1}{\beta_2-1}}$, d'où le résultat. \square

Corollaire 2.16 (principe d'incertitude). Soit $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction satisfaisant les hypothèses de décroissance simplement exponentielle (19) et (20) de la proposition 2.1. Alors si g n'est pas nulle,

$$\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \geq 1.$$

Démonstration : On peut supposer $\beta_1 > 1$, et on pose $h(x) = g(e^x)$ sur une demi-bande $\Delta_{\beta_1}^+$. Alors d'après le lemme précédent, $|h(z)| = O(e^{A|z|^{\lambda+1}})$, avec $\lambda + 1 = \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1}$, et h a décroissance doublement exponentielle d'ordre β_1 . D'après le théorème 2.8, si h n'est pas nulle on a $\frac{\beta_2}{\beta_2 - 1} \geq \beta_1$, d'où le résultat. \square

Le très élégant théorème suivant, dû à Beurling [Hör91], donne un énoncé très symétrique et plus général du principe d'incertitude

Théorème 2.17 (Beurling). Soit $g \in L^1(\mathbb{R})$, alors

$$\iint_{\mathbb{R}^2} |g(x)| |\hat{g}(y)| e^{2\pi|xy|} dx dy < \infty$$

si et seulement si g est nulle.

2.5.2 Complexité minimale

Ainsi, sous réserve de majorer les erreurs de quadrature et de troncature comme nous l'avons fait aux propositions 2.1 ou 2.2, on a les résultats suivants :

Théorème 2.18. Soit $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction non nulle à décroissance simplement exponentielle

$$|g(x)| \leq M_1 e^{-\alpha_1 |x|^{\beta_1}}.$$

- L'intégration numérique de g à précision D par la méthode des trapèzes se fait au minimum en $n(g, D) = O(D)$ évaluations.
- S'il existe $t \in \mathbb{R}$ tel que $g \notin L^2(\mathbb{R} + it)$ (en particulier si g n'est pas holomorphe sur le plan complexe tout entier), alors la complexité est au minimum en $n(g, D) = O(D^{1+\frac{1}{\beta_1}})$ évaluations.

Démonstration : Nous avons montré que $\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \geq 1$. La seconde affirmation est issue de la proposition 2.4. \square

Remarque : Il existe un grand nombre de fonctions pour lesquelles la formule des trapèzes fournit directement une intégration de complexité linéaire : les fonctions de Hermite, et plus généralement toutes les fonctions de la forme

$$g(x) = P(x) \exp(-Q(x^2))$$

où P et Q sont des polynômes et Q est à coefficients positifs.

Proposition 2.19. Soit $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction non nulle à décroissance doublement exponentielle

$$|g(x)| \leq M_1 e^{-\alpha_1 e^{\beta_1 |x|}},$$

et dont la transformée de Fourier possède une décroissance

$$|\hat{g}(x)| \leq M_2 e^{-\alpha_2 |x|^{\beta_2}}.$$

Alors $\beta_2 \leq 1$ et si $\beta_2 = 1$ on a

$$\alpha_2 \beta_1 \leq \pi^2.$$

Ainsi l'intégration numérique de g à précision D par la méthode des trapèzes a une complexité minimale $D \log(D) \frac{1}{\pi^2} \ll n(g, D)$.

Démonstration : En effet, si $\beta_2 > 1$, alors g est bornée sur toutes les droites $\mathbb{R} + i\tau$, ce qui est impossible d'après le théorème 2.8. Le cas d'égalité se traite par le même théorème : pour tout α_2 la transformée de Fourier inverse permet de borner g sur les droites $\mathbb{R} + it$ avec $2\pi t < \alpha_2$, donc on ne peut avoir $\beta \frac{\alpha_2}{2\pi} > \frac{\pi}{2}$. \square

Mentionnons également un autre résultat d'optimalité qui ne se limite pas à la méthode des trapèzes. Il s'agit du théorème obtenu par Sugihara dans [Sug97], qui montre une certaine optimalité en moyenne de la méthode double-exponentielle parmi les autres méthodes de quadrature.

Théorème 2.20 (Sugihara 1997). Soit T_n une formule de quadrature d'ordre n sur \mathbb{R} , c'est-à-dire de la forme

$$T_n : g \mapsto \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^{d_i} a_{i,j} g^{(j)}(x_i)$$

pour une famille de points x_i et de poids $a_{i,j}$ tels que $\sum_{i,j} j \delta_{a_{i,j} \neq 0} = n$.

Alors il existe une constante absolue $C > 0$ indépendante de n telle que pour tous $\alpha, \beta > 0$ et pour tout $\tau < \frac{\pi}{2\beta}$, il existe une fonction g vérifiant les hypothèses du théorème 2.11 telle que

$$\left| T_n(g) - \int_{\mathbb{R}} g \right| \geq C \log(n) \exp\left(-\frac{2\pi\tau\beta n}{\log(\pi\tau\beta n/\alpha)}\right).$$

En particulier

$$n(g, D) \sim \frac{D \log(D/\alpha)}{2\pi\tau\beta}. \quad (43)$$

Démonstration : Nous donnons uniquement les idées principales de [Sug97].

La fonction g est obtenue en multipliant la fonction de référence $e^{-2\alpha \cosh(\beta x)}$ par un produit de Blaschke choisi pour que g s'annule à l'ordre d_i en tous les x_i , de sorte que $T_n(g) = 0$, et tel que g satisfasse toujours les hypothèses du théorème 2.11. En prenant un produit symétrique $b(z)\overline{b(\bar{z})}$ d'un tel produit de Blaschke b , on

obtient même une fonction g réelle positive sur \mathbb{R} , ce qui permet d'effectuer une minoration adéquate de l'intégrale et donne le résultat. L'équivalent en terme du nombre d'évaluations n s'obtient par inversion de $\frac{2\pi\tau\beta n}{\log(\pi\tau\beta n/\alpha)} = D$. \square

Puisque la méthode double-exponentielle est réalisée à l'aide de $2n + 1$ points, ce théorème montre que la complexité est sous-optimale d'un facteur au plus 2 en moyenne.

2.6 Cas des fonctions méromorphes

Puisque la théorie précédente repose principalement sur l'estimation des transformées de Fourier par décalage de contour sur une bande d'holomorphic, le procédé reste possible avec des fonctions méromorphes, si l'on prend en compte les pôles franchis lors du décalage des chemins à l'aide de la formule des résidus. Supposons donc une fonction g vérifiant les hypothèses de la proposition 2.6, mais n'étant que méromorphe sur Δ_τ , avec un nombre fini de pôles (ρ) de résidus (r_ρ).

On a alors pour $X > 0$

$$\hat{g}(X) = \int_{\mathbb{R}} e^{-2i\pi X t} g(t) dt = \int_{\mathbb{R}-i\tau} e^{-2i\pi X t} g(t) dt - 2i\pi \sum_{-\tau < \text{Im}(\rho) < 0} r_\rho e^{-2i\pi X \rho}.$$

Pour $X < 0$ on prend en compte les pôles tels que $0 < \text{Im}(\rho) < \tau$, en prenant cette fois en compte les résidus de manière positive, de sorte que la contribution de ces pôles à $\sum_{|k|>0} \hat{g}(k/h)$ est égale à

$$2i\pi \sum_{\rho} \sum_{k>0} \varepsilon_\rho r_\rho e^{\varepsilon_\rho 2i\pi k \rho / h} = \sum_{\rho} \frac{\varepsilon_\rho 2i\pi r_\rho}{e^{-\varepsilon_\rho 2i\pi \rho / h} - 1} \quad (44)$$

où $\varepsilon_\rho = \pm 1$ est égal au signe de $\text{Im}(\rho)$.

Pour conserver l'estimation (22) de l'erreur de quadrature, il suffit de corriger la formule d'intégration en ajoutant cette somme. On définit ainsi une erreur de quadrature modifiée

$$\tilde{e}_q(g, h, \tau) = \left| \sum_{k \in \mathbb{Z}^*} \hat{g}\left(\frac{k}{h}\right) - \sum_{0 < \text{Im}(\varepsilon_\rho) < \tau} \frac{\varepsilon_\rho 2i\pi r_\rho}{e^{-\varepsilon_\rho 2i\pi \rho / h} - 1} \right| \quad (45)$$

pour laquelle on a l'estimation suivante

Lemme 2.21. *Soit g une fonction méromorphe sur une bande Δ_τ , avec un nombre fini de pôles ρ de résidus r_ρ , telle que $|g(z)| \rightarrow 0$ uniformément pour $z \rightarrow \infty$, et telle que $M_2 = \|g(\cdot + i\tau)\|_1 + \|g(\cdot - i\tau)\|_1 < \infty$.*

Alors pour tout $h > 0$, on a

$$\tilde{e}_q(g, h, \tau) \leq \frac{M_2}{e^{2\pi\tau/h} - 1}. \quad (46)$$

Par ailleurs, la formule d'intégration avec correction satisfait

$$\int_{\mathbb{R}} g = h \sum_{k=-n}^n g(kh) + \sum_{0 < \text{Im}(\varepsilon_{\rho}) < \tau} \frac{\varepsilon_{\rho} 2i\pi r_{\rho}}{e^{-\varepsilon_{\rho} 2i\pi r_{\rho}/h} - 1} + \varepsilon \quad (47)$$

pour une erreur

$$|\varepsilon| \leq \tilde{e}(g, n, h, \tau) = e_t(g, n, h) + \tilde{e}_q(g, h, \tau). \quad (48)$$

Avec la définition de complexité d'intégration qui correspond

$$\tilde{n}(g, D, \tau) = \inf \left\{ n, \exists h, \tilde{e}(g, n, h, \tau) < e^{-D} \right\} \quad (49)$$

on obtient les deux théorèmes suivants, dans des cadres de décroissance respectivement simple et double-exponentielle.

Théorème 2.22. *Soit g une fonction méromorphe sur \mathbb{C} , et telle que*

- $g(x) = O(e^{-\alpha_1 |x|^{\beta_1}})$, $x \in \mathbb{R}$;
- g a un nombre fini de pôles dans chaque bande Δ_t , $t > 0$;
- $\|g(\cdot + it)\|_1 = O(e^{\alpha_2 |t|^{\beta_2}})$, $t \in \mathbb{R}$;

pour des constantes $\alpha_i > 0$, $\beta_i \geq 1$. Alors pour tout $D > 0$ il existe $\tau \in O(D^{\frac{1}{\beta_2}})$ tel que

$$\tilde{n}(g, D, \tau) = O(D^{1 + \frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2}}).$$

Démonstration : D'après (46), il existe $M > 0$ tel que pour tout τ , $\tilde{e}_q(g, h, \tau) \leq M e^{\alpha_2 \tau^{\beta_2} - 2\pi\tau/h}$, de sorte que $\tilde{e}_q(g, h, \tau) = O(e^{-D})$ pour $1/h = O(\frac{D}{\tau} + \tau^{\beta_2 - 1})$.

Puisque $\beta_2 > 1$, on maximise h en choisissant un décalage $\tau = O(D^{\frac{1}{\beta_2}})$, si bien que $h = O(D^{1 - \frac{1}{\beta_2}})$. L'erreur de troncature suit la proposition 2.1, donc $nh = O(D^{\frac{1}{\beta_1}})$ \square

Théorème 2.23. *Soit g une fonction méromorphe sur une bande Δ_{τ} , et telle que*

- $g(x) = O(e^{-\alpha_1 e^{\beta_1 |x|}})$, $x \in \mathbb{R}$;
- $\|g(\cdot + i\tau)\|_1 + \|g(\cdot + i\tau)\|_1 < \infty$;

pour des constantes $\alpha, \beta > 0$. Alors

$$\tilde{n}(g, D, \tau) \ll \frac{D \log D}{2\pi\tau\beta_1}.$$

Démonstration : On suit la proposition 2.2, une fois estimée l'erreur de quadrature modifiée via (46). \square

3 Application à l'intégration sur divers domaines

Dans cette partie, nous décrivons l'application des théorèmes précédents à l'intégration sur des intervalles quelconques. Dans le cas d'une fonction f

1. définie sur un intervalle I ;
2. possédant certaines propriétés d'intégrabilité sur I ;
3. holomorphe dans un voisinage Z de I sur lequel elle reste bornée, ou garde une croissance modérée ;

il convient d'introduire un changement de variable

$$z = \varphi(z')$$

de sorte que la fonction $g(z') = \varphi(z')f \circ \varphi(z')$ vérifie les hypothèse du théorème 2.14, c'est-à-dire que

1. $\varphi(\mathbb{R}) = I$;
2. g ait une décroissance doublement-exponentielle sur \mathbb{R} ;
3. il existe une valeur $\tau > 0$ et une zone $Z_\tau \subset Z$ telle que φ et φ' soient holomorphe sur Δ_τ , et $\varphi(\Delta_\tau) \subset Z_\tau$.

Le changement de variable est construit de manière à satisfaire les deux premiers points. Il induit une géométrie particulière aux images $\varphi(\Delta_\tau)$ que nous explicitons.

En outre, pour choisir la borne de troncature, on se référera au lemme suivant

Lemme 3.1. *Soit $f : I \rightarrow \mathbb{C}$, on suppose que $|f|$ est majorée par une fonction $F : I \rightarrow \mathbb{R}_+$ et que le changement φ est croissant et tel que $\varphi' \times F \circ \varphi$ soit décroissante sur $[nh, \infty[$, alors l'erreur de troncature réalisée lors de l'intégration vérifie*

$$h \left| \sum_{|k|>n} g(kh) \right| \leq \int_{\varphi(nh)}^{\varphi(\infty)} F(t) dt. \quad (50)$$

Démonstration : En effet, si on dispose d'une fonction $F > 0$ décroissante et intégrable qui majore f sur I , alors

$$h \left| \sum_{|k|>n} g(kh) \right| \leq h \sum_{|k|>n} \varphi'(kh) F(\varphi(kh)) \leq \int_{nh}^{\infty} \varphi'(t) F(\varphi(t)) dt \leq \int_{\varphi(nh)}^{\varphi(\infty)} F(t) dt. \quad \square$$

Remarque : En pratique, si l'intégrale n'a pas besoin d'être certifiée, on se contente de sommer les termes $g(kh)$ jusqu'à ce que leur module soit négligeable.

3.1 Droite réelle

3.1.1 Cas d'une décroissance simplement exponentielle

On suppose $f(x) = O(e^{-\alpha|x|^\beta})$ sur \mathbb{R} , on pose alors :

$$z = \varphi(z') = \sinh(z'). \quad (51)$$

Les exponentielles changent la largeur de Δ_τ en angle, de sorte que la zone Z_τ est contenue dans un cône.

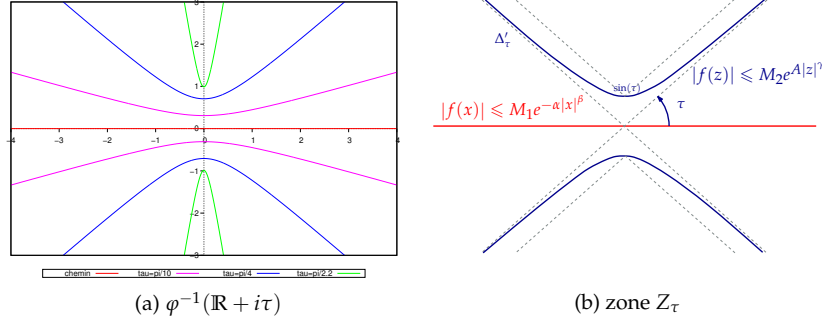


FIGURE 2: changement de variable $\varphi = \sinh$.

Lemme 3.2 (zone Z_τ). Soit $\tau \in]0, \frac{\pi}{2}[$, alors pour tout $x \in \mathbb{R}$ on a

$$\varphi(x + i\tau) = \text{sh}(x + i\tau) \in \{z, \text{Im}(z) \in [\tan \tau \text{Re}(z), \tan \tau \text{Re}(z) + \sin \tau]\}$$

En particulier, si l'on définit Z_τ comme un cône d'ouverture τ épaissi d'une largeur $\sin \tau$,

$$Z_\tau = \{z, |\arg(z)| \leq \tau \bmod \pi\} + i[-\sin \tau, \sin \tau] \quad (52)$$

on a $\varphi(\Delta_\tau) \subset Z_\tau$ et $\lim_{\tau \rightarrow 0} Z_\tau = \mathbb{R}$.

Démonstration : En effet, en posant $X + iY = \text{sh}(x + i\tau)$,

$$\begin{aligned} Y &= \text{ch } x \sin \tau = \sin \tau \sqrt{1 + \text{sh}^2 x} \\ &= \sin \tau \sqrt{1 + \frac{X^2}{\cos^2 \tau}} \\ &= \tan \tau \sqrt{X^2 + \cos^2 \tau} \end{aligned}$$

On a donc toujours

$$X \tan \tau \leq Y \leq X \tan \tau + \sin \tau$$

c'est-à-dire que $\text{sh}(x + i\tau)$ est dans la bande B_τ . \square

Théorème 3.3 (changement de variable exponentiel). Soit $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ et $\tau \in]0, \frac{\pi}{2}[$ vérifiant :

1. $|f(x)| \leq M_1 e^{-\alpha|x|^\beta}$ pour $x \in \mathbb{R}$, avec $\alpha, \beta > 0$;
2. f possède un prolongement holomorphe sur un cône épaissi Z_τ ;
3. $|f(z)| \leq M_2 e^{Ae^{\gamma|z|}}$ sur Z_τ avec $A \geq 0$ et $\gamma < \beta$.

Alors pour $D > 1$ et $t < \tau$, en posant

$$h \leq \frac{2\pi t}{D + C_t + \log(4M_2 + 2e^{-D-C_t})}$$

$$nh \geq \operatorname{asinh}(L_{\alpha,\beta}(D + \log(2M_1)))$$

on a

$$\left| \int_{\mathbb{R}} f - h \sum_{k=-n}^n f(\operatorname{sh}(kh)) \operatorname{ch}(kh) \right| < e^{-D}.$$

Le nombre d'évaluations satisfait

$$n \ll \frac{(D + C_t) \log\left(\frac{2(D+\log(M_1))}{\alpha}\right)}{2\pi\tau\beta}.$$

Démonstration : Quitte à faire un changement de variable initial $x \mapsto \lambda x$, on suppose $\alpha\beta \geq 1$ sans perdre en généralité.

La fonction $g(x) = \cosh(x)f(\sinh(x))$ a une décroissance doublement exponentielle sur \mathbb{R} d'ordre α', β pour tout $\alpha' < \alpha$, et d'après les encadrements (89),

$$\begin{aligned} |g(x + it)| &\leq |f(\sinh(x + it))| |\cosh(x + it)| \\ &\leq M_2 e^{A(\cosh x)^\gamma} \cosh x \\ &\leq M_2 e^{x + Ae^{\gamma x}} \end{aligned}$$

donc g vérifie (3) avec $\lambda = 1$. On peut donc poser h selon le théorème 2.14.

En ce qui concerne le produit nh , on utilise plutôt le lemme de troncature 3.1, en résolvant l'équation $\int_{\sinh(kh)}^{\infty} M_1 e^{-at^\beta} dt < e^{-D}$. \square

3.1.2 Cas d'une décroissance polynomiale

Si $f(x) = O(|x|^{-n})$ pour $n > 1$, on effectue le changement de variable

$$z = \varphi(z') = \sinh(\sinh(z')). \quad (53)$$

Dans ce cas, quelle que soit la valeur de τ , la zone couvre à peu près tout le plan complexe, mais on peut toujours isoler deux zones autour de $\pm i$.

Lemme 3.4 (zone Z_τ). Soit $\tau < \frac{\pi}{2}$: on définit deux points Y_{\min} et Y_{\max} sur l'axe imaginaire, de hauteur respectives $\sin(\sin \tau)$ et $\operatorname{ch}(\cos \tau \sqrt{(\frac{\pi}{2\sin \tau})^2 - 1})$, ainsi qu'un point X_{\max} de coordonnées

$$X_{\max} : \left(\begin{array}{l} \operatorname{sh}(\cot \tau \sqrt{\beta^2 - \sin^2 \tau}) \cos \beta \\ \operatorname{ch}(\cot \tau \sqrt{\beta^2 - \sin^2 \tau}) \sin \beta \end{array} \right), \text{ avec } \beta = \sqrt{\sin \tau \left(\frac{\pi}{2} - \tau \right)}.$$

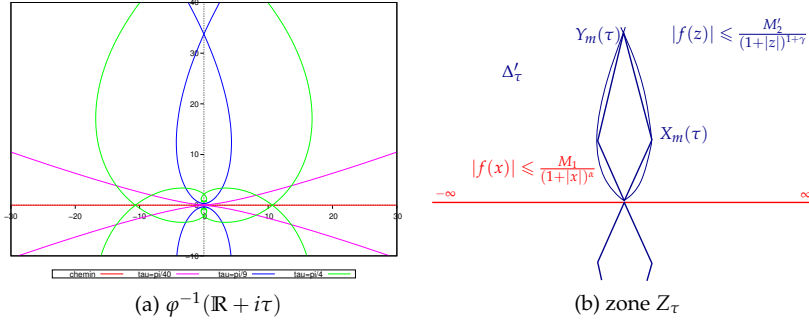


FIGURE 3: changement de variable $\varphi(t) = \sinh(\sinh t)$.

Alors le triangle (ouvert) défini par ces trois points est situé en dehors de Z_τ , ainsi que ses symétriques par rapport aux axes et à l'origine, et $\lim_{\tau \rightarrow 0} Z_\tau = \mathbb{R}$. On remarque en particulier que pour tout $\tau > 0$, $\pm i \notin Z_\tau$.

Démonstration : On considère la zone délimitée par la courbe ζ_τ paramétrée par $t \mapsto \varphi(t + i\tau)$. Soit donc $z' = t + i\tau$, on pose $\alpha + i\beta = \text{sh}(z')$ et $x + iy = \text{sh}(\alpha + i\beta)$, c'est-à-dire :

$$\begin{cases} \alpha = \text{sh } t \cos \tau \\ \beta = \text{ch } t \sin \tau \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} x = \text{sh } \alpha \cos \beta \\ y = \text{ch } \alpha \sin \beta \end{cases} .$$

On considère ζ_τ comme une courbe paramétrée par α :

$$\zeta_\tau(\alpha) : \begin{cases} x = \text{sh } \alpha \cos \beta \\ y = \text{ch } \alpha \sin \beta \end{cases} .$$

et ceci sur un intervalle $[0, \alpha_0]$ tel que $\beta \leq \frac{\pi}{2}$ pour rester dans le quatran positif. C'est aussi une courbe paramétrée par β en vertu des relations

$$\begin{cases} \beta(\alpha) = \tan \tau \sqrt{\alpha^2 + \cos^2 \tau} \\ \alpha(\beta) = \cot \tau \sqrt{\beta^2 - \sin^2 \tau} \end{cases} .$$

On démontre alors

1. que ζ_τ passe par les points Y_{min} , Y_{max} ainsi que par le point X_{max} défini dans l'énoncé;
2. que ζ_τ a une courbure constamment négative.

Cela permet de conclure comme annoncé, puisque sans changement de courbure ζ_τ reste à droite de ses cordes.

Par symétrie, on suppose $t, \tau > 0$.

En $t = 0$, ζ_τ passe par le point $(0, y_{min})$ où $y_{min} = \sin \beta = \sin \tau \sin \tau$.

ζ_τ coupe à nouveau l'axe des abscisses pour $\beta_0 = \frac{\pi}{2}$, c'est-à-dire $x_0 = \text{acosh}(\frac{\pi}{2 \sin \tau})$.

On a alors $\alpha_0 = \cos \tau \sqrt{\frac{\pi^2}{4 \sin^2 \tau} - 1}$, d'où une ordonnée

$$y = \cosh(\alpha_0) = \cosh\left(\cos \tau \sqrt{\frac{\pi^2}{4 \sin^2 \tau} - 1}\right)$$

ce qui définit les points Y_{\min} et Y_{\max} annoncés.

Le fait que la courbure soit de signe constant se démontre aisément par le calcul : on développe l'expression

$$y''(\alpha)x'(\alpha) - x''(\alpha)y'(\alpha)$$

en fonction de α , $\beta'(\alpha) > 0$ et $\beta''(\alpha) > 0$, en constatant après réduction qu'elle est formée de termes positifs.

On choisit enfin un point $X_{\max} = (X, Y)$ tel que $X \rightarrow \infty$ et $Y/X \rightarrow 0$ quand $\tau \rightarrow 0$ afin que la famille Z_τ recouvre $\mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$. Ceci impose $\frac{\tan(\beta)}{\tanh(\alpha)} \rightarrow 0$, soit $\alpha(\tau) \rightarrow \infty$ et $\beta(\tau) \rightarrow 0$, en respectant les relations $\sin(\tau) < \beta < \frac{\pi}{2} - \tau$ et $\alpha(\beta) = \frac{\sqrt{\beta^2 - \sin^2 \tau}}{\tan \tau}$. Poser $\beta = \sqrt{\sin \tau (\frac{\pi}{2} - \tau)}$ convient.

Essayons de minorer la valeur maximale de x sur $[0, \alpha_0]$. De

$$\begin{cases} \beta(\alpha) \leq \alpha \tan \tau + \sin \tau \\ \beta'(\alpha) = \tan \tau \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \cos^2 \tau}} \leq \tan \tau \end{cases}$$

on tire la minoration

$$x'(\alpha) = \operatorname{ch} \alpha \cos \beta - \operatorname{sh} \alpha \beta' \sin \beta \quad (54)$$

$$\geq \operatorname{ch} \alpha (\cos \beta - \tan \tau \sin \beta); \quad (55)$$

en particulier $x'(\alpha) \geq 0$ pour $\tan \beta \leq \cot \tau$, c'est-à-dire $\beta \leq \frac{\pi}{2} - \tau = \beta_1$.

On pose alors X_{\max} le point de paramètre $\alpha_1 = \alpha(\beta_1)$. En reportant les valeurs de β et $\alpha(\beta)$ dans x et y on trouve les coordonnées annoncées. Par construction, ζ_τ passe par X_{\max} . \square

On obtient donc le résultat suivant :

Théorème 3.5 (changement de variable double-exponentiel). *Soit $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ et $\tau \in]0, \frac{\pi}{2}[$ vérifiant :*

1. f possède un prolongement holomorphe sur une zone Z_τ définie ci-dessus ;
2. $|f(z)| \leq \frac{M_2}{1+|z|^{1+v}}$ sur Z_τ , avec $v > 0$;
3. $|f(x)| \leq M_1 x^{-\alpha}$ pour $x \in \mathbb{R}$, avec $\alpha > 1$.

Alors, pour tout $D > 1$, en prenant

$$- h \leq \frac{2\pi\tau}{D + \log\left(\frac{2M_2}{v \cos \tau}\right)} ;$$

$$- nh \geq \operatorname{asinh}\left(\operatorname{asinh}\left(\exp\left(\frac{D + \log\left(\frac{2M_1}{\alpha-1}\right)}{\alpha-1}\right)\right)\right) \sim \log\left(2 \frac{D + \log\left(\frac{2M_1}{\alpha-1}\right)}{\alpha-1}\right)$$

on a

$$\left| \int_{\mathbb{R}} f - h \sum_{k=-n}^n f(\operatorname{sh}(kh)) \operatorname{ch}(kh) \right| \leq e^{-D}$$

soit $n(d, D) \ll \frac{D \log D}{2\pi\tau}$ évaluations de f .

Démonstration : — On majore

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}+i\tau} |g(t)| \, dt &\leq M_2 \int_{\mathbb{R}} \frac{|\cosh(x+i\tau) \cosh(\sinh(t+i\tau))|}{1 + |\sinh(\sinh(x+i\tau))|^{1+v}} \, dt \\ &\leq M_2 \int_{\mathbb{R}} \frac{\cosh(t) \cosh(\sinh t \cos \tau)}{1 + |\sinh(\sinh t \cos \tau)|^{1+v}} \, dt \\ &\leq \frac{M_2}{\cos \tau} \int_{\mathbb{R}} \frac{1}{1 + |u|^{1+v}} \, du \\ &\leq \frac{2M_2}{v \cos \tau} \end{aligned}$$

d'où l'on déduit une majoration de \hat{g} et le pas h .

— le reste intégral $\int_X^\infty x^{-\alpha} \, dx$ vaut $\frac{1}{(\alpha-1)x^{\alpha-1}}$, ce qui permet de déterminer nh selon le lemme 3.1. \square

3.2 Demi-droite

3.2.1 Cas d'une décroissance exponentielle

Si f possède une limite finie en 0 vers laquelle elle ne tend pas trop vite (c-à-d. si elle possède un développement limité non nul en 0)², et si f possède une décroissance exponentielle en l'infini de la forme

$$|f(x)| \leq M_1(1+x)^\sigma e^{-\alpha x^\beta},$$

on effectue le changement de variable

$$z = \varphi(z') = e^{z' - \alpha e^{-\beta z'}}. \quad (56)$$

Remarque : Pour simplifier les calculs, on suppose $\beta \geq 1$. On peut toujours s'y ramener par un changement de variable préliminaire.

2. On demandera de toutes façons que f soit holomorphe au voisinage de 0, donc ce sera le cas.

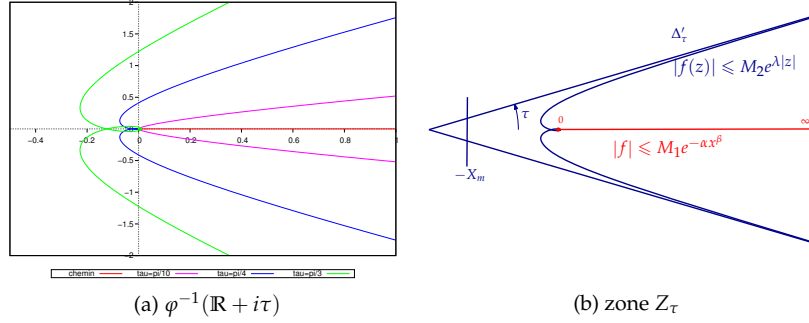


FIGURE 4: changement de variable $\varphi(t) = e^{t-\alpha e^{\beta t}}$.

Majorations On a pour $|\beta\tau| \leq \pi/2$

$$\varphi(x + i\tau) = e^{x+i\tau-\alpha e^{-\beta x-i\beta\tau}} \quad (57)$$

$$\varphi'(x + i\tau) = (1 + \alpha\beta e^{-\beta x-i\beta\tau})\varphi(x + i\tau) \quad (58)$$

donc

$$|\varphi(x + i\tau)| = e^{x-\alpha \cos(\beta\tau)e^{-\beta x}} \quad (59)$$

$$|\varphi'(x + i\tau)| \leq (1 + \alpha\beta \cos(\beta\tau)e^{-\beta x}) |\varphi(x + i\tau)| \quad (60)$$

$$\arg(\varphi(x + i\tau)) = \tau + \alpha \sin(\beta\tau)e^{-\beta x} \quad (61)$$

Lemme 3.6 (zone Z_τ). Soit $\tau \in [0, \frac{\pi}{2}[$, alors si l'on définit Z_τ comme un cône tronqué d'ouverture $\tau \in [0, \frac{\pi}{2}[$

$$Z_\tau = \left\{ z, \begin{array}{l} |\operatorname{Im}(z)| \leq \tan(\tau)(\operatorname{Re}(z) + \alpha) \\ \operatorname{Re}(z) + \rho_m \geq 0 \end{array} \right\},$$

où

$$\rho_m = \frac{\alpha \sin(\beta\tau)}{\frac{\pi}{2} - \tau} e^{-\frac{\frac{\pi}{2}-\tau}{\tan(\beta\tau)}}, \quad (62)$$

on a $\varphi(\Delta_\tau) \subset Z_\tau$ et $\lim_{\tau \rightarrow 0} Z_\tau = [0, \infty[$.

Démonstration : Étudions l'image par φ d'une bande Δ_τ :

$$\varphi(x + i\tau) = \rho e^{i\theta} \text{ avec } \begin{cases} \rho = e^{x-\alpha \cos(\beta\tau)e^{-\beta x}} \\ \theta = \tau + \alpha \sin(\beta\tau)e^{-\beta x} \end{cases}, \text{ donc pour } 0 < \beta\tau < \frac{\pi}{2}, \text{ la}$$

courbe obtenue est d'équation polaire :

$$\rho = \left(\frac{\alpha \sin(\beta\tau)}{\theta - \tau} \right)^{1/\beta} e^{-\frac{\theta-\tau}{\tan(\beta\tau)}}, \quad \theta > \tau. \quad (63)$$

On a une asymptote en $\theta = \tau$ et

$$\rho \sin(\theta - \tau) \sim_{\theta \rightarrow \tau} (\alpha \sin(\beta\tau))^{\frac{1}{\beta}} (\theta - \tau)^{1 - \frac{1}{\beta}}$$

par valeurs inférieures, donc

— si $\beta = 1$, on a une droite asymptote $y = x \tan \tau + \alpha$, et la courbe reste en dessous de cette asymptote ;

— si $\beta > 1$, la courbe est également en-dessous de cette courbe, et tend vers son asymptote $y = x \tan(\beta\tau)$.

Cette courbe est incluse dans le demi-cône $|y| \leq \tan \tau(x + \alpha)$.

On peut remarquer que, ρ étant décroissante en θ , les abscisses sont minorées par celles obtenues pour $\theta \in [\frac{\pi}{2}, \pi]$, donc on peut tronquer le cône aux valeurs d'abscisse supérieures à $-\rho_m = -\rho(\pi/2)$. \square

Remarque : Dans le changement de variable φ , il n'est pas nécessaire de choisir α égal au α de décroissance de f : si une valeur plus faible permet d'obtenir un angle τ meilleur, on pourra prendre un pas h plus grand. Il faut mesurer les deux effets : cette augmentation de h tend à faire diminuer n , d'un autre côté une diminution de α augmente la valeur de t_{\min} et donc le nombre de termes à sommer du côté négatif. L'influence de α est logarithmique, tandis que celle de τ est linéaire.

Ces observations fournissent le théorème suivant

Théorème 3.7. Soit $f :]0, \infty[\rightarrow \mathbb{C}$ une fonction vérifiant :

1. f possède un prolongement holomorphe sur un cône tronqué Z_τ , $\tau < \frac{\pi}{2}$;
2. $|f(z)| \leq M_2 e^{A|z|^\gamma}$ sur Z_τ ;
3. $|f(x)| \leq M_2 e^{-\alpha x^\beta}$ sur $[0, \infty[$;

pour des constantes $\alpha > 0$, $A \geq 0$ et $\beta > \gamma \geq 0$. Alors pour $D > 1$, si l'on choisit $t < \tau$ selon le théorème 2.14, en posant

- $h = \frac{2\pi t}{D + C_t + \log(4M_2 + 2e^{-D - C_t})}$
- $nh \geq \log L_{\alpha, \beta}(D + \log M) + \alpha e^{-\beta L_{\alpha, \beta}(D + \log M)}$

on a

$$\left| \int_{\mathbb{R}} f - h \sum_{k=-n}^n f(\varphi(kh)) \varphi'(kh) \right| \leq e^{-D}.$$

Démonstration : On suppose que $\beta \geq 1$; si ce n'est pas le cas, le changement de variable $x = u^k$, où $\frac{1}{k} \leq \beta$, nous y ramène au prix d'un terme polynomial ku^{k-1} . On pose $g(z) = f \circ \varphi(z) \times \varphi'(z)$.

Pas d'intégration D'après les majorations effectuées sur φ , et puisque $\beta \geq 1$ on a pour $x \geq 0$ les majorations grossières $|\varphi'(x + it)| \leq e^x + \alpha\beta$, et $|\varphi'(-x + it)| \leq \alpha\beta e^{\beta-1}x + 1$.

Enfin $|\varphi(x + it)| \leq e^x$, donc d'après (2) $g(x + it) \leq M_2(1 + \alpha\beta)e^{Ae^{\gamma x} + \lambda|x|}$ avec $\lambda = \max(1, \beta - 1)$.

De plus, sur \mathbb{R} , on a

en $-\infty$: $|f| \leq M_1$ donc $g(-x) \leq |\varphi'(-x)| \leq (1 + \alpha\beta e^{\beta x})e^{-x - \alpha e^{\beta x}} = O(e^{-\alpha' e^{\beta x}})$
pour tout $\alpha' < \alpha$.

en ∞ : $\varphi(x) \sim e^x$ donc $g(x) = O(e^{-\alpha' e^{\beta x}})$ pour tout $\alpha' < \alpha$.

Donc on peut appliquer le théorème 2.14 pour déterminer le pas h .

Troncature Enfin, on définit nh via le lemme 3.1, avec les estimations des restes intégraux suivantes :

— $\int_0^{\varphi(-x)} M_1 dt \leq M_1 \varphi(-x) = M_1 e^{-x - \alpha e^{\beta x}}$ donc pour une erreur de e^{-D} sur le reste $k < -n$ on pose $nh = \frac{1}{\beta} \log\left(\frac{D + \log M_1}{\alpha}\right)$.

— $\int_{\varphi(x)}^{\infty} e^{-\alpha t^{\beta}} dt \leq e^{-D}$ donne

$$\varphi(x) = e^{x - \alpha e^{-\beta x}} = L_{\alpha, \beta}(D + \log M_1).$$

En particulier $x \geq \log(L_{\alpha, \beta}(D + \log M_1))$, donc on pose $x = nh = \log L_{\alpha, \beta}(D + \log M) + \alpha e^{-\beta L_{\alpha, \beta}(D + \log M)} \sim \frac{1}{\beta} \log\left(\frac{D + \log M_1}{\alpha}\right)$. \square

3.3 Intervalle compact

Si l'intervalle est de la forme $[a, b]$, on effectue un changement de variable

$$z = \varphi(z') = \frac{b-a}{2} \tanh(\lambda \sinh(z')) + \frac{a+b}{2} \quad (64)$$

pour un paramètre $\lambda > 0$ que l'on déterminera.

Par la suite, on suppose que $[a, b] = [-1, 1]$.

On pose le changement de variable

$$\varphi'(z) = \frac{\lambda \cosh(\lambda z)}{\cosh^2(\lambda \sinh(z))}.$$

L'image de la bande Δ_τ a une forme de hamburger éventuellement tassé au sommet. En particulier les zéros de \cosh sont situés en $i\pi/2 + 2i\pi\mathbb{Z}$, ils ne sont pas atteints dans la zone Δ_τ pour $\tau < \frac{\pi}{2}$ et $\lambda \sin \tau < \frac{\pi}{2}$. On suppose ces inégalités vérifiées, ce qui assure que φ et φ' sont holomorphes sur Δ_τ .

Lemme 3.8 (zone Z_τ). *Pour tout $z' \in \Delta_\tau$ avec λ, τ vérifiant $\lambda \sin(\tau) < \frac{\pi}{2}$, si l'on choisit $Y_\tau \in]\lambda \sin \tau, \frac{\pi}{2}[$, en posant $X_\tau = \frac{\sqrt{Y_\tau^2 - \lambda^2 \sin^2 \tau}}{\tan \tau}$, on a :*

$$\begin{aligned} |\operatorname{Re}(\varphi(z'))| &\leq X_m = \max\left(\frac{\tanh X_\tau}{\cos^2(Y_\tau)}, \frac{1}{\tanh(X_\tau)}\right) \\ |\operatorname{Im}(\varphi(z'))| &\leq Y_m = \max\left(\tan(Y_\tau), \frac{1}{2 \sinh^2 X_\tau}\right). \end{aligned}$$

En particulier, pour $Y_\tau \rightarrow 0$ et $X_\tau \rightarrow \infty$, Z_τ converge vers le segment $[-1, 1]$.

On minimise X_m, Y_m en prenant pour Y_τ les solutions dans $]\lambda \sin \tau, \frac{\pi}{2}[$ de

$$\tanh(X_\tau) = \cos(Y_\tau) \quad \text{pour } X_m \quad (65)$$

$$2 \sinh^2(X_\tau) \tan(Y_\tau) = 1 \quad \text{pour } Y_m \quad (66)$$

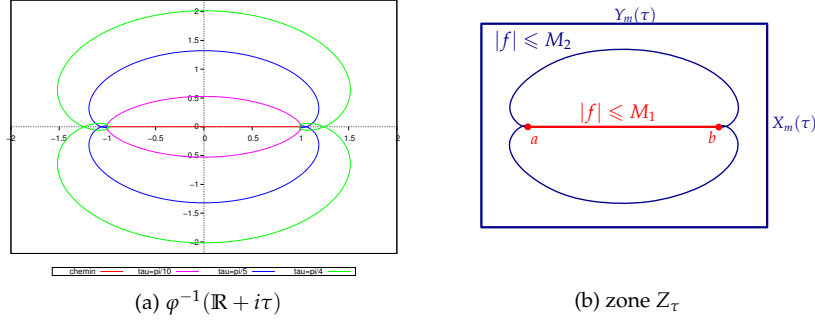


FIGURE 5: changement de variable $\varphi(t) = \tanh(\lambda \sinh t)$.

Remarque : Inversement, si l'on se donne des valeurs X_m et Y_m à ne pas dépasser, la détermination de X_τ et Y_τ par les équations

$$\tanh(X_\tau) = \frac{1}{X_m} \quad \text{et} \quad \cos(Y_\tau) = \frac{1}{X_m} \quad \text{d'une part,} \quad (67)$$

$$\sinh^2(X_\tau) = \frac{1}{2Y_m} \quad \text{et} \quad \tan(Y_\tau) = Y_m \quad \text{d'autre part} \quad (68)$$

et la relation

$$\tau = \text{Im}\left(\text{asinh}\left(\frac{X_\tau + iY_\tau}{\lambda}\right)\right)$$

permettent de choisir une bonne valeur de τ , si l'on impose λ . On remarque que par construction, la condition $\lambda \sin \tau < \frac{\pi}{2}$ est vérifiée puisque le fait que X_τ, Y_τ sont sur la courbe \mathcal{H}_τ donne $\frac{Y_\tau^2}{\sin^2 \tau} \geq \lambda^2$ et que l'on a $Y_\tau = \arccos\left(\frac{1}{X_m}\right) < \frac{\pi}{2}$.

Remarque : Le problème de minimisation possède des solutions uniques, puisque sur l'intervalle considéré, $X \in]0, X_{\frac{\pi}{2}}[$ et

- $\tanh(X)$ croît de 0 à $\tanh(X_{\frac{\pi}{2}}) > 0$ et $\cos(Y)$ décroît de $\cos(\sin \tau)$ à 0 ;
- $\sinh^2(X) \tan Y$, produit de deux fonctions croissantes, croît de 0 à ∞ .

On détermine aisément ces solutions par la méthode de Newton.

Démonstration du lemme 3.8 : On pose $\lambda \sinh(x + i\tau) = X + iY$ avec $Y = \tan \tau \sqrt{X^2 + \lambda^2 \cos^2 \tau} \in [X \tan \tau, X \tan \tau + \lambda \sin \tau]$.

Alors

$$\begin{aligned} \tanh(X + iY) &= \frac{\sinh X \cos Y + i \cosh X \sin Y}{\cosh X \cos Y + i \sinh X \sin Y} \\ &= \frac{\sinh X \cosh X + i \cos Y \sin Y}{\cosh^2 X \cos^2 Y + \sinh^2 X \sin^2 Y} \end{aligned} \quad (69a)$$

$$= \frac{\sinh X \cosh X + i \cos Y \sin Y}{\sinh^2 X + \cos^2 Y}. \quad (69b)$$

Par croissance de Y , et puisque $Y(0) = \lambda \sin(\tau) < \frac{\pi}{2}$, on déduit l'existence d'une valeur Y_τ annoncée.

On a

$$X_\tau = \frac{\sqrt{Y_\tau^2 - \lambda^2 \sin^2 \tau}}{\tan \tau}. \quad (70)$$

Alors, pour $X \in [0, X_\tau]$, $Y \leq Y_\tau < \frac{\pi}{2}$ donc d'après (69a)

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\varphi(z')) &\leq \frac{\sinh X \cosh X}{\cosh^2 X \cos^2 Y} \leq \frac{\tanh X_\tau}{\cos^2(Y_\tau)} \\ \operatorname{Im}(\varphi(z')) &\leq \frac{\cos Y \sin Y}{\cosh^2 X \cos^2 Y} \leq \tan Y_\tau \end{aligned}$$

et pour $X \in [X_\tau, \infty[$, d'après (69b)

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\varphi(z')) &\leq \frac{\sinh X \cosh X}{\sinh^2 X} \leq \frac{1}{\tanh(X_\tau)} \\ \operatorname{Im}(\varphi(z')) &\leq \frac{\cos Y \sin Y}{\sinh^2 X} \leq \frac{1}{2 \sinh^2 X_\tau} \end{aligned}$$

ce qui démontre l'encadrement annoncé. \square

Pas d'intégration Supposons que f est holomorphe et donc majorée sur Z_τ d'après le principe du maximum.

Pour étudier $\hat{g}_\tau(X)$, il suffit donc de majorer $\int_{\mathbb{R}} |\varphi'(t + i\tau)| dt$.

Or, en reprenant les notations X, Y ,

$$|\varphi'(t + i\tau)| = \left| \frac{\lambda \cosh(t + i\tau)}{\sinh^2(X) + \cos^2(Y)} \right| dt$$

soit, par le changement de variable $X = \lambda \cos \tau \sinh(t)$,

$$\int_{\mathbb{R}} |\varphi'(t + i\tau)| \leq 2 \int_0^\infty \frac{\lambda \cosh(t)}{\sinh^2(X) + \cos^2(Y)} \leq \frac{2}{\cos(\tau)} \int_0^\infty \frac{dX}{\sinh^2(X) + \cos^2(Y(X))}.$$

On sépare comme précédemment en une valeur $X_\tau > 0$ telle que $Y_\tau < \frac{\pi}{2}$

$$\begin{aligned} \int_0^{X_\tau} &\leq \int_0^{X_\tau} \frac{dX}{\cosh^2(X) \cos^2(Y)} \\ &\leq \frac{\tanh(X_\tau)}{\cos^2(Y_\tau)} \\ \int_{X_\tau}^\infty &\leq \int_{X_\tau}^\infty \frac{dX}{\sinh^2(X) + \cos^2(Y)} \\ &\leq \int_{X_\tau}^\infty \frac{dX}{\sinh^2(X)} \\ &= \frac{1}{\tanh(X_\tau)} - 1 < \frac{1}{\tanh(X_\tau)}. \end{aligned}$$

Égaliser les termes de cette dernière majoration nous ramène exactement à la forme (65), donc en séparant l'intégrale en la valeur X_τ , on obtient que chacune de ces intégrales est majorée par X_m .

Ainsi, $\int |\varphi'| \leq \frac{4X_m}{\cos(\tau)}$, et

$$\sum_{k \neq 0} \left| \hat{g}_\tau\left(\frac{k}{h}\right) \right| \leq \frac{8X_m M_2}{\cos \tau (e^{2\pi\tau/h} - 1)}.$$

Donc pour avoir

$$\sum_{|k| > 0} \hat{g}_\tau\left(\frac{k}{h}\right) \leq e^{-D}$$

on pose

$$h = \frac{2\pi\tau}{D + \log\left(\frac{8X_m M_2}{\cos \tau} + 1\right)}.$$

Borne de troncature

Lemme 3.9. Si $|f| \leq M_1$ sur $]a, b[$, on a

$$h \sum_{|k| > n} |g(kh)| \leq M_1 2e^{-2\lambda \sinh(nh)}.$$

Démonstration :

$$\begin{aligned} h \sum_{|k| > n} |g(kh)| &\leq h M_1 \int_{nh}^{\infty} \frac{\lambda \cosh(t)}{\cosh^2(\lambda \sinh(t))} dt \\ &\leq M_1 \int_{\lambda \sinh(nh)}^{\infty} \frac{dt}{\cosh^2 t} \\ &\leq M_1 2e^{-2\lambda \sinh(nh)}. \end{aligned}$$

□

On obtient donc le théorème :

Théorème 3.10. Soit f une fonction définie sur un intervalle $]a, b[$ et à valeurs dans \mathbb{C} . On suppose que

1. $|f| \leq M_1$ sur $]a, b[$;
2. f possède un prolongement holomorphe à un rectangle $R = \frac{a+b}{2} + [-X_m, X_m] + i[-Y_m, Y_m]$;
3. $|f| \leq M_2$ sur ∂R .

Alors pour tout $D > 0$, en posant

- $\lambda = \frac{\pi}{2}$ et τ tel que $\frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} Z_\tau \subset R$;
- $\varphi(t) = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \tanh(\lambda \sinh t)$;
- $h = \frac{2\pi\tau}{D + \log\left(\frac{2^4 X_m M_2}{\cos \tau} + 1\right)}$;

$$\begin{aligned}
& \text{--- } nh \geq \operatorname{asinh} \left(\frac{D + \log(2^3 M_1)}{\lambda} \right); \\
\text{on a} \quad & \left| \int_a^b f - h \sum_{k=-n}^n f(\varphi(kh)) \varphi'(kh) \right| < e^{-D} \tag{71}
\end{aligned}$$

et une convergence

$$n \ll \frac{(D + \log(\frac{X_m M_2}{\cos \tau})) \log(D)}{2\pi\tau}. \tag{72}$$

3.4 Hypothèses affaiblies

Dans ce paragraphe, on examine le comportement de la méthode double-exponentielle appliquée à une fonction f ayant décroissance simplement exponentielle, lorsque le théorème 3.3 ne s'applique pas — soit que f ne soit pas holomorphe sur un cône Z_τ , ou qu'elle ne possède pas une décroissance suffisante sur ce cône.

Ce cas se rencontre fréquemment lorsque le domaine d'holomorphie de f n'excède pas une bande Δ_τ .

Si la fonction f satisfait les hypothèses de la proposition 2.6 sur la bande Δ_τ , on sait que la méthode des trapèzes simple permettrait de l'intégrer avec $n(f, D) \ll \frac{D^{1+\frac{1}{\beta}}}{2\pi\tau}$ évaluations (proposition 2.1).

Avec des hypothèses à peine plus fortes (uniformité de la décroissance sur une bande), le théorème suivant montre que la transformation double-exponentielle ne fait perdre qu'un terme logarithmique sur le nombre d'évaluations, ce qui montre une certaine robustesse de la méthode vis-à-vis des hypothèses exigées.

Théorème 3.11. *Soit f une application telle que*

1. f possède un prolongement holomorphe sur une bande Δ_τ ;
2. $f(x + iy) \leq Me^{-\alpha|x|^\beta}$ uniformément en $y \in [-\tau, \tau]$;

alors en appliquant la méthode d'intégration double-exponentielle à f on obtient une complexité de $O(\frac{D^{\frac{\beta+1}{\beta}} \log D}{2\pi\tau})$ évaluations.

Démonstration : On détermine tout d'abord un domaine $\tilde{\Delta} \subset \mathbb{C}$ tel que $\sinh(\tilde{\Delta}) \subset \Delta_\tau$.

Pour $x > 0, y \in [0, \frac{\pi}{2}[$,

$$\begin{aligned}
\operatorname{Im}(\sinh(x + iy)) \leq \tau & \Leftrightarrow \cosh(x) \sin(y) \leq \tau \\
& \Leftrightarrow y \leq \arcsin\left(\frac{\tau}{\cosh(x)}\right).
\end{aligned}$$

La fonction \arcsin n'étant pas définie si $\tau > \frac{\pi}{2}$, on se contente de la majoration $\arcsin(x) \geq x$ pour définir

$$\tilde{\Delta} = \left\{ x + iy, |y| \leq \frac{\tau}{\cosh x} \right\}.$$

On réalise une intégration double-exponentielle de f avec le changement de variable $\varphi(z) = \sinh(z)$, en posant donc

$$g(z) = f(\sinh z) \cosh(z), z \in \tilde{\Delta}.$$

L'hypothèse (3) du théorème 2.11 n'étant pas vérifiée, c'est l'estimation de l'erreur de quadrature qui doit être adaptée aux nouvelles hypothèses.

Soit donc $X > 0$, on doit trouver une majoration du coefficient de Fourier

$$\hat{g}(X) = \int_{\mathbb{R}} e^{-2i\pi Xz} g(z) dz.$$

On décale désormais le chemin d'intégration à la courbe

$$z = \gamma(t) = t - i \frac{\tau}{\cosh t}, \gamma'(t) = 1 + i\tau \frac{\sinh t}{\cosh t}$$

en notant que d'après l'hypothèse 2,

$$|g(\gamma(t))| = |f(\text{sh}(\gamma(t))) \cosh(\gamma(t))| \leq M e^{-\alpha \cos(\frac{\tau}{\cosh(t)}) \sinh(t)} \text{ch}(t).$$

On en déduit donc

$$\begin{aligned} |\hat{g}(X)| &\leq \left| \int_{\mathbb{R}} e^{-\frac{2\pi X\tau}{\cosh t}} e^{-2i\pi X t} g(\gamma(t)) \gamma'(t) dt \right| \\ &\leq 2M(1 + \tau) \int_0^\infty \underbrace{e^{-2\pi X\tau e^{-t}}}_{\varphi_1(t)} \underbrace{e^{-\alpha(\cos \tau)^\beta (\sinh t)^\beta} \cosh(t)}_{\varphi_2(t)} dt. \end{aligned}$$

On sépare cette intégrale en deux en une valeur $T > 0$:

$$\begin{cases} \varphi_1(t) \leq e^{-2\pi X\tau e^{-T}} \text{ sur } [0, T] \\ \int_0^T \varphi_2(t) dt = \int_0^{\sinh T} e^{-\alpha(\cos \tau)^\beta u^\beta} du \leq \frac{1}{\alpha^{1/\beta} \cos \tau} \frac{\Gamma(1/\beta)}{\beta} \end{cases} \quad (73)$$

$$\begin{cases} \varphi_1(t) \leq 1 \text{ sur } [T, \infty] \\ \int_T^\infty \varphi_2(t) dt = \int_{\sinh T}^\infty e^{-\alpha(\cos \tau)^\beta u^\beta} du \leq \frac{e^{-\alpha e^{\beta T}}}{\alpha\beta} \text{ si } \beta \geq 1. \end{cases} \quad (74)$$

$$\begin{aligned} \int_0^T e^{-2\pi X\tau e^{-t}} e^{-\alpha(\cos \tau)^\beta (\text{sh } t)^\beta} dt &\leq e^{-2\pi X\tau e^{-T}} \int_0^{\text{sh } T} e^{-\alpha(\cos \tau)^\beta u^\beta} du \\ &\leq e^{-2\pi X\tau e^{-T}} \frac{1}{\alpha\beta} \text{ d'une part;} \\ \int_T^\infty e^{-2\pi X\tau e^{-t}} e^{-\alpha e^{\beta t}} dt &\leq \int_T^\infty e^{-\alpha e^{\beta t}} dt \\ &\leq \frac{e^{-\alpha e^{\beta T}}}{\alpha\beta} \text{ d'autre part.} \end{aligned}$$

Ces termes sont égaux pour

$$T = \frac{1}{\beta + 1} \log\left(\frac{2\pi X\tau}{\alpha}\right)$$

et dans ce cas,

$$|\hat{g}(X)| \leq \frac{2M(1+\tau)}{\alpha\beta} e^{-\left(\frac{2\pi X\tau}{h}\right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}}. \quad (75)$$

Il reste à majorer la somme de ces termes :

$$\sum_{k \geq 1} e^{-\left(\frac{k2\pi\tau}{h}\right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}} \leq e^{-\left(\frac{2\pi\tau}{h}\right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}} + \int_1^\infty e^{-\left(\frac{t2\pi\tau}{h}\right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}} dt. \quad (76)$$

Par un changement de variable $t = \frac{h}{2\pi\tau} u^{\frac{\beta+1}{\beta}}$, l'intégrale s'écrit

$$\frac{h(\beta+1)}{2\pi\tau\beta} \int_{\left(\frac{2\pi\tau}{h}\right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}}^\infty u^{\frac{1}{\beta}} e^{-u} du = \Gamma_{\text{inc}}\left(1 + \frac{1}{\beta}, \left(\frac{2\pi\tau}{h}\right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}\right)$$

où Γ_{inc} désigne la fonction Gamma incomplète.

En utilisant la majoration 13 pour $s = \frac{1}{\beta}$ et $x = \left(\frac{2\pi\tau}{h}\right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}$, et en supposant h assez petit pour que $\frac{x}{s} > 2$ de sorte que $(1 - \frac{s}{x})^{-1} \leq 2$, l'intégrale est majorée par $2\left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{1}{\beta+1}} e^{-\left(\frac{2\pi\tau}{h}\right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}}$.

Donc la somme des (75) vérifie

$$\sum_{k \geq 1} \left| \hat{g}\left(\frac{k}{h}\right) \right| \leq \frac{2M(1+\tau)}{\alpha\beta} \left[2\left(\frac{2\pi\tau}{h}\right)^{\frac{1}{\beta+1}} + 1 \right] e^{-\left(\frac{2\pi\tau}{h}\right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}}$$

ce qui permet de définir h précisément. On a en tous cas

$$h(D) \sim \frac{D^{\frac{\beta+1}{\beta}}}{2\pi\tau}$$

ce qui démontre l'énoncé de complexité. \square

3.5 Cas des fonctions oscillantes quasi-périodiques

Les idées présentées jusqu'ici ne permettent pas d'intégrer des fonctions qui présentent des oscillations symétriques, dont l'archétype est l'intégrale

$$\int_{\mathbb{R}} \frac{\sin(t)}{t} dt \quad (77)$$

mentionnée dans l'introduction.

La décroissance d'ordre polynomial invite à un changement de variable en $t \mapsto \sinh(\sinh(t))$, mais un tel changement de variable est interdit par la croissance exponentielle de sinus dans la direction imaginaire.

Nous présentons ici, avec l'approche géométrique et le formalisme que nous avons adoptés, une stratégie dont le principe est dû à Ooura [OM99], et qui permet de calculer avec une complexité quasi-linéaire les intégrales faisant intervenir des fonctions périodiques.

L'idée est de tirer parti non plus de la décroissance de g mais de ses zéros régulièrement espacés pour réduire le terme d'erreur de troncature dans la formule de Poisson.

Supposons en effet qu'il existe une période $\omega > 0$ telle que l'intégrande g satisfasse

$$g(k/\omega) = 0, k \in \mathbb{Z}.$$

Alors si l'on choisit une famille de changements de variable $\varphi_h : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ dépendants de $h > 0$ et tels que

$$|\varphi_h(lh) - l/\omega| \ll e^{-\alpha e^{\beta lh}},$$

les accroissements finis donnent une majoration exponentiellement décroissante de la somme

$$\sum_{|l|>n} |g(\varphi_h(lh))|.$$

Il est d'autre part nécessaire que φ_h possède une dynamique raisonnable en h afin de pouvoir majorer les transformées de Fourier, et plus précisément qu'il existe une zone Z_τ telle qu'on ait de manière uniforme en h

$$\varphi_h(\Delta_\tau) \subset Z_\tau.$$

Il est naturel de poser

$$\varphi_h(x) = \frac{x}{\omega h + e^{-\alpha} \cosh x} \quad (78)$$

pour vérifier la première condition, mais ce type de fonction prend des valeurs imaginaires d'ordre $\frac{\tau}{\omega h}$ en $x = \log 1/h + i\tau$. On résout ce problème en retardant par un facteur h le terme exponentiel tout en maintenant une décroissance initiale, ce qui mène à considérer plutôt un changement de la forme

$$\varphi_h(x) = \frac{x}{\omega h + e^{-x-\alpha h} \cosh x}. \quad (79)$$

Appuyés par des arguments heuristiques, Ooura et Mori considèrent des corrections plus légères de type

$$\varphi_h(x) = \frac{x}{\omega h + e^{-\gamma x - \alpha \sqrt{h \log(1/h)}} \cosh x} \quad (80)$$

Le cas des intégrations sur $[0, \infty[$ s'obtient en remplaçant le sinus hyperbolique par un cosinus hyperbolique. Nous nous contentons ici d'illustrer graphiquement l'effet de ces changements de variables dans la figure 6 (dans l'ordre sont représentés (78), (79) et (80)).

Ces graphiques donnent l'intuition du comportement de l'intégration de fonctions périodiques par cette méthode. Une étude rigoureuse de la dynamique complexe de cette famille de changements de variables permettrait d'obtenir des résultats de convergence parfaitement explicites. Elle s'annonce toutefois délicate à mener.

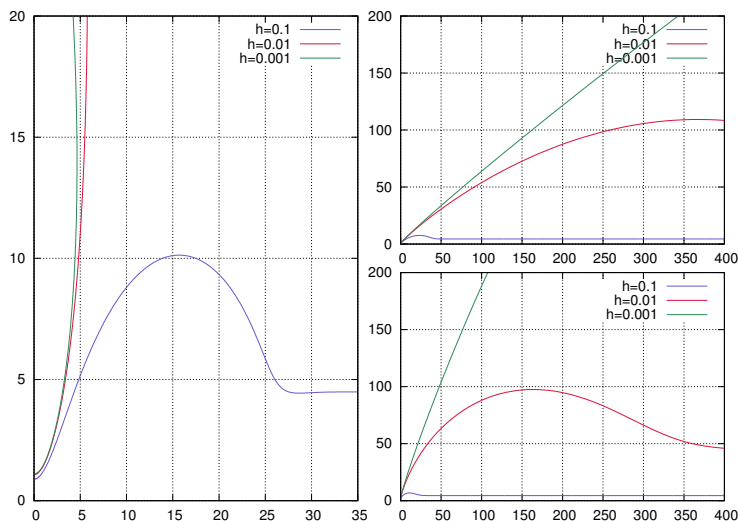


FIGURE 6: Dynamique de $\varphi_h(\mathbb{R} + i\tau)$ en $\tau = \pi/7$.

4 Stratégies d'application concrète

4.1 En résumé

L'application de la méthode des trapèzes à une fonction f , passée ou non au travers de la dynamique d'un changement de variable, se lit sur les variations de f .

- Dans la direction radiale, la décroissance de f donne la longueur d'intégration. Cette longueur sera exponentielle, linéaire ou logarithmique en la précision si f décroît de manière polynomiale, exponentielle ou doublement exponentielle.
- Le pas d'intégration se lit dans la direction transverse. Si f y reste bornée sur une zone de largeur ou d'écartement τ , le pas d'intégration peut être choisi d'ordre τ/D .

Le choix d'un changement de variable se fait à la lumière de ces deux paramètres, et de leur influence mutuelle.

La mise en œuvre d'une intégration rigoureuse d'une fonction f consiste en les étapes suivantes

1. déterminer une zone d'holomorphic de la fonction, sur laquelle elle est bornée ou à croissance modérée, et choisir un changement de variable en conséquence. Cette étape ne peut être entièrement automatisée, mais une connaissance sommaire du comportement de la fonction suffit en pratique ;
2. choisir les valeurs des paramètres α , β et τ , et calculer les valeurs des constantes M_1 et M_2 . Quelques tracés du module de f suffisent à les

déterminer heuristiquement.

3. appeler l'intégration avec les paramètres adéquats.

Des exemples détaillés sont illustrés dans [Mol10b], nous nous contentons d'insister ici sur quelques points remarquables.

4.2 Prendre en compte les résidus

Considérons l'exemple de l'intégrale

$$\int_{\mathbb{R}} \frac{dx}{1+x^2} \quad (81)$$

qui permet de saisir la précision de notre étude.

L'intégrande est à décroissance polynomiale, et le domaine d'holomorphic requis est le plan complexe privé des pôles $\pm i$. Cette situation relève du théorème 3.10, et ces singularités sont précisément évitées par Z_τ quelle que soit la valeur $\tau < \frac{\pi}{2}$. La convergence est donc d'ordre $\frac{D \log D}{\pi^2}$, et dans la pratique le calcul de 1000 chiffres significatifs nécessite moins de 2000 points.

Mais si l'on s'écarte légèrement de ce trop bel exemple, la théorie permet de comprendre pourquoi l'évaluation de

$$\int_{\mathbb{R}} \frac{dx}{1+(x+10)^2} \quad (82)$$

donne de très mauvais résultats dans les systèmes de calcul reposant sur la transformation double-exponentielle : avec gp le résultat est faux dès la dixième décimale, sous Maple l'intégration prend plusieurs minutes.

En effet, les pôles ainsi décalés en $10 \pm i$ ne sont évités que pour de très petites valeurs de τ . Si l'on détermine une valeur convenable, le théorème s'applique, mais pour 1000 chiffres, il faut à présent 100000 points.

En utilisant les corrections démontrées dans le lemme 2.21, sur les pôles de la forme $z = a \sinh(\varepsilon_k \sinh(\rho) + ik\pi)$, $k \in \mathbb{Z}$, avec des résidus $\mp \frac{i}{2}$, le résultat calculé avec 2000 points est parfaitement correct.

4.3 Décaler le chemin

Pour une fonction donnée, la décroissance de sa transformée de Fourier est directement liée à la largeur d'holomorphic de part et d'autre de l'axe d'intégration. Or si lors de la sommation on peut prendre en compte une inhomogénéité de la décroissance de f selon les axes positifs et négatifs, l'erreur de quadrature sera liée à la plus grande des valeurs $\hat{g}(\frac{1}{h})$ ou $\hat{g}(-\frac{1}{h})$. L'erreur est donc minimale quand ces valeurs sont comparables.

Ainsi, si g possède une bande d'holomorphic bornée non symétrique autour de l'axe réel, il est très avantageux de décaler le chemin pour se situer exactement au milieu de cette bande. On retrouve là le principe de la méthode du col : une intégrale complexe a intérêt à être évaluée selon un chemin de plus grande décroissance.

4.3.1 exemple : la fonction Gamma

On intègre la fonction Γ sur la droite $\text{Re}(s) = 1$:

$$\int_{\mathbb{R}} \Gamma(\delta + it) dt. \quad (83)$$

La formule de Stirling démontre les estimations de croissance suivantes :

— sur les droites verticales

$$\log |\Gamma(\delta + it)| \sim -\frac{\pi}{2} |t|; \quad (84)$$

— et sur les rayons $\theta \neq 0$

$$\log |\Gamma(\delta + ire^{i\theta})| \sim -\sin(\theta)r \log r. \quad (85)$$

Ainsi, $f(z) = \Gamma(\delta + iz)$ a une décroissance de nature simplement exponentielle sur l'axe réel, mais le changement de variable $z = \sinh(z')$ prescrit par la méthode générale ne permet pas d'obtenir la convergence attendue puisque f a une croissance exponentielle dans la partie inférieure de tout cône épaissi C_τ , $\tau > 0$.

En particulier, g n'est pas L^2 sur les droites $\mathbb{R} - i\tau$ pour $\tau > 0$, donc d'après la proposition 2.4, \hat{g} a une décroissance au plus sous-exponentielle pour les valeurs positives. Le théorème 3.11 permet d'expliquer une convergence en D^2 . Toutefois, nous obtenons expérimentalement une convergence quasi-linéaire. Ce fait remarquable s'explique par une estimation *ad hoc* des transformées de Fourier : dans [Mol10a] on démontre à l'aide d'estimations sur un contour adapté une décroissance du type

$$\log |\hat{g}(X)| \ll \frac{\pi^2 X}{\log(1 + \frac{2\pi X}{\log X})},$$

ce qui permet d'affirmer une convergence de la méthode double-exponentielle utilisant

$$\frac{D \log(D)^2}{\pi^2}$$

évaluations.

La figure 7 montre la précision de cette estimation ; elle illustre aussi les effets de divers autres schémas d'intégration que suggèrent les théories développées ici :

1. Si l'on ne réalise aucun changement de variable, on intègre une fonction à décroissance $e^{-\frac{\pi}{2}t}$, et qui possède une bande d'holomorphic limitée seulement par les pôle en $-\mathbb{N}$, donc de largeur δ . On obtient donc une convergence en $\frac{2D}{\pi} \cdot \frac{D}{2\pi\delta}$, d'autant meilleure que δ augmente. La figure 7 présente les valeurs $\delta = 3$ et $\delta = 8$.

2. Avec un changement de variable double-exponentiel en \sinh , on observe la convergence de type quasi-linéaire a priori étonnante, mais que nous avons expliquée ci-dessus.
3. On peut aussi chercher la décroissance de la fonction gamma à gauche de la droite d'intégration, en intégrant selon les valeurs de $\delta + i \sinh(t + i\theta)$. Selon la valeur de θ , on aura un cône d'holomorphic d'ouverture $\min(\theta, \frac{\pi}{2} - \theta)$ sur lequel on peut appliquer le théorème 3.3. En prenant $\theta = \frac{\pi}{4}$, on obtient une convergence en $\frac{2D \log D}{\pi^2}$: c'est là la manière la plus efficace de calculer l'intégrale.

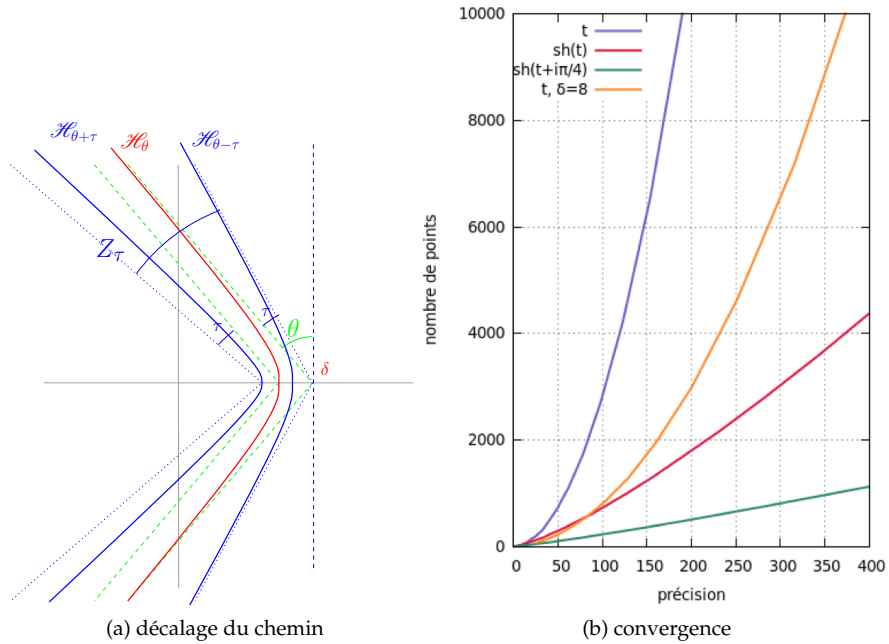


FIGURE 7: intégration de $\Gamma(\delta + iz)$.

Cette observation permet de résoudre le problème posé par l'intégration de la fonction gamma sur une droite verticale (83). Un décalage d'un angle $+i\theta$ avec $\theta \in]0, \frac{\pi}{2}[$ après transformation par \sinh permet d'obtenir facilement une décroissance en $e^{-2\pi\theta x}$ de la transformée de Fourier selon les x positifs, et en $e^{-2\pi(\frac{\pi}{2}-\theta)|x|}$ sur l'axe négatif. Pour $\theta = \frac{\pi}{4}$ on obtient une complexité de

$$\frac{2D \log D}{\pi}$$

évaluations.

Cette méthode est d'autant meilleure pour l'intégration de gamma que par ce décalage on se situe sur un chemin où la décroissance de la fonction est amplifiée.

4.3.2 exemple : oscillations

Considérons par ailleurs l'exemple de la fonction

$$g(z) = \exp(-2\alpha \cosh(\beta z) + i \cosh(\gamma z)).$$

Le théorème 2.14 ne permet de considérer que le cas de valeurs $\gamma < \beta$, c'est-à-dire d'une décroissance plus forte que les oscillations.

Dans le cas contraire, les oscillations rendent la quadrature très mauvaise, ce qui se traduit par l'explosion de la fonction g hors de l'axe. Toutefois dans cet exemple l'explosion est anisotrope, et la fonction $g(x + i\tau)$ reste petite au voisinage de l'axe quand x et τ sont de même signe. Et dans ce cas, on dispose d'une bande de décroissance pour les valeurs $|\tau| \in [0, \frac{\pi}{2\gamma}[$.

Avec les valeurs $\beta = 1$ et $\gamma = 2$, nous pouvons exploiter donc ce fait en parcourant le chemin

$$z = \varphi(t) = t + i \frac{\pi}{4} \tanh(t).$$

Ce décalage apporte des gains énormes : pour l'obtention de 50 chiffres corrects, on passe de plus de 50 000 à seulement 70 évaluations (cf. [Mol10b]).

4.4 Subdivisions

Enfin, il peut être très avantageux de couper l'intervalle d'intégration en plusieurs morceaux, dès lors que la plus petite valeur de τ sur les morceaux divisée par leur nombre excède la valeur τ correspondant à l'intervalle tout entier.

Par exemple, l'intégrale $\int_{-10}^{10} \frac{dt}{\sqrt{x-1}}$ peut être évaluée selon le théorème 3.10, avec une largeur d'holomorphie $\tau_1 = 0.063$. Si l'on écrit cette intégrale comme $\int_{-10}^0 + \int_0^{10}$, on obtient $\frac{\tau_2}{2} = 0.21$.

Bien entendu, les subdivisions sont rigoureusement nécessaires dans le cas de fonctions définies par morceaux.

4.5 Exemple : fonction gamma incomplète

Pour finir, nous traitons un exemple complet, celui de la fonction

$$\Gamma_{\text{inc}}(s, x) = \int_x^{\infty} t^s e^{-t} \frac{dt}{t}$$

où s, x sont des nombres complexes tels que $x \notin \mathbb{R}_-$ ou $\text{Re}(s) > 0$, et le chemin d'intégration est la demi-droite positive issue de x .

L'intégrande $f(z) = e^{(s-1)\log(z)-z}$ possède une singularité en 0, qui doit donc se trouver en dehors d'une zone Z_τ issue de x . Elle a en outre une décroissance exponentielle de paramètres $\alpha = \cos \theta$ et $\beta = 1$ sur tout rayon $X + re^{i\theta}$.

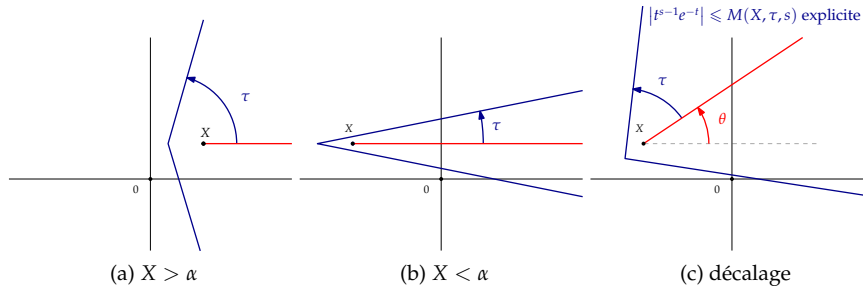


FIGURE 8: Zone d'holomorphie pour la fonction gamma incomplète.

4.5.1 Ouverture τ et décalage éventuel

Supposons $\text{Im}(X) > 0$. En considérant pour zone Z_τ un cône d'ouverture τ issu de $X - \alpha$, on évite le point 0 à condition que $\text{Re}(X) > \alpha$, ou que

$$\tan \tau < \frac{\text{Im}(X)}{\alpha - \text{Re}(X)}.$$

Dans le premier cas, la décroissance exponentielle de l'intégrande permet de choisir une ouverture τ arbitrairement proche de $\frac{\pi}{2}$. Dans le second, la valeur limite $\tau < \arctan\left(\frac{\text{Im}(X)}{\alpha - \text{Re}(X)}\right)$ peut devenir très faible, et rendre l'intégration très longue. Il est alors judicieux d'effectuer un décalage de la demi-droite d'intégration d'un angle θ pour rendre la situation plus symétrique et obtenir une valeur de τ proche de $\frac{\pi}{4}$ dans le pire des cas. La figure 8 illustre ces différentes situations.

4.5.2 Majoration sur Z_τ

Donnons une majoration de f sur une demi-droite $R_\theta = \{x + iy + re^{i\theta}, r \geq 0\}$, que l'on suppose passer au-dessus de l'origine.

En posant $z_r = x + iy + re^{i\theta}$, on majore $\text{Re}((s-1) \log z_r - z_r)$ par

$$\underbrace{\sup_{r \geq 0} \{-\text{Im}(s) \arg(z_r) - \lambda r\}}_{S_1} + \underbrace{\sup_{r \geq 0} \{\text{Re}(s-1) \log |z_r| - \mu r\}}_{S_2} - x,$$

où l'on décompose $\cos \theta$ sous la forme $\cos \theta = \lambda + \mu$ avec $\lambda, \mu > 0$.

Majorant S_1 : On détermine tout d'abord l'argument de z_r . Supposons que la droite (z_r) soit au-dessus de l'origine. Par une rotation d'angle $-(\frac{\pi}{2} + \theta)$, on ramène le point $x + iy = z_0$ à droite de l'origine, avec des coordonnées

$$\begin{cases} x_0 &= -x \sin \theta + y \cos \theta \\ y_0 &= -x \cos \theta - y \sin \theta \end{cases}$$

vérifiant $x_0 > 0$ par hypothèse. Avec cette rotation, le point $z_r e^{-i(\frac{\pi}{2}+\theta)}$ est de la forme $x_0 + i(y_0 - r)$, et son argument vaut $\arctan(\frac{y_0-r}{x_0})$. Avec la rotation inverse, le point z_r a donc pour argument $\frac{\pi}{2} + \theta + \arctan(\frac{y_0-r}{x_0})$. Cet argument est compris entre les valeurs θ et $\frac{\pi}{2} + \theta + \arctan(\frac{y_0}{x_0})$.

Ainsi, le supremum S_1 est atteint en $r = 0$ ou en une éventuelle solution positive de

$$\frac{\operatorname{Im}(s)x_0}{x_0^2 + (y_0 - r)^2} = \lambda.$$

Dans le cas où la droite (z_r) passe sous l'origine (soit $x_0 < 0$), il faut plutôt considérer la rotation la rotation d'angle $\frac{\pi}{2} - \theta$, ce qui donne la demi-droite formée des $z_r e^{i(\frac{\pi}{2}-\theta)} = -x_0 - iy_0 + ir$. Les signes négatifs se factorisent en début d'expression, si bien qu'en remplaçant s par son conjugué on garde les mêmes expressions.

Majorant S_2 : Avec les valeurs x_0, y_0 introduites ci-dessus, $|z_r|^2 = x_0^2 + y_0^2 - 2ry_0 + r^2$, donc le supremum S_2 est atteint en $r = 0$ ou en une des éventuelles racines positives de

$$\frac{\operatorname{Re}(s) - 1}{2} \frac{-2y_0 + 2r}{r^2 - 2ry_0 + x_0^2 + y_0^2} = \mu$$

soit

$$r^2 - 2r(y_0 + 2\frac{\operatorname{Re}(s) - 1}{2\mu}) + x_0^2 + y_0^2 + \frac{\operatorname{Re}(s) - 1}{\mu}y_0 = 0.$$

Ainsi, pour toute décomposition $\cos \theta = \lambda + \mu$, on détermine un majorant

$$\log M_2 = S_1 + S_2 - x$$

de $\log |f|$ sur R_θ . Cette majoration est valable sur tout le cône Z_τ , et permet d'appliquer le théorème 3.7, en adoptant une précision de calcul tenant compte de la majoration M_2 . Ce qui démontre le théorème 1.6.

5 Conclusion

La méthode double-exponentielle a acquis une certaine notoriété pour la rapidité de sa convergence. Elle a cependant une réputation de méthode un peu magique, que trente ans d'études un peu trop heuristiques ont confortée : cette réputation l'éloigne souvent des besoins de calcul prouvé. La simplicité de la théorie développée ici, ainsi que la précision des paramètres démontrés ont pour vocation de rendre son usage plus aisé et plus fréquent.

5.1 Implantation

Diverses implantations automatisées de la méthode existent (en particulier celles de Maple, Mathematica ou PARI/gp) : ou bien elles ne garantissent rien du tout, ou bien elles estiment la convergence de manière heuristique par diminution de pas.

Dans les situations d'intégrations spécifiques dont les paramètres sont connus, ce travail permet de trouver une stratégie optimale et de garantir le résultat obtenu. Toutes les estimations de cet article, ainsi que de nombreuses routines annexes, ont été traduites en langage gp et sont disponibles sur [Mol10b].

Ce travail ne fournit pas en revanche d'heuristique qui permette de reconnaître automatiquement la nature de l'intégrale et de choisir le changement de variable le plus adapté. Ce type de comportement généraliste est dual de la visée d'intégration prouvée que nous avons adoptée. Pourtant les résultats présentés ici peuvent aussi être utilisés dans ce sens, dans la mesure où nous avons ramené le choix des paramètres d'intégration à de simples questions de bornes sur des contours, qui peuvent être estimées assez précisément de manière automatique. Nous avons programmé certaines fonctions à cette fin.

6 Formulaire

Les changements de variable faisant fréquemment intervenir les fonctions hyperboliques, on en donne ici quelques propriétés.

Pour tous complexes x, τ :

$$\sinh(x + i\tau) = \sinh(x) \cos(\tau) + i \cosh(x) \sin(\tau); \quad (86)$$

$$\cosh(x + i\tau) = \cosh(x) \cos(\tau) + i \sinh(x) \sin(\tau). \quad (87)$$

Ainsi, la courbe paramétrée par $x \mapsto \sinh(x + i\tau)$ suit une hyperbole que l'on notera par la suite \mathcal{H}_τ , d'équation cartésienne

$$\mathcal{H}_\tau : Y^2 - \tan^2 \tau X^2 = \sin^2 \tau \quad (88)$$

soit

$$Y = \tan \tau \sqrt{X^2 + \cos^2 \tau}.$$

Il est commode d'écrire un paramétrage mesurant l'écart aux asymptotes $Y = |X| \tan \tau$ sous la forme

$$\begin{aligned} \sinh(x + i\theta) &= \sinh(x) \cos(\theta) + i \cosh(x) \sin(\theta) \\ &= \sinh(x) e^{i\theta} + i e^{-x} \sin \theta \end{aligned}$$

où $e^{-x} \sin \theta$ est le terme d'écart.

Pour tous réels x, τ ,

$$|\sinh(x)| \leq |\sinh(x + i\tau)| = \sqrt{\sin^2(\tau) + \sinh^2(x)} \leq \cosh(x); \quad (89)$$

$$|\sinh(x)| \leq |\cosh(x + i\tau)| = \sqrt{\cos^2(\tau) + \sinh^2(x)} \leq \cosh(x). \quad (90)$$

Références

- [Hör91] Lars Hörmander. A uniqueness theorem of Beurling for Fourier transform pairs. *Ark. Mat.*, 29(2) :237–240, 1991.
- [IK04] Henryk Iwaniec and Emmanuel Kowalski. *Analytic number theory*, volume 53 of *American Mathematical Society Colloquium Publications*. American Mathematical Society, Providence, RI, 2004.
- [Mol] Pascal Molin. Multi-precision computation of the complex error function.
- [Mol10a] Pascal Molin. *Intégration numérique et calculs de fonctions L*. PhD thesis, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 10 2010.
- [Mol10b] Pascal Molin. Intégration numérique par la méthode double-exponentielle : code et exemples, 2010. Available from <http://webusers.imj-prg.fr/~pascal.molin/>.
- [OM99] Takuya Ooura and Masatake Mori. A robust double exponential formula for fourier-type integrals. *J. Comput. Appl. Math.*, 112 :229–241, November 1999.
- [PW87] Raymond E. A. C. Paley and Norbert Wiener. *Fourier transforms in the complex domain*, volume 19 of *American Mathematical Society Colloquium Publications*. American Mathematical Society, Providence, RI, 1987. Reprint of the 1934 original.
- [Sug97] Masaaki Sugihara. Optimality of the double exponential formula—functional analysis approach. *Numer. Math.*, 75(3) :379–395, 1997.
- [Tit39] E. C. Titchmarsh. *The theory of Functions*. Oxford University Press, New York, second edition, 1939. Edited and with a preface by D. R. Heath-Brown.
- [TM73] Hidetosi Takahasi and Masatake Mori. Double exponential formulas for numerical integration. *Kyoto University. Research Institute for Mathematical Sciences. Publications*, 9 :721–741, 1973.
- [TSMM09] Ken’ichiro Tanaka, Masaaki Sugihara, Kazuo Murota, and Masatake Mori. Function classes for double exponential integration formulas. *Numer. Math.*, 111(4) :631–655, 2009.