

La fonction zêta de Riemann

Amaury Martiny

8 juin 2019

Résumé

This is the paper's abstract ...

Table des matières

1	Les nombres premiers	3
1.1	Un peu d'histoire	3
1.2	Quelques premiers résultats	3
1.3	Tchebychev et ses fonctions	3
1.4	Les méthodes du crible	3
2	Notre boîte à outils pour l'analyse	4
2.1	Outils d'analyse réelle	4
2.1.1	La sommation d'Abel	4
2.1.2	Formule d'Euler-Maclaurin	5
2.2	Outils d'analyse complexe	5
2.2.1	La fonction Γ d'Euler	5
2.2.2	Séries de Dirichlet	5
2.2.3	Formule de Perron	5
3	La fonction ζ de Riemann	8
3.1	Lien avec les nombres premiers	8
3.2	Quelques propriétés de ζ	9
3.2.1	Dérivées successives	10
3.2.2	Expression de $\ln \zeta$ et fonction de van Mangoldt	11
3.2.3	Expression intégrale	12
3.3	Equation fonctionnelle	12
3.4	Prolongement et propriétés sur la bande critique	12
3.5	Prolongement à $\mathbb{C} \setminus \{1\}$	14
3.5.1	Par la formule d'Euler-Maclaurin	14
3.5.2	Par un contour de Hankel	16
3.5.3	Par l'équation fonctionnelle	16
3.6	Localisation des zéros	16
3.6.1	Répartition globale des zéros	18
4	Le théorème des nombres premiers	19
4.1	Région affaiblie sans zéros	19
4.2	Région classique sans zéros	22
4.3	Enoncé avec $\pi(x)$	24

4.4	L'hypothèse de Riemann	25
4.5	Formule explicite pour ψ	25

Chapitre 1

Les nombres premiers

1.1 Un peu d'histoire

1.2 Quelques premiers résultats

Mertens, $\sum_p \frac{\ln p}{p}$

1.3 Tchebychev et ses fonctions

Nous introduisons ici les fonctions de Tchebychev, car elles vont nous suivre dans toute la suite de ce rapport.

Définition 1.3.1 (Fonctions de Tchebychev). *Pour $x \in \mathbb{R}$,*

$$\theta(x) = \sum_{p \leq x} \log p$$

1.4 Les méthodes du crible

Chapitre 2

Notre boîte à outils pour l'analyse

TODO Série de Dirichlet

2.1 Outils d'analyse réelle

2.1.1 La sommation d'Abel

Nous allons utiliser à plusieurs reprises la formule d'Abel. Elle fournit une comparaison assez précise entre somme et intégrale.

Lemme 2.1.1. *Soit $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite numérique réelle, et $A(x) := \sum_{n \leq x} a_n$. On se donne également une fonction f de classe C^1 . Alors :*

$$\forall y > x \geq 0, \quad \sum_{x < n \leq y} a_n f(n) = A(y)f(y) - A(x)f(x) - \int_x^y A(t)f'(t)dt$$

Démonstration. On remarque que A est en escalier, donc pour tout $n \geq 0$,

$$\int_n^{n+1} A(t)f'(t)dt = A(n) \int_n^{n+1} f'(t)dt = A(n)(f(n+1) - f(n)).$$

Posons $M = |x|$ et $N = |y|$, alors

$$\begin{aligned}
\int_x^y A(t)f'(t)dt &= \sum_{n=M}^{N-1} \int_n^{n+1} A(t)f'(t)dt \\
&= \sum_{n=M}^{N-1} A(n)(f(n+1) - f(n)) \\
&= \sum_{n=M+1}^N f(n)(A(n) - A(n-1)) - A(N)f(N) + A(M)f(M) \\
&= \sum_{n=M+1}^N f(n)a_n - A(N)f(N) + A(M)f(M)
\end{aligned}$$

D'où la formule quand x et y sont entiers. Pour la formule générale on observe que :

$$-\int_{|x|}^x A(t)f'(t)dt = A(|x|)(f(x) - f(|x|)) = A(x)(f(x) - f(|x|)).$$

□

2.1.2 Formule d'Euler-Maclaurin

Théorème 2.1.2. *Pour tout entier $k \geq 0$ et toute fonction f de classe C^r sur $[a, b]$, $a, b \in \mathbb{Z}$, on a*

$$\begin{aligned}
\sum_{n=a}^b f(n) &= \int_a^b f(t)dt + \frac{f(a) + f(b)}{2} + \sum_{k=2}^r \frac{b_k}{k!} (f^{(k-1)}(b) - f^{(k-1)}(a)) \\
&\quad + \frac{(-1)^{r+1}}{r!} \int_a^b B_r(t)f^{(r)}(t)dt
\end{aligned}$$

Les b_n sont les nombres de Bernoulli, et les B_n sont les polynômes de Bernoulli, définis sur $[0, 1]$ par la récurrence classique, et ensuite prolongés par 1-périodicité.

2.2 Outils d'analyse complexe

2.2.1 La fonction Γ d'Euler

2.2.2 Séries de Dirichlet

2.2.3 Formule de Perron

Nous établissons dans cette section la formule de Perron, reliant une série de Dirichlet à sa fonction sommatoire normalisée.

Dans toute cette section, nous allons noter

$$F(s) = \sum_{n \geq 1} \frac{a_n}{n^s}$$

une série de Dirichlet. On note :

- σ_c son abscisse de convergence simple,
- σ_a son abscisse de convergence absolue.

Prolongeons la suite $(a_n)_n$ en une fonction sur \mathbb{R} en posant

$$a_x = \begin{cases} a_n & \text{si } n \in \mathbb{N} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Définition 2.2.1 (Fonction sommatoire normalisée). *Nous introduisons :*

$$A^*(x) = \sum_{n < x} a_n + \frac{1}{2} a_x$$

Théorème 2.2.2 (Formule de Perron). *Soit $\kappa > \max(0, \sigma_c)$. On a :*

$$A^*(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\kappa-i\infty}^{\kappa+i\infty} F(s) \frac{x^s}{s} ds$$

où l'intégrale est

- convergente en valeur principale lorsque $x \in \mathbb{N}$
- semi-convergente lors $x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{N}$.

Démonstration. TODO

□

Dans la pratique, nous n'utilisons pas la formule de Perron telle quelle, mais sous une forme "effective".

Théorème 2.2.3 (Première formule de Perron effective). *Pour $\kappa > \max(0, \sigma_c)$, $T \geq 1$, $x \geq 1$,*

$$A(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\kappa-i\infty}^{\kappa+i\infty} F(s) \frac{x^s}{s} ds + O\left(x^k \sum_{n \geq 1} \frac{|a_n|}{n^\kappa (1 + T |\ln \frac{x}{n}|)}\right)$$

Démonstration. TODO

□

Théorème 2.2.4 (Seconde formule de Perron effective). *On suppose que :*

- l'abscisse de convergence absolue de $F(s)$ σ_a est finie,
- il existe un nombre réel $\alpha \geq 0$ tel que

$$\forall \sigma \in]\sigma_a, \sigma_a + 1], \quad \sum_{n \geq 1} \frac{|a_n|}{n^{-\sigma}} = O((\sigma - \sigma_a)^{-\alpha})$$

— il existe une fonction B positive et croissante telle que

$$\forall n \geq 1, \quad |a_n| \leq B(n)$$

Alors, pour $x \geq 2$, $T \geq 2$, $\sigma \leq \sigma_a$, $\kappa := \sigma_a - \sigma + 1/\ln x$,

$$\sum_{n \leq x} \frac{a_n}{n^s} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\kappa - iT}^{\kappa + iT} F(s + \omega) \frac{x^\omega}{\omega} d\omega + O\left(x^{\sigma_a - \sigma} \frac{\ln^\alpha x}{T} + \frac{B(2x)}{x^\sigma} \left(1 + x \frac{\ln T}{T}\right)\right)$$

Démonstration. TODO

□

Chapitre 3

La fonction ζ de Riemann

3.1 Lien avec les nombres premiers

La fonction que nous appelons aujourd'hui fonction ζ de Riemann a en réalité été introduite par Euler au XVIIIème siècle. Il a défini, pour tout $x \in \mathbb{R}, x > 1$, la fonction

$$\zeta(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^x}$$

La somme de droite est clairement convergente, donc $\zeta(x)$ est bien défini. Euler démontra par la suite le résultat suivant, qui définit un lien entre les nombres premiers et l'analyse.

Théorème 3.1.1 (Produit eulérien).

$$\zeta(x) = \prod_p \frac{1}{1 - p^{-x}} \quad (\sigma > 1)$$

Plus précisément, le produit infini signifie :

$$\lim_{P \rightarrow +\infty} \prod_{p \text{ premier } p \leq P} \frac{1}{1 - p^{-x}} = \zeta(x) \quad (\sigma > 1)$$

Démonstration. Pour tout nombre premier p , comme $1/p < 1$, on peut écrire la somme d'une suite géométrique :

$$\frac{1}{1 - p^{-x}} = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{p^{kx}}.$$

En faisant le produit de cette égalité pour tous les nombres premiers p_1, \dots, p_r inférieurs à un certain T , on a :

$$\prod_{p \leq T} \frac{1}{1 - p^{-x}} = \prod_{p \leq T} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{p^{kx}} \quad (3.1)$$

$$= \sum_{m_1, \dots, m_r \geq 1} \frac{1}{(p_1^{m_1} \dots p_r^{m_r})^x} \quad (3.2)$$

$$= \sum_{n \in \mathbb{N}_T} n^{-x} \quad (3.3)$$

où l'on a noté \mathbb{N}_T l'ensemble des entiers naturels dont tous les facteurs premiers sont inférieurs ou égaux à T .

(3.2) est justifiée par le fait que tous les termes sont positifs, donc on peut intervertir les sommes. (3.3) vient de la décomposition unique en facteurs premiers.

Ainsi,

$$\left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^x} - \prod_{p \leq T} \frac{1}{1 - p^{-x}} \right| = \left| \sum_{n \notin \mathbb{N}_T} \frac{1}{n^x} \right| \leq \sum_{n \notin \mathbb{N}_T} \frac{1}{n^x} \leq \sum_{n > T} \frac{1}{n^x}$$

La dernière somme est le reste d'une série convergente, donc tend vers 0, ce qui prouve à la fois la convergence du produit et la formule d'Euler. \square

A ce stade, nous commençons à nous convaincre du rôle important de la fonction ζ dans l'étude des nombres premiers. Une analyse plus approfondie de cette fonction va nous aider grandement, c'est ce que nous allons faire tout de suite.

3.2 Quelques propriétés de ζ

Avant d'étudier ses propriétés, commençons par définir officiellement ζ . L'idée de Riemann, dans son TODO, a été de partir de la définition d'Euler, et de considérer ζ comme fonction d'une variable complexe :

Définition 3.2.1 (Fonction ζ de Riemann). *On définit, pour tout s complexe tel que $\sigma > 1$,*

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s}$$

Proposition 3.2.2. *Pour $\sigma > 1$, la série $\zeta(s)$ est absolument convergente.*

Démonstration. C'est évident car $|\frac{1}{n^s}| = \frac{1}{n^\sigma}$, qui est le terme général d'une série convergente. \square

Cette proposition montre que la fonction ζ est bien définie sur le demi-plan $\sigma > 1$.

Cela va sans dire, mais cela ira encore mieux en le disant :

Théorème 3.2.3 (Produit eulérien, variable complexe).

$$\zeta(s) = \prod_p \frac{1}{1 - p^{-s}} \quad (\sigma > 1)$$

Démonstration. La démonstration est exactement la même que dans le cas réel : voir la proposition 3.1.1. Il suffit de noter que $|\frac{1}{n^s}| = \frac{1}{n^\sigma}$. \square

Il en découle immédiatement cette 1ère propriété intéressante :

Proposition 3.2.4.

$$\zeta(s) \neq 0 \quad (\sigma > 1)$$

Démonstration. Soit p premier fixé. L'inégalité triangulaire donne $|1 - p^{-s}| \leq 1 + p^{-\sigma}$. Par conséquent,

$$\log(|1 - p^{-s}|) \leq \log(1 + p^{-\sigma}) \leq p^{-\sigma}$$

où les inégalités sont données respectivement par la croissance et par la concavité du logarithme.

Ceci entraîne la convergence de la série $\sum_p \log(|1 - p^{-s}|)$, pour tout s avec $\sigma > 1$. Notons L_s sa limite :

$$\log \left(\prod_p |1 - p^{-s}| \right) = L_s,$$

et ainsi

$$\left| \prod_p \frac{1}{1 - p^{-s}} \right| = e^{-L_s} > 0,$$

Le terme de gauche est exactement $|\zeta(s)|$ par le produit eulérien du théorème 3.2.3. \square

Proposition 3.2.5.

$$|\zeta(s)| \leq \frac{\sigma}{\sigma - 1} \quad (\sigma > 1)$$

3.2.1 Dérivées successives

Proposition 3.2.6. ζ est holomorphe sur le demi-plan $\sigma > 1$.

Démonstration. Soit K un compact du demi-plan $\sigma > 1$, alors K est inclus dans un $\{s \in \mathbb{C} \mid \sigma \geq a\}$ pour un certain réel $a > 1$. Mais alors en définissant $f_n : s \mapsto 1/n^s$, la fonction f_n est holomorphe sur $\sigma > 1$, et sur K , $\|f_n\|_\infty \leq 1/n^a$, qui est le terme général d'une série convergente.

La série de fonctions $\sum f_n$ converge vers ζ , normalement (donc uniformément) sur K . Par suite ζ est holomorphe sur le demi-plan $\sigma > 1$. \square

Proposition 3.2.7.

$$\zeta^{(k)}(s) = (-1)^k \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(\log n)^k}{n^s}$$

Cette convergence est normale sur tout demi-plan $\{s \in \mathbb{C} \mid \sigma \geq a\}$ avec $a > 1$.

Démonstration. \square

3.2.2 Expression de $\ln \zeta$ et fonction de van Mangoldt

$\zeta(s)$ est réel pour s réel, et est strictement positif. Le logarithme de ce nombre existe et est réel. Il est donc naturel de choisir, parmi toutes les fonctions du logarithme complexe définies à la constante $2k\pi$ près, celle qui prolonge le logarithme réel sur $]0, +\infty[$.

Définition 3.2.8 (Fonction de van Mangoldt).

$$\Lambda(n) = \begin{cases} \ln p & \text{s'il existe } m \geq 1 \text{ et } p \text{ tels que } n = p^m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Proposition 3.2.9. On peut construire une détermination holomorphe de $\ln \zeta$ pour $\sigma > 1$ en posant

$$\ln \zeta(s) = \sum_p \sum_{m \geq 1} \frac{p^{-ms}}{m} = \sum_{n \geq 2} \frac{\Lambda(n)}{n^s \ln n} \quad (\sigma > 1)$$

Démonstration. On va se limiter pour l'instant à $s = \sigma$ réel. En partant du produit eulérien 3.2.3, on a

$$\ln \zeta(\sigma) = - \sum_p \ln \left(1 - \frac{1}{p^\sigma} \right).$$

D'autre part, on développe le logarithme en série entière, ce qui est possible puisque $p \geq 2$ et $\sigma > 1$, et on peut donc définir

$$D(s) = \sum_p$$

TODO à finir \square

Proposition 3.2.10. *On a l'égalité*

$$\frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)} = - \sum_{n \geq 1} \frac{\Lambda(n)}{n^s} \quad (\sigma > 1)$$

Démonstration.

□

Proposition 3.2.11.

$$\left| \frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)} \right| = O_{\sigma \rightarrow 1^+} \left(\frac{1}{\sigma - 1} \right)$$

3.2.3 Expression intégrale

Proposition 3.2.12. *Pour tout complexe $\sigma > 1$,*

$$\Gamma(s)\zeta(s) = \int_0^\infty \frac{t^{s-1}}{e^t - 1} dt$$

Démonstration. On part de la formule TODO

$$\Gamma(s)n^{-s} = \int_0^\infty t^{s-1} e^{-nt} dt \quad (\sigma > 0)$$

En sommant pour $n \geq 1$, il vient pour $\sigma > 1$

$$\Gamma(s)\zeta(s) = \sum_{n=1}^\infty \int_0^\infty t^{s-1} e^{-nt} dt = \int_0^\infty \frac{t^{s-1}}{e^t - 1} dt$$

Remarquons que la série numérique $\sum \int_0^\infty |t^{s-1}| e^{-nt} dt = \sum \int_0^\infty t^{\sigma-1} e^{-nt} dt$ converge, donc l'interversion somme/intégrale est justifiée. □

3.3 Equation fonctionnelle

Théorème 3.3.1 (Equation fonctionnelle, Riemann).

$$\zeta(s) = 2^s \pi^{s-1} \sin\left(\frac{\pi s}{2}\right) \Gamma(1-s) \zeta(1-s) \quad (s \in \mathbb{C} \setminus \{0, 1\})$$

Démonstration. TODO

□

3.4 Prolongement et propriétés sur la bande critique

La définition de ζ que nous avons donnée en 3.2.1 est valable pour $\sigma > 1$. Nous allons essayer, dans cette section et dans la suivante, d'essayer de prolonger ζ sur d'autres parties du plan complexe.

Nous commençons par la prolonger jusqu'au demi-plan $\sigma > 0$. Le fermé de la région prolongée, $0 \leq \sigma \leq 1$, s'appelle la *bande critique*. Au fait, de nombreux résultats arithmétiques reliant ζ et les nombres premiers font appel aux propriétés de ζ sur cette bande critique.

Proposition 3.4.1. *On a, pour $s \neq 0$ et $\sigma > 0$,*

$$\zeta(s) = \frac{s}{s-1} - s \int_1^\infty \frac{\{u\}}{u^{1+s}} du$$

Démonstration. Sommation d'abel, TODO faire proprement □

Lemme 3.4.2. *On a, pour $N \geq 0$ et $\sigma > 0$,*

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{n^s} + \frac{N^{1-s}}{s-1} - s \int_N^\infty \frac{\{u\}}{u^{1+s}} du$$

Proposition 3.4.3. *Pour tout réel $A > 0$, sur la région du plan définie par $\{s \in \mathbb{C} \mid t \geq 2, \sigma > 1 - \frac{A}{\ln t}\}$, on a :*

$$\zeta(s) = O(\ln t)$$

$$\zeta'(s) = O(\ln^2 t)$$

où la constante dans le O dépend de A .

Démonstration. Les égalités $|\zeta(2)| \leq \zeta(2)$ et $|\zeta'(2)| \leq \zeta'(2)$ sont triviales, donc les deux majorations sont vérifiées pour $\sigma \geq 2$.

On peut donc supposer maintenant que $\sigma < 2$ et $t \geq 2$, que l'on fixe tous les deux. On a alors (la première inégalité vient de l'inégalité triangulaire) :

$$|s| \leq \sigma + t < 2 + t \leq 2t$$

et

$$|s-1| \geq t.$$

En reportant tout cela dans le lemme 3.4.2, on obtient, pour tout $N \geq 1$:

$$|\zeta(s)| \leq \sum_{n=1}^N \frac{1}{n^\sigma} + \frac{N^{1-\sigma}}{t} + 2t \int_N^\infty \frac{1}{u^{1+\sigma}} du \quad (3.4)$$

En prenant TODO $N = |t|$, on a

— $N \leq t < N+1$,

— $\forall n \leq N, \ln n \leq \ln t$.

Par ailleurs, l'hypothèse $1 - \sigma < A/\ln t$ entraîne

$$\frac{1}{n^\sigma} = \frac{1}{n} n^{1-\sigma} = \frac{1}{n} e^{(1-\sigma) \ln n} < \frac{1}{n} e^{A \frac{\ln n}{\ln t}} \leq \frac{1}{n} e^A = O\left(\frac{1}{n}\right)$$

On peut donc maintenant évaluer terme à terme l'équation 3.4.

$$\begin{aligned}\sum_{n=1}^N \frac{1}{n^\sigma} &= O\left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{n}\right) = O(\ln N) = O(\ln t) \\ \frac{N^{1-\sigma}}{t} &= \frac{N}{t} \frac{1}{N^\sigma} = O\left(\frac{1}{N}\right) = O(1) \\ 2t \int_n^\infty \frac{1}{u^{1+\sigma}} du &= \frac{2t}{\sigma N^\sigma} = O\left(\frac{2t}{N}\right) = O(1)\end{aligned}$$

En remplaçant dans 3.4,

$$|\zeta(s)| = O(\ln t)$$

□

Par symétrie par rapport à l'axe $t = 0$, on a également :

Corollaire 3.4.4. *Pour tout réel $A > 0$, sur la région du plan définie par $\{s \in \mathbb{C} \mid \sigma > 1 - \frac{A}{\ln(2+|t|)}\}$, on a :*

$$\zeta(s) = O(\ln(2 + |t|))$$

$$\zeta'(s) = O(\ln^2(2 + |t|))$$

où la constante dans le O dépend de A .

Proposition 3.4.5.

$$\left| \frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)} \right|$$

Démonstration.

□

3.5 Prolongement à $\mathbb{C} \setminus \{1\}$

Théorème 3.5.1. *La fonction ζ admet un unique prolongement en une fonction méromorphe sur \mathbb{C} ayant un unique pôle en $s = 1$ de résidu 1.*

Une fois ce théorème démontré, nous allons encore noter ζ cet unique prolongement. Nous allons donner plusieurs démonstrations de ce théorème.

3.5.1 Par la formule d'Euler-Maclaurin

Démonstration. Fixons s tel que $\sigma > 1$, et appliquons la formule d'Euler-Maclaurin 2.1.2 à l'ordre $r \geq 1$ sur l'intervalle $[1, N]$ à la fonction $f : t \mapsto t^{-s}$, de classe C^∞ sur $[1, N]$:

$$\sum_{n=1}^N n^{-s} = \frac{1 - N^{1-s}}{s-1} + \frac{1 + N^{-s}}{2} + \sum_{k=2}^r B_k \frac{s(s+1)\dots(s+k-2)}{k!} (1 - N^{-s-k+1}) - R_{r,N}(s)$$

où l'on a défini le reste $R_{r,N}(s)$ par

$$R_{r,N}(s) = \frac{s(s+1)\dots(s+r-1)}{r!} \int_1^N B_r(t) t^{-s-r} dt$$

Comme les B_r sont périodiques et polynomiaux sur $[0, 1[$, ils sont bornés. Le terme à l'intérieur de l'intégrale de $R_{r,N}(s)$ est donc $O(t^{-s-r})$, qui intégrable sur $[1, +\infty]$. En faisant tendre N vers l'infini, on obtient alors

$$\zeta(s) = \frac{1}{s-1} + F_r(s)$$

où l'on a noté

$$F_r(s) = \frac{1}{2} + \sum_{k=2}^r B_k \frac{s(s+1)\dots(s+k-2)}{k!} - \frac{s(s+1)\dots(s+r-1)}{r!} \int_1^\infty B_r(t) t^{-s-r} dt.$$

Montrons que F_r est holomorphe sur $\Omega_r = \{s \in \mathbb{C} \mid \sigma > 1-r\}$. Il suffit que montrer que G_r l'est, où

$$G_r(s) = \int_1^\infty B_r(t) t^{-s-r} dt.$$

On remarque que, à t fixé, la fonction à l'intérieur $s \mapsto B_r(t) t^{-s-r}$ l'est. Soit K un compact de Ω_r , on peut fixer un $\delta > 0$ tel que $K \subset \{s \in \mathbb{C} \mid \sigma > 1-r+\delta\}$. Sur ce compact,

$$\sup_{s \in K} \left| \frac{B_r(t)}{t^{s+r}} \right| = O\left(\frac{1}{t^{1+\delta}}\right)$$

ce qui assure, par régularité des intégrales à paramètre, que G_r , et par suite F_r est holomorphe sur Ω_r .

On peut ainsi définir une fonction entière F par

$$F(s) = F_r(s) \quad \text{si } s \in \Omega_r.$$

F est bien définie car si $1 \leq q \leq r$, $F_q(s) = F_r(s) = \zeta(s) - \frac{1}{s-1}$, donc F_q et F_r sont holomorphes et coïncident sur Ω_q connexe.

On obtient finalement que $s \mapsto \frac{1}{s-1} + F(s)$ est une fonction méromorphe avec un unique pôle simple en 1 de résidu 1 qui prolonge la fonction ζ de Riemann.

L'unicité est triviale par prolongement analytique. \square

3.5.2 Par un contour de Hankel

3.5.3 Par l'équation fonctionnelle

Prolongement sur $[0, 1]$ par la sommation d'abel, sur $\sigma < 0$ par l'équation fonctionnelle.

3.6 Localisation des zéros

Nous avons vu à la proposition 3.2.4 que ζ ne s'annule pas pour $\sigma > 1$. Nous allons montrer que cette propriété est vraie sur le demi-plan fermé $\sigma \geq 1$.

Théorème 3.6.1 (Mertens). *Soit $F(s) = \sum_{n \geq 1} \frac{a_n}{n^s}$ une série de Dirichlet à coefficients positifs ou nuls. Notons σ_c son abscisse de convergence. Alors :*

$$3F(\sigma) + 4\Re(F(\sigma + it)) + \Re(F(\sigma + 2it)) \geq 0 \quad (\sigma > \sigma_c)$$

Démonstration. Posons $\forall \theta \in \mathbb{R}, V(\theta) = 3 + 4\cos(\theta) + \cos(2\theta)$.

$$\begin{aligned} V(\theta) &= 3 + 4\cos(\theta) + (2\cos^2(\theta) - 1) \\ &= 2(1 + 2\cos(\theta) + \cos^2(\theta)) \\ &= 2(1 + \cos(\theta))^2 \\ &\geq 0 \end{aligned}$$

Or

$$3F(\sigma) + 4\Re(F(\sigma + it)) + \Re(F(\sigma + 2it)) = \sum_{n \geq 1} \frac{a_n V(t \ln n)}{n^\sigma},$$

et comme les a_n sont positifs ou nuls, cela implique bien que

$$3F(\sigma) + 4\Re(F(\sigma + it)) + \Re(F(\sigma + 2it)) \geq 0$$

□

Corollaire 3.6.2.

$$\zeta^3(\sigma) |\zeta(\sigma + it)|^4 |\zeta(\sigma + 2it)| \geq 1 \quad (\sigma > 1)$$

Démonstration. On applique le théorème à la fonction

$$F(s) = \ln \zeta(s) = \sum_{n \geq 2} \frac{\Lambda(n)}{n^s \ln n} \quad (\sigma > 1)$$

où la 2ème égalité vient de la proposition 3.2.9. La série de droite est bien une série de Dirichlet à coefficient positifs ou nuls, d'abscisse de convergence 1. □

Nous sommes maintenant en mesure de prouver le résultat suivant, qui va s'avérer très important pour le théorème des nombres premiers.

Théorème 3.6.3. ζ ne s'annule pas sur le demi-plan fermé $\sigma \geq 1$.

Démonstration. Supposons par l'absurde qu'il existe t_0 tel que $\zeta(1 + it_0) = 0$, on le fixe. On sait que ζ est dérivable en $1 + it_0$. En particulier, en dérivant suivant l'axe des réels,

$$\lim_{\sigma \rightarrow 1^+} \frac{\zeta(\sigma + it_0) - \zeta(1 + it_0)}{\sigma - 1} \in \mathbb{C}$$

donc on peut écrire, en appliquant l'hypothèse,

$$\zeta(\sigma + it_0) = O_{\sigma \rightarrow 1^+}(\sigma - 1).$$

De plus, comme $|\zeta(s)| \leq \frac{\sigma}{\sigma-1}$ par la proposition 3.2.5, on peut écrire

$$\zeta(\sigma) = O_{\sigma \rightarrow 1^+} \left(\frac{1}{\sigma - 1} \right).$$

Enfin, par continuité de ζ ,

$$\zeta(\sigma + 2it_0) = O_{\sigma \rightarrow 1^+}(1)$$

En regroupant ces trois comportements asymptotiques, il vient :

$$\zeta^3(\sigma) |\zeta(\sigma + it)|^4 |\zeta(\sigma + 2it)| = O_{\sigma \rightarrow 1^+}(\sigma - 1),$$

en particulier le membre de gauche peut être rendu arbitrairement petit lorsque $\sigma \rightarrow 1^+$, ce qui contredit l'inégalité 3.6.2. \square

Corollaire 3.6.4. Dans le demi-plan $\sigma \leq 0$, la fonction ζ admet pour seuls zéros les points $-2n, n \geq 1$ entier. Ce sont des zéros simples.

Démonstration. Analyse. Soit s tel que $\sigma \leq 0$. Réécrivons l'équation fonctionnelle 3.3.1 :

$$\zeta(s) = 2^s \pi^{s-1} \sin\left(\frac{\pi s}{2}\right) \Gamma(1-s) \zeta(1-s) \quad (s \in \mathbb{C} \setminus \{0, 1\})$$

Ainsi, si $s \neq 0, \sigma \leq 0$ et $\zeta(s) = 0$, on a forcément $\sin(\frac{\pi s}{2}) = 0$, et donc $s = -2, -4, \dots$. Mais il reste à voir si $\zeta(0)$ est nul ou non.

En multipliant l'équation fonctionnelle par $(1-s)$ et en utilisant $s\Gamma(s) = \Gamma(s+1)$ TODO, on obtient

$$(1-s)\zeta(s) = 2^s \pi^{s-1} \sin\left(\frac{\pi s}{2}\right) \Gamma(2-s) \zeta(1-s).$$

On peut passer à la limite $s \rightarrow 1$, en remarquant que d'une part $\Gamma(1) = 1$, et d'autre part $\zeta(s) \sim \frac{1}{s-1}$:

$$-1 = 2\zeta(0).$$

Ceci montre que les seuls zéros possibles de ζ sont les $-2, -4, \dots$

Synthèse. On a bien $\zeta(-2) = \zeta(-4) = \dots = 0$ \square

Les zéros aux entiers négatifs pairs sont appelés les zéros triviaux de la fonction ζ .

3.6.1 Répartition globale des zéros

Développement en produit de Hadamard.

Régions sans zéros qui seront explorées plus en détails dans le chapitre sur le théorème des nombres premiers.

Chapitre 4

Le théorème des nombres premiers

4.1 Région affaiblie sans zéros

Théorème 4.1.1 (Théorème des nombres premiers, avec terme d'erreur, version affaiblie). *Il existe une constante réelle $c > 0$ telle que l'on ait, au voisinage de $+\infty$,*

$$\psi(x) = x + O(xe^{-c \ln^{1/10} x}) \quad (4.1)$$

L'ingrédient principal pour prouver le théorème des nombres premiers est le fait que ζ ne s'annule pas sur la droite $\sigma = 1$. L'idée intuitive est la suivante : si ζ a un zéro en ρ , alors $\frac{\zeta'}{\zeta}$ a un pôle en ρ . Or le produit eulérien nous donne de bonnes informations sur le comportement de $\frac{\zeta'}{\zeta}$ dans le demi-plan $\sigma > 1$. En particulier, elle y est bornée. Par conséquent, si $\frac{\zeta'}{\zeta}$ (qui est négative) avait un pôle près de la droite $\sigma = 1$, elle devrait y décroître très rapidement.

Théorème 4.1.2 (Région sans zéros, version affaiblie). *Il existe un réel $c > 0$ tel que sur la région du plan complexe définie par $\sigma \geq 1 - \frac{c}{\ln^9(2+|t|)}$, on ait*

$$\left| \frac{1}{\zeta(s)} \right| = O(\ln^7(2+|t|))$$

En particulier, ζ ne s'annule pas sur cette région du plan.

Démonstration. Prenons un s dans la région $\sigma > 1 - \frac{c}{\ln(2+|t|)}$, c'est-à-dire dans celle requise par les hypothèses du corollaire 3.4.4 (sans la frontière). On peut alors trouver η vérifiant

- $0 < \eta < \frac{c}{\ln(2+|t|)}$,
- $\sigma > 1 - \eta$.

On fixe un tel η , et on pose $s_0 = 1 + \eta + it$. Par ce corollaire 3.4.4, TODO Figure

$$|\zeta(s) - \zeta(s_0)| = \left| \int_{s_0}^s \zeta'(\omega) d\omega \right| \leq C_0 \eta \ln^2(2 + |t|),$$

où l'intégrale est bien définie TODO

On utilise maintenant l'inégalité fondamentale 3.6.2 due à Mertens :

$$\begin{aligned} \zeta(s_0) &\geq \frac{1}{\zeta(1+\eta)^3 |\zeta(1+\eta+2it)|} \\ &\geq \frac{C_1 \eta^3}{\ln(2+|t|)} \end{aligned}$$

où l'on a utilisé dans la deuxième inégalité le corollaire 3.6.2 et TODO.

D'où :

$$\begin{aligned} \zeta(s) &\geq |\zeta(s_0)| - |\zeta(s) - \zeta(s_0)| \\ &\geq \frac{C_1^{1/4} \eta^{3/4}}{\ln^{1/4}(2+|t|)} - C_0 \eta \ln^2(2+|t|) \end{aligned}$$

Choisissons alors η pour que les deux termes se compensent, c'est-à-dire η de l'ordre de $\ln^{-9}(2+|t|)$. Plus précisément, si l'on avait choisi :

$$\eta := \frac{c}{\ln^9(2+|t|)}$$

□

Nous sommes maintenant en mesure de prouver le théorème des nombres premiers sous sa forme 4.1.1. L'astuce est d'utiliser la formule de Perron, de briser le segment sur lequel s'effectue l'intégration, et de le remplacer par un contour qui contient le pôle $s = 1$ (donc forcément débordant en partie sur le demi-plan $\sigma < 1$). Le terme d'erreur vient alors de la valeur de l'intégrale sur les autres parties du contour. Formalisons cela.

Démonstration du théorème 4.1.1. Nous avons vu à la proposition 3.2.11

$$\left| \frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)} \right| = O_{\sigma \rightarrow 1^+} \left(\frac{1}{\sigma - 1} \right)$$

Ainsi nous pouvons appliquer la seconde formule de Perron effective 2.2.4 avec :

- la série de Dirichlet $F(s) = \sum_{n \geq 1} \frac{\Lambda(n)}{n^s}$
- $\alpha = 1$, $\sigma_a = 1$, et on a

$$\sum_{n \geq 1} \frac{\Lambda(n)}{n^{-\sigma}} = O((\sigma - 1)^{-1})$$

- la fonction $B = \ln$ vérifie

$$\forall n \geq 1, \quad \Lambda(n) \leq n$$

On obtient, dans ce cas-là, pour $x \geq 2$ et $T \geq 2$, et $\sigma_1 = 1 + \frac{1}{\ln x}$ TODO POURQUOI ?

$$\psi(x) = \sum_{n \geq 1} \Lambda(n) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma_1 - iT}^{\sigma_1 + iT} \left(-\frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)} \right) \frac{x^s}{s} ds + O\left(\frac{x \ln^2 x}{T}\right).$$

Nous allons utiliser le théorème des résidus pour estimer l'intégrale, et choisir T à la fin convenablement pour compenser les termes d'erreur.

En fixant c donné par le théorème 4.1.2, posons $\delta = \frac{c}{\ln^9(T+2)}$, $\sigma_0 = 1 - \delta$, et rappelons que nous venons de poser $\sigma_1 = 1 + \ln x$. Alors le rectangle de sommets $(\sigma_0, \pm iT)$ et $(\sigma_1, \pm iT)$ est contenu dans cette région sans zéros. En notant $f(s) = \left(-\frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)} \right) \frac{x^s}{s}$ l'intégrande, on a alors que $s = 1$ est l'unique pôle de f dans ce rectangle. Le théorème des résidus nous fournit alors (le terme à l'intérieur de l'intégrale, $f(s)ds$, est omis pour clarté) :

$$\psi(x) = \text{Res}(f, 1) + \frac{1}{2\pi i} \left(\int_{\sigma_0 - iT}^{\sigma_0 + iT} + \int_{\sigma_0 + iT}^{\sigma_1 + iT} - \int_{\sigma_1 - iT}^{\sigma_0 - iT} \right) + O\left(\frac{x \ln^2 x}{T}\right).$$

TODO IMAGE

Nous pouvons facilement vérifier que $\text{Res}(f, 1) = x$, car ζ a un pôle simple en $s = 1$, donc

$$\psi(x) = x + \frac{1}{2\pi i} \left(\int_{\sigma_0 - iT}^{\sigma_0 + iT} + \int_{\sigma_0 + iT}^{\sigma_1 + iT} - \int_{\sigma_1 - iT}^{\sigma_0 - iT} \right) + O\left(\frac{x \ln^2 x}{T}\right) \quad (4.2)$$

On voit déjà le terme x de l'énoncé apparaître, essayons donc d'estimer les trois intégrales. Commençons par celle du milieu, qui a lieu sur le petit segment horizontal du haut. Notons I_h ce segment, et on a la majoration grossière :

$$\begin{aligned} |f(s)| &= \left| \left(-\frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)} \right) \frac{x^s}{s} \right| \leq \frac{x^{\sigma_1}}{T} \max_{I_h} |\zeta'| \max_{I_h} \left| \frac{1}{\zeta} \right| \\ &\leq \frac{x}{T} \max_{I_h} |\zeta'| \max_{I_h} \left| \frac{1}{\zeta} \right|. \end{aligned}$$

(Astuce : l'inégalité $|s| \geq T$ se voit mieux géométriquement.)

Mais on a déjà vu :

— $\max |\zeta'| = O(\ln^2 T)$ dans la proposition 3.4.3,

— $\max \left| \frac{1}{\zeta} \right| = O(\ln^7 T)$ dans le théorème juste au-dessus 4.1.2.

Et donc

$$|f(s)| = O\left(\frac{x}{T} \ln^9 T\right)$$

Comme la longueur du segment est $\sigma_1 - \sigma_0 = 1/\ln x + \delta = O(1)$, on a que

$$\int_{\sigma_0 + iT}^{\sigma_1 + iT} f(s) ds = O\left(\frac{x}{T} \ln^9 T\right) \quad (4.3)$$

Par symétrie par rapport à l'axe des abscisses, la troisième intégrale sur le segment de bas I_b dans 4.2 est également $O\left(\frac{x}{T} \ln^9 T\right)$.

Reste à évaluer la première intégrale sur le segment vertical de gauche I_g . Pareil, majorons grossièrement :

$$\begin{aligned} |f(s)| &= \left| \left(-\frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)} \right) \frac{x^s}{s} \right| \leq \frac{x^{\sigma_0}}{|s|} \max_{I_g} |\zeta'| \max_{I_g} \left| \frac{1}{\zeta} \right| \\ &= O\left(\frac{x^{\sigma_0}}{|s|} \max_{I_g} |\zeta'| \ln^7 T \right) \end{aligned}$$

Ici, il faut faire attention car ce segment est assez proche du pôle $s = 1$, donc $\max_{I_g} |\zeta'|$ peut devenir assez importante. Nous utilisons la proposition TODO pour avoir la majoration

$$\max_{I_g} |\zeta'| = O(\ln^{18} T) \quad (4.4)$$

En combinant 4.3 et 4.4 et en les injectant dans 4.2, on obtient

$$\psi(x) = x + O\left(x^{\sigma_0} \ln^{25} x \int_{-T}^T \frac{1}{1+|t|} dt \right) + O\left(\frac{x}{T} \ln^9 T \right) + O\left(\frac{x \ln^2 x}{T} \right)$$

L'intégrale est $O(\ln T)$, et le dernier terme peut être absorbé dans $O\left(\frac{x}{T} \ln^9 T\right)$, donc

$$\psi(x) = x + O(x^{\sigma_0} \ln^{26} x) + O\left(\frac{x}{T} \ln^9 T \right)$$

En majorant encore plus grossièrement, c'est-à-dire $O(\ln^9 T) = O(\ln^2 6T)$, on peut factoriser

$$\begin{aligned} \psi(x) &= x + O\left(x \ln^{26} x \left(x^{-\delta} + \frac{1}{T} \right) \right) \\ &= x + O\left(x \ln^{26} x \left(e^{-\frac{c \ln x}{\ln^9(T+2)}} + e^{-\ln T} \right) \right) \end{aligned}$$

Il faut noter que les deux termes en exponentiel varient en sens opposés lorsque T augmente. On peut les rendre égaux en choisissant $T = \exp(\ln^{1/10} x)$, auquel cas on a :

$$\psi(x) = x + O(x \ln^{26} x e^{-c \ln^{1/10} x}).$$

En choisissant c assez grand TODO, on obtient Enfin

$$\psi(x) = x + O(x e^{-c \ln^{1/10} x}).$$

□

4.2 Région classique sans zéros

Le terme d'erreur $O(x e^{-c \ln^{1/10} x})$ dans 4.1.1 n'est pas terrible, on peut peut-être l'améliorer. En diagnostiquant la preuve ci-dessus, on remarque que ce

terme d'erreur vient en très grande partie de l'intégrale sur le segment vertical de gauche. En fait, plus on arrive à décaler ce segment vers la gauche, plus l'intégrale sera petite.

Mais pour ce faire, il nous faut trouver une région sans zéros plus grande que celle du théorème 4.1.2. Le but de cette section est donc de démontrer le théorème suivante :

Théorème 4.2.1 (Région classique sans zéro). *Il existe un réel $c > 0$ tel que la fonction ζ ne s'annule pas sur la région du plan définie par*

$$\sigma \geq 1 - \frac{c}{\ln(2 + |t|)}$$

Démonstration. □

Théorème 4.2.2 (Théorème des nombres premiers avec terme d'erreur, de la Vallée Poussin, 1900). *Il existe une constante réelle $c > 0$ telle que l'on ait, au voisinage de $+\infty$,*

$$\psi(x) = x + O(xe^{-c\sqrt{\ln x}}) \quad (4.5)$$

Démonstration. La preuve est exactement la même que celle du théorème 4.1.1, sauf qu'on utilise la nouvelle région sans zéros que l'on vient de définir plus haut, et le rectangle est de sommets $(\sigma_0, \pm iT)$, $(\sigma_1, \pm iT)$, avec

$$\begin{aligned} - \sigma_0 &= 1 - \frac{c}{\ln(2+T)} \\ - \sigma_1 &= 1 + 1/\ln x \end{aligned}$$

On réécrit :

$$\psi(x) = x + \frac{1}{2\pi i} \left(\int_{\sigma_0 - iT}^{\sigma_0 + iT} + \int_{\sigma_0 + iT}^{\sigma_1 + iT} - \int_{\sigma_0 - iT}^{\sigma_1 - iT} \right) + O\left(\frac{x \ln^2 x}{T}\right) \quad (4.6)$$

Mais cette fois, sur les deux segments horizontaux I_h et I_b qui sont $[\sigma_0 \pm iT, \sigma_1 \pm iT]$, on a, utilisant la proposition TODO

$$|f(s)| = \left| \left(-\frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)} \right) \frac{x^s}{s} \right| \leq \frac{x^{\sigma_1}}{T} \max_{I_h} \left| \frac{\zeta'}{\zeta} \right| \quad (4.7)$$

$$= O\left(\frac{x^{\sigma_1} \ln(T+2)}{T}\right) \quad (4.8)$$

$$= O\left(\frac{x \ln x}{T}\right) \quad (4.9)$$

où la dernière égalité vient du fait que l'on n'oubliera pas, à la fin de la preuve, de choisir T tel que $T = O(x)$ (et bien sûr grand, pour que le 2 parte aussi).

Sur le segment vertical de gauche $I_g = [\sigma_0 - iT, \sigma_0 + iT]$, on a

$$\begin{aligned} |f(s)| &= \left| \left(-\frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)} \right) \frac{x^s}{s} \right| \leq \frac{x^{\sigma_0}}{|s|} \max_{I_g} \left| \frac{\zeta'}{\zeta} \right| \\ &= O\left(\frac{x^{\sigma_0} \ln(T+2)}{|s|} \right) \\ &= O\left(\frac{x^{1-c/\ln(T+2)} \ln x}{|s|} \right) \end{aligned}$$

où la deuxième ligne est justifiée par TODO.

En réassemblant tout, on obtient

$$\begin{aligned} \psi(x) &= x + O\left(x^{1-\frac{c}{\ln(T+2)}} \ln x \int_{-T}^T \frac{dt}{1+|t|} \right) + O\left(\frac{x \ln^2 x}{T} \right) \\ &= x + O\left(x \ln^2 x \left(e^{-\frac{c \ln x}{\ln(T+2)}} + e^{-\ln T} \right) \right) \end{aligned}$$

En choisissant alors $T := e^{\sqrt{c \ln x}}$, on vérifie que $T = O(x)$ pour que 4.9 soit justifiée, et on a aussi dans ce cas

$$\psi(x) = x + O(xe^{-c\sqrt{\ln x}})$$

□

4.3 Enoncé avec $\pi(x)$

Nous avons vu, dans les deux section précédentes, deux théorèmes que nous avons appelés "théorème des nombres premiers", mais qui ne faisaient intervenir que $\psi(x)$, sans aucun lien apparent avec $\pi(x)$. Le théorème des nombres premiers s'appelle ainsi parce qu'il a quelque chose à dire sur la distribution des nombres premiers :

Théorème 4.3.1 (Théorème des nombres premiers). *Il existe une constante réelle $c > 0$ telle que l'on ait, au voisinage de $+\infty$,*

$$\pi(x) = \int_2^x \frac{dt}{\ln t} + O(xe^{-c\sqrt{\ln x}})$$

Cette intégrale a en réalité un nom :

Définition 4.3.2 (Logarithme intégral). *On définit le logarithme intégral, noté li , par*

$$\text{li}(x) = \int_2^x \frac{dt}{\ln t}$$

Démonstration du théorème 4.3.1. TODO

□

On en déduit également la forme suivante, plus faible, mais plus répandue :

Théorème 4.3.3 (Théorème des nombres premiers, version affaiblie).

$$\pi(x) \sim \int_2^x \frac{dt}{\ln t}$$

Démonstration. Il suffit juste de voir que (TODO Pourquoi?)

$$xe^{-c\sqrt{\ln x}} = o(\text{li}(x)).$$

□

Proposition 4.3.4.

$$\text{li}(x) = \frac{x}{\ln x} + \frac{x}{\ln^2 x} + O\left(\frac{x}{\ln^3 x}\right)$$

Démonstration. Cela se fait facilement par intégration par parties. □

On a donc $\pi(x) \sim \text{li}(x) \sim \frac{x}{\ln x}$, mais li donne une meilleure approximation :
 TODO GRAPHE

4.4 L'hypothèse de Riemann

TODO

Théorème 4.4.1. *L'hypothèse de Riemann équivaut à*

$$\forall \epsilon > 0, \quad \psi(x) = x + O_\epsilon(x^{1/2+\epsilon})$$

4.5 Formule explicite pour ψ