

§6. EXERCICES

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **L'Enseignement Mathématique**

Band (Jahr): **22 (1976)**

Heft 1-2: **L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE**

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Le même argument que dans (b) montre que les j_i sont des fonctions modulaires sur $\Gamma_0(2^6)$, puis, en appliquant (5.4), que ce sont des formes modulaires 2-adiques de poids 0 sur $\mathrm{SL}_2(\mathbf{Z})$.

Remarques.

(a) On peut aussi déduire (5.4) et (5.5) de la définition « géométrique » des formes modulaires l -adiques adoptée par Katz dans son exposé à Anvers (*Lect. Notes* 350, p. 69-190).

(b) Le théorème (5.2) « explique » que l'on ait des congruences sur $c(n) \pmod{l}$ lorsque n est, soit divisible par l , soit tel que $\binom{n}{l} = -\binom{-1}{l}$, cf. Kolberg [7], ainsi que les exercices du § 6.

(c) Lorsque $l = 2$, on a $j_1 \equiv j_3 \equiv j_5 \equiv j' \equiv j'' \equiv 0 \pmod{2}$, de sorte que

$$j \equiv \sum_{n=0}^{\infty} c(8n-1) q^{8n-1} \pmod{2},$$

et le théorème (5.2) ne fournit aucun renseignement sur ces coefficients $\pmod{2}$. Il serait intéressant de voir s'ils sont répartis « au hasard », comme cela semble le cas pour la fonction de partition, cf. [13].

§ 6. EXERCICES

Formes modulaires de poids 1.

(6.1) Les hypothèses étant celles de (4.2 ii), montrer que $\alpha \leq 3/4$, et qu'il y a égalité si et seulement si l'image de $\mathrm{Gal}(K_f/\mathbf{Q})$ dans $\mathbf{PGL}_2(\mathbf{C}) = \mathbf{GL}_2(\mathbf{C})/\mathbf{C}^*$ est isomorphe au groupe diédral \mathbf{D}_2 d'ordre 4 (cf. exemple (4.4)).

(6.2) On suppose que f est de type $(1, \varepsilon)$ sur $\Gamma_0(N)$ (mais pas nécessairement que c'est une fonction propre des opérateurs de Hecke). Montrer que, si

$$(*) \quad N \{ n \leq x : a_n \neq 0 \} = o(x/\log^{3/4}x),$$

on a $f = 0$. (Observer que l'espace des f satisfaisant à (*) est stable par les opérateurs de Hecke; s'il n'est pas nul, il contient un vecteur propre; conclure en appliquant (6.1).)

Formes modulaires (mod m).

(6.3) Montrer que, sous les hypothèses de (4.7 ii₁), on a $\alpha(m) \leq 3/4$ (même méthode que pour (6.1)). En déduire un résultat analogue à (6.2).

(6.4) On fixe k, m, N, ε et l'on note m la norme de m . Soit A l'ensemble des séries formelles $\sum a_n q^n$, à coefficients dans O_F/m , qui sont réduction (mod m) de formes modulaires de type (k, ε) sur $\Gamma_0(N)$, à coefficients dans O_F ; c'est un O_F/m -module libre de type fini. Les opérateurs de Hecke T_n définissent des endomorphismes $T_{n,A}$ de A . Montrer que l'application $p \mapsto T_{p,A}$ est *frobénienne* au sens suivant: pour tout $u \in \text{End}(A)$, l'ensemble P_u des nombres premiers p , ne divisant pas Nm , tels que $T_{p,A} = u$ est frobénien (et peut être défini par une extension galoisienne finie de \mathbf{Q} non ramifiée en dehors de Nm). Soit P_2^+ l'ensemble des $p \equiv 1 \pmod{Nm}$ qui appartiennent à P_2 (i.e. tels que $f | T_p = 2f$ pour tout $f \in A$), et soit P_0^- l'ensemble des $p \equiv -1 \pmod{Nm}$ qui appartiennent à P_0 (i.e. tels que $f | T_p = 0$ pour tout $f \in A$). Montrer que P_2^+ et P_0^- ont une densité > 0 (cf. [5], 9.6, où est traité le cas analogue des formes de poids 1). Si $p \in P_2^+$, on a $T_{p^r,A} = r + 1$, et si $p \in P_0^-$, on a $T_{p^r,A} = (-1)^{r/2}$ si r est pair, et $T_{p^r,A} = 0$ si r est impair. Si $f = \sum a_n q^n$ est un élément de A , on a donc

$$(n, p) = 1 \Rightarrow \begin{cases} a_{np^r} = (r+1)a_n & \text{si } p \in P_2^+ \\ a_{np^r} = \begin{cases} 0 & \text{si } p \in P_0^-, \quad r \text{ impair} \\ (-1)^{r/2} a_n & \text{si } p \in P_0^-, \quad r \text{ pair.} \end{cases} \end{cases}$$

(6.5) On conserve les notations de (6.4). Soit $f = \sum a_n q^n$ un élément de A . Montrer, en utilisant les dernières formules de (6.4), que l'ensemble des valeurs prises par les a_n ($n \geq 1$) est un sous-ensemble de O_F/m stable par multiplication par \mathbf{Z} . (En particulier, si $O_F = \mathbf{Z}$ et si l'un des a_n est inversible dans $\mathbf{Z}/m\mathbf{Z}$, alors les a_n prennent toutes les valeurs possibles.) Si a appartient à ce sous-ensemble, et si $2 \nmid m$, on a

$$N \{ n \leq x : a_n = a \text{ dans } O_F/m \} \gg x (\log \log x)^h / \log x$$

quel que soit h . (Choisir $r \geq 1$ tel que $a_r = 2^{-h-1} a$, et remarquer que $a_n = a$ lorsque n est de la forme $p_0 \dots p_h r$, où p_0, \dots, p_h sont des éléments de P_2^+ ne divisant pas r , et deux à deux distincts.)

Formes modulaires (mod 2).

(6.6) Soit S la \mathbf{F}_2 -algèbre des formes modulaires (mod 2) sur $\text{SL}_2(\mathbf{Z})$, autrement dit (cf. [21], [27]) l'algèbre des polynômes en la série

$$\tilde{\Delta} = q + q^9 + q^{25} + q^{49} + \dots,$$

à coefficients dans \mathbf{F}_2 . Soit S_0 (resp. S_1) le sous-espace de S engendré par les $\tilde{\Delta}^i$ pour $i \geq 1$ (resp. par les $\tilde{\Delta}^{2^j}$, pour $j \geq 0$); on a $S = \mathbf{F}_2 \oplus S_0$. Soit $f = \sum a_n q^n$ un élément de S_0 .

(a) Montrer que, si $f \in S_1$ et $f \neq 0$, il existe $c > 0$ tel que

$$N \{ n \leq x : a_n = 1 \} \sim cx^{1/2}.$$

(b) On peut prouver (cf. [22]) que les T_p sont *localement nilpotents* sur S_0 . Admettant ce fait, il existe un entier $h \geq 0$ tel que f soit annulé par tous les produits $T_{p_0} \dots T_{p_h}$, p_i premier $\neq 2$. Montrer que $a_n = 1$ entraîne que n est de la forme bc^2 , où b a au plus h facteurs premiers $\neq 2$ (raisonner par récurrence sur h et n). En déduire:

$$N \{ n \leq x : a_n = 1 \} \ll x (\log \log x)^{h-1} / \log x.$$

(c) On suppose $f \notin S_1$, et l'on choisit l'entier h de (b) *minimal*; on a $h \geq 1$. Il résulte alors de (6.4) qu'il existe des ensembles frobénieniens P_1, \dots, P_h de densités > 0 , ainsi qu'un élément non nul g de S_0 , tels que

$$f | T_{p_1} \dots T_{p_h} = g \quad \text{si} \quad p_1 \in P_1, \dots, p_h \in P_h.$$

Si le r -ième coefficient de g est égal à 1, on a $a_n = 1$ pour tout n de la forme $p_1 \dots p_h r$, avec $p_i \in P_i$, les p_i étant distincts, et ne divisant pas r . En conclure que

$$N \{ n \leq x : a_n = 1 \} \gg x (\log \log x)^{h-1} / \log x,$$

d'où, en vertu de (b):

$$N \{ n \leq x : a_n = 1 \} \asymp x (\log \log x)^{h-1} / \log x.$$

(d) Il résulte de (a) et (c) que $f \in S_1$ équivaut à

$$N \{ n \leq x : a_n = 1 \} = o(x/\log x)$$

ainsi qu'à

$$N \{ n \leq x : a_n = 1 \} = O(x^{1/2}).$$

(6.7) On pose $\Delta^3 = \sum e_n q^n$, et l'on note E l'ensemble des n tels que $e_n \equiv 0 \pmod{2}$. Montrer que le complémentaire E' de E est formé des entiers n de la forme $p^{4m+1} a^2$, avec p premier, a impair non divisible par p , m entier ≥ 0 , et $p \equiv 3 \pmod{8}$. (Utiliser la congruence

$$\Delta \equiv \sum_{n=0}^{\infty} q^{(2n+1)^2} \pmod{2}.)$$

La série de Dirichlet $f(s) = \sum_{n \in E'} n^{-s}$ associée à E' est égale à

$$(1 - 2^{-2s}) \zeta(2s) \left\{ \sum_{p \equiv 3 \pmod{8}} p^{-s} / (1 + p^{-2s}) \right\}.$$

On peut l'écrire sous la forme

$$f(s) = c \log 1/(s-1) + h(s),$$

où h est holomorphe pour $\Re(s) \geq 1$, et $c = \pi^2/32$. En déduire (grâce au théorème *b* de [3], p. 26), que l'on a

$$N \{ n \leq x : e_n \equiv 1 \pmod{2} \} \sim cx / \log x.$$

Montrer que

$$\Delta^3 \mid T_p \equiv \begin{cases} \Delta \pmod{2} & \text{si } p \equiv 3 \pmod{8} \\ 0 \pmod{2} & \text{sinon.} \end{cases}$$

Montrer que les mêmes résultats valent pour Δ^5 , à condition de remplacer $p \equiv 3 \pmod{8}$ par $p \equiv 5 \pmod{8}$.

Divisibilité des a_n par une puissance d'un idéal premier.

(6.8) Soit $n \mapsto a_n$ une fonction multiplicative à valeurs dans l'anneau O_F des entiers d'une extension finie F de \mathbf{Q} , et soit v la valuation de F définie par un idéal premier $\mathfrak{p} \neq 0$ de O_F . Pour tout $r \geq 0$, notons N_r (resp. P_r) l'ensemble des entiers $n \geq 1$ (resp. des nombres premiers) tels que $v(a_n) = r$, et posons

$$f_r(s) = \sum_{n \in N_r} n^{-s} \quad \text{et} \quad f_T(s) = \sum_{r=0}^{\infty} T^r f_r(s),$$

où T est une indéterminée.

(a) Montrer que

$$f_T(s) = \prod_p \left(1 + \sum_{m=1}^{\infty} T^{v(a_{p^m})} p^{-ms} \right),$$

où l'on convient de supprimer le coefficient de p^{-ms} si $v(a_{p^m}) = \infty$, i.e. si $a_{p^m} = 0$.

En déduire que

$$f_T(s) = \exp \left\{ \sum_{r=0}^{\infty} T^r (\varphi_{P_r}(s) + \theta_r(s)) \right\},$$

où $\varphi_{P_r}(s) = \sum_{p \in P_r} p^{-s}$, et où les $\theta_r(s)$ sont holomorphes pour $\Re(s) > 1/2$.

(b) On suppose que les P_r sont réguliers de densité $\alpha_r \geq 0$ et que $0 < \alpha_0 < 1$; on note m la borne inférieure des $i \geq 1$ tels que $\alpha_i > 0$. Montrer que $f_r(s)$ est de la forme

$$f_r(s) = \frac{1}{(s-1)^{\alpha_0}} \left\{ \sum_{j=0}^{h(r)} c_{r,j}(s) (\log 1/(s-1))^j \right\},$$

où $h(r)$ est la partie entière de r/m , et où les $c_{r,j}(s)$ sont holomorphes pour $\Re(s) \geq 1$. Cela entraîne:

$$f_0(s) + \dots + f_r(s) = \frac{1}{(s-1)^{\alpha_0}} \left\{ \sum_{j=0}^{h(r)} d_{r,j}(s) (\log 1/(s-1))^j \right\},$$

où les $d_{r,j}(s)$ sont holomorphes pour $\Re(s) \geq 1$. Montrer que l'on a $d_{r,j}(1) > 0$ pour $j = h(r)$. En déduire, grâce au théorème b de [3], p. 26, que

$$N \{ n \leq x : a_n \not\equiv 0 \pmod{p^{r+1}} \} \sim c_r x (\log \log x)^{h(r)} / \log^{1-\alpha_0} x,$$

avec $c_r = d_{r,j}(1) / \Gamma(\alpha_0)$.

(c) On suppose que les a_n sont les coefficients d'une forme modulaire de type (4.7 ii₁). Montrer que les conditions de (b) sont satisfaites (les P_r sont même frobéniens) et que l'on a

$$\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_r + \dots = 1 - \alpha_\infty,$$

où α_∞ est la densité des p tels que $a_p = 0$.

(d) Etendre les résultats ci-dessus au cas de produits de puissances $p_1^{r_1} \dots p_j^{r_j}$ d'idéaux premiers (utiliser des séries formelles en T_1, \dots, T_j).

(6.9) Soit l un nombre premier $\neq 2$. Soit $P_1(l)$ l'ensemble des nombres premiers $p \neq l$ tels que $\tau(p)$ soit divisible par l , mais pas par l^2 . Montrer que $P_1(l)$ est de densité > 0 . [Soit G_l le sous-groupe de $\mathbf{GL}_2(\mathbf{Q}_l)$ image de la représentation l -adique attachée à Δ , cf. [19], [27]. La densité de $P_1(l)$ est égale à la mesure de l'ouvert H_l de G_l formé des éléments s tels que $v_l(\text{Tr}(s)) = 1$; il revient au même de prouver que $H_l \neq \emptyset$, que $P_1(l) \neq \emptyset$, ou que la densité de $P_1(l)$ est > 0 . Or, on a $H_l \neq \emptyset$ pour $l \neq 3, 5, 7, 23, 691$, vu la « grosseur » de G_l , cf. [27]. Pour $l = 3, 7, 23$, on a $5 \in P_1(l)$ puisque $\tau(5) = 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 23$; pour $l = 5$, on a $19 \in P_1(l)$ puisque $\tau(19) = 2^2 \cdot 5 \cdot 7^2 \cdot 11 \cdot 23 \cdot 43$; pour $l = 691$, un calcul sur machine montre, paraît-il, que $1381 \in P_1(l)$.]

Déduire de là, et de l'exercice précédent, que, pour tout $r \geq 0$, il existe une constante $c_{l,r} > 0$ telle que

$$N \{ n \leq x : \tau(n) \not\equiv 0 \pmod{l^{r+1}} \} \sim c_{l,r} x (\log \log x)^r / \log^{\alpha(l)} x,$$

où $\alpha(l)$ est donné par la formule de l'exemple 3 du § 1.

Equidistribution des valeurs des $a_n \pmod{m}$.

(6.10) Soit $n \mapsto a_n$ une fonction multiplicative à valeurs dans un anneau commutatif fini A . On note r l'ordre du groupe multiplicatif A^* des éléments inversibles de A . Si $\lambda \in A^*$, on note P_λ l'ensemble des nombres premiers p tels que $a_p = \lambda$. On fait les hypothèses suivantes :

(i) Les P_λ sont réguliers de densités α_λ telles que

$$0 < \sum \alpha_\lambda < 1.$$

(ii) Le groupe A^* est engendré par les éléments λ tels que $\alpha_\lambda > 0$.

On note X le groupe des caractères de A^* ; un élément φ de X est un homomorphisme de A^* dans \mathbf{C}^* ; on le prolonge à A en posant $\varphi(\lambda) = 0$ si λ n'est pas inversible.

(a) Si $\lambda \in A^*$ et $\varphi \in X$, on pose

$$f_\lambda(s) = \sum_{a_n = \lambda} n^{-s} \quad \text{et} \quad f_\varphi(s) = \sum_n \varphi(a_n) n^{-s}.$$

Montrer que

$$f_\lambda = \frac{1}{r} \sum_{\varphi \in X} \varphi(\lambda^{-1}) f_\varphi.$$

(b) Décomposer f_φ en produit eulérien, et en déduire que

$$\log f_\varphi(s) = \beta(\varphi) \log 1/(s-1) + h_\varphi(s),$$

où $\beta(\varphi) = \sum_\lambda \alpha_\lambda \varphi(\lambda)$, et $h_\varphi(s)$ est holomorphe pour $\Re(s) \geq 1$.

On a $\Re(\beta(\varphi)) \leq \alpha$, avec $\alpha = \sum \alpha_\lambda$, et il n'y a égalité que si φ est le caractère unité de A^* .

(c) Si β est un nombre complexe, on convient de noter $1/(s-1)^\beta$ la fonction $\exp \{ \beta \log 1/(s-1) \}$. Montrer, en combinant (a) et (b), que l'on a

$$f_\lambda(s) = c(s)/(s-1)^\alpha + \sum_i c_{i,\lambda}(s)/(s-1)^{\beta_i},$$

où $c(s)$ et les $c_{i,\lambda}(s)$ sont holomorphes pour $\Re(s) \geq 1$, les β_i sont tels que $\Re(\beta_i) < \alpha$, et $c(1) > 0$.

En déduire (cf. [3], p. 25, th. a) que

$$N \{ n \leq x : a_n = \lambda \} \sim cx / \log^{1-\alpha} x,$$

avec $c = c(1) / \Gamma(\alpha) > 0$. (Noter que c est indépendant de λ : il y a *équidistribution* des valeurs de (a_n) dans A^* .)

(d) Appliquer la méthode de Landau aux f_λ et f_φ , en supposant les P_λ frobéniens. En déduire, pour tout $N \geq 1$, un développement asymptotique de $N \{n \leq x : a_n = \lambda\}$ modulo $O(x/\log^N x)$.

(e) Énoncer et démontrer des résultats analogues pour

$$N \{n \leq x : a_n^{(1)} = \lambda_1, \dots, a_n^{(r)} = \lambda_n\},$$

où les $a_n^{(i)}$ sont des fonctions multiplicatives à valeurs dans des anneaux commutatifs finis A_i . (Se ramener au cas d'une suite unique à valeurs dans $A = A_1 \times \dots \times A_r$.)

(6.11) Soit m un entier impair ≥ 3 . On considère la fonction multiplicative

$$n \mapsto \tau(n) \pmod{m}, \text{ à valeurs dans } A = \mathbf{Z}/m\mathbf{Z}.$$

Montrer que la condition (i) de (6.10) est satisfaite, et qu'il en est de même de (ii) pourvu que m ne soit pas divisible par 7. [On peut supposer que m est une puissance d'un nombre premier l , cf. [19], 4.2. Il faut alors vérifier que, si $l \neq 2, 7$, les $\tau(p)$, p premier $\neq l$, qui ne sont pas divisibles par l engendrent le groupe multiplicatif $(\mathbf{Z}/l^2\mathbf{Z})^*$. Pour $l \neq 3, 5, 23$ et 691 , cela résulte de ce que $\tau(p)$ peut prendre n'importe quelle valeur modulo l^2 , cf. [27]. Pour $l = 3, 5, 23, 691$, remarquer que le sous-groupe de $(\mathbf{Z}/l^2\mathbf{Z})^*$ engendré par les $\tau(p)$, $p \neq l$, se projette *sur* $(\mathbf{Z}/l\mathbf{Z})^*$ et contient 2 d'après (6.4); utiliser alors le fait connu que $2^{l-1} \not\equiv 1 \pmod{l^2}$ pour $l < 1093$.]

En déduire l'équidistribution des valeurs de $\tau(n)$ appartenant à $(\mathbf{Z}/m\mathbf{Z})^*$, lorsque m n'est pas divisible par 7.

(6.12) Montrer qu'il existe deux constantes c_+, c_- , avec $c_+ > c_- > 0$ telles que

$$N \{n \leq x : \tau(n) \equiv \lambda \pmod{7}\} \sim \begin{cases} c_+ x / \log^{1/2} x & \text{si } \left(\frac{\lambda}{7}\right) = 1 \\ c_- x / \log^{1/2} x & \text{si } \left(\frac{\lambda}{7}\right) = -1. \end{cases}$$

(Utiliser une méthode analogue à celle de (6.10).)

Exemple de minoration de $|a_p|$ pour $p \rightarrow \infty$.

(6.13) Soit $\alpha \mapsto \chi(\alpha)$ un caractère de Hecke d'un corps imaginaire quadratique K . Soit f le conducteur de χ . On suppose que χ est d'exposant entier $d \geq 1$, autrement dit que

$\chi((z)) = z^d$ pour tout $z \in K^*$ tel que $z \equiv 1 \pmod{\times \mathfrak{f}}$.

Posons

$$\sum_{\mathfrak{a}} \chi(\mathfrak{a}) q^{N(\mathfrak{a})} = \sum a_n q^n,$$

de sorte que

$$\sum a_n n^{-s} = L(s, \chi) = \prod_{\mathfrak{p} \notin \mathfrak{f}} (1 - \chi(\mathfrak{p}) N(\mathfrak{p})^{-s})^{-1}.$$

On sait que la série $\sum a_n q^n$ est une forme modulaire parabolique de poids $k = 1 + d$ et que c'est une fonction propre des opérateurs de Hecke. Si ω est le caractère d'ordre 2 qui correspond à K , on a $a_n = 0$ si $\omega(n) = -1$.

Soit P l'ensemble des nombres premiers p ne divisant pas $N(\mathfrak{f})$, et tels que $\omega(p) = 1$. Si $p \in P$, on a

$$a_p = \chi(\mathfrak{p}) + \chi(\bar{\mathfrak{p}}),$$

où \mathfrak{p} et $\bar{\mathfrak{p}}$ sont les idéaux premiers de O_K divisant p . Montrer que

$$|a_p| \gg p^{(k-3)/2-\varepsilon} \text{ pour tout } \varepsilon > 0.$$

[On peut se restreindre au cas où \mathfrak{p} est contenu dans la classe mod $N(\mathfrak{f})$ d'un idéal fixe \mathfrak{a} . Si l'on écrit alors $\mathfrak{p} = \mathfrak{a}(z)$, avec $z \equiv 1 \pmod{\times N(\mathfrak{f})}$, on a $a_p = \chi(\mathfrak{a}) z^d + \chi(\bar{\mathfrak{a}}) \bar{z}^d = A_d(x, y)$, où x, y sont les coordonnées de z par rapport à une \mathbf{Z} -base de \mathfrak{a}^{-1} , et où A_d est un polynôme homogène de degré d . Les coefficients de A_d sont des nombres algébriques, et A_d n'a aucun facteur multiple. D'après le théorème de Roth, on a

$$A_d(x, y) \gg (\sup(|x|, |y|))^{d-2-\varepsilon} \text{ pour } x, y \text{ premiers entre eux,}$$

d'où aussitôt le résultat cherché.]

Soit δ un nombre > 0 tel que, pour tout secteur angulaire de C de largeur $\sim 1/N$, il existe $p \ll N^\delta$ tel que l'élément z correspondant appartienne au secteur angulaire donné. (D'après Kovalčik, *Dokl.*, t. 219, 1974, on peut prendre pour δ tout nombre > 4 .) Montrer qu'il existe alors une constante $c > 0$ telle que

$$|a_p| \leq c p^{(k-1)/2-1/\delta}$$

pour une infinité de p tels que $\omega(p) = 1$.

Passage des fonctions modulaires aux formes modulaires.

(6.14) Soit $f = \sum_{n \geq -r} a_n q^n$ une fonction modulaire sur $\mathbf{SL}_2(\mathbf{Z})$ de poids $k \in \mathbf{Z}$, à coefficients rationnels. On suppose f holomorphe dans le demi-plan $\mathcal{J}(z) > 0$ mais pas nécessairement à la pointe ∞ .

(a) Soit l un nombre premier tel que $a_n = 0$ pour tout $n < 0$ divisible par l . Montrer que les séries

$$f' = \sum a_{ln} q^n \quad \text{et} \quad f'' = \sum_{l|n} a_n q^n$$

sont des formes modulaires l -adiques de poids k , au sens de [21].

(b) Soient l un nombre premier $\neq 2$, et $\varepsilon = \pm 1$ tels que $a_n = 0$ pour tout $n < 0$ tel que $\left(\frac{n}{l}\right) = \varepsilon$. Montrer que la série

$$f_- = \sum_{\left(\frac{n}{l}\right) = \varepsilon} a_n q^n$$

est une forme modulaire l -adique de poids k . (Même méthode que pour 5.2.)

Divisibilité des coefficients $c(n)$ de j .

(6.15) Soit D l'opérateur de dérivation $\sum a_n q^n \mapsto \sum n a_n q^n$, noté θ dans [21], [27]. Soient l un nombre premier $\neq 2$, et r un entier ≥ 1 .

(a) Montrer que, si h est une forme modulaire (mod l^r), de poids k , il existe une forme modulaire h' (mod l^r), de poids $k + 2 + l^{r-1}(l-1)$, telle que

$$D(h/\Delta) \equiv h'/\Delta \pmod{l^r}.$$

(Utiliser le lemme 3 de [27], p. 19, ainsi que le fait que

$$P \equiv E_{2+lr-1(l-1)} \pmod{l^r}.)$$

(b) Dédire de là que, pour tout $a \geq 0$, il existe une forme modulaire f_a (mod l^r), de poids $12 + a(2 + l^{r-1}(l-1))$, telle que

$$D^a(j) \equiv f_a/\Delta \pmod{l^r}.$$

(c) On prend $a = \frac{1}{2} l^{r-1}(l-1)$. Montrer que

$$D^a(j) \equiv j_\varepsilon \pmod{l^r}, \quad \text{où} \quad j_\varepsilon = \sum_{n=-1}^{\infty} \left(\frac{n}{l}\right) c(n) q^n.$$

En déduire, grâce à (b), l'existence d'une forme modulaire h de poids

$$12 + l^{r-1}(l-1) + \frac{1}{2} l^{2r-2}(l-1)^2 = 12 + k,$$

telle que

$$j - \left(\frac{-1}{l}\right) j_{\varepsilon} \equiv h/\Delta \pmod{l^r}.$$

Le terme constant de h est nul. En déduire que $h = f\Delta$, où f est une forme modulaire (mod l^r) de poids k , ce qui fournit une autre démonstration de (5.2 b).

(6.16) On conserve les notations de (6.15), et l'on prend $r = 1$, i.e. on calcule (mod l).

(a) Montrer que $j' \equiv 744 \pmod{l}$ si $l = 3, 5, 7, 11$, et que $j' \pmod{l}$ est de filtration $l - 1$ (au sens de [27], p. 24) si $l \geq 13$. En particulier, on a, pour tout $n \geq 1$:

$$\begin{aligned} c(3n) &\equiv 0 \pmod{3} \\ c(5n) &\equiv 0 \pmod{5} \\ c(7n) &\equiv 0 \pmod{7} \\ c(11n) &\equiv 0 \pmod{11} \\ c(13n) &\equiv c(13) \tau(n) \equiv -\tau(n) \pmod{13} \\ c(17n) &\equiv c(17) t_{16}(n) \equiv 4t_{16}(n) \pmod{17} \\ c(19n) &\equiv c(19) t_{18}(n) \equiv 7t_{18}(n) \pmod{19} \\ c(23n) &\equiv c(23) t_{22}(n) \equiv 4t_{22}(n) \pmod{23}, \end{aligned}$$

où, pour $k = 16, 18, 22$, on note $t_k(n)$ le coefficient de q^n dans l'unique forme parabolique normalisée de poids k .

(b) On a

$$D(j) = Q^2 R/\Delta = Q^2 R\Delta^{l-1}/\Delta^l,$$

d'où

$$D^{a+1}(j) \equiv D^a(Q^2 R\Delta^{l-1})/\Delta^l \pmod{l}.$$

Montrer que, si $l \geq 13$, $Q^2 R \Delta^{l-1}$ est de filtration $12l + 2$. En déduire que $D^a(Q^2 R\Delta^{l-1})$ est de filtration $12l + 2 + a(l+1)$ pour $a \leq l - 2$.

(c) On applique (b) avec $a = (l-3)/2$, de telle sorte que

$$D^a(Q^2 R\Delta^{l-1})/\Delta^l = D^{a+1}(j) \equiv j_{\varepsilon}, \quad \text{cf. (6.15 c).}$$

En déduire que la forme modulaire (mod l) $j - \left(\frac{-1}{l}\right) j_{\varepsilon}$ est de filtration $\frac{1}{2}(l-1)^2$, et que j_{ε} est de filtration $l^2 - l$. En particulier, ces formes sont $\not\equiv 0 \pmod{l}$.

(d) Si $l = 3$ (resp. 5, 7, 11), la forme $j - \left(\frac{-1}{l}\right)j_\varepsilon$ est nulle (resp. de filtration 0, 12, 40).

(e) Dédurre de (b) et (c) les congruences suivantes (dues à Kolberg [7]):

$$c(n) \equiv 0 \pmod{5} \quad \text{si} \quad \left(\frac{n}{5}\right) = -1$$

$$c(n) \equiv 2n \sigma_3(n) \pmod{7} \quad \text{si} \quad \left(\frac{n}{7}\right) = 1$$

$$c(n) \equiv 9n^2 \sigma_5(n) - 3n^3 \sigma_3(n) \pmod{11} \quad \text{si} \quad \left(\frac{n}{11}\right) = 1$$

$$c(n) \equiv 8\tau(n) - 3n^3 \sigma_5(n) - 2n^4 \sigma_3(n) \pmod{13} \quad \text{si} \quad \left(\frac{n}{13}\right) = -1.$$

(6.17) Soient l un nombre premier ≥ 7 , et r un entier > 0 . Montrer que, pour tout entier a , il existe une infinité d'entiers n tels que $c(n) \equiv a \pmod{l^r}$ et $\left(\frac{n}{l}\right) = -\left(\frac{-1}{l}\right)$. (Utiliser les exercices (6.16) et (6.5).)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ARTIN, E. Zur Theorie der L-Reihen mit allgemeinen Gruppencharakteren. *Abh. math. Semin. Univ. Hamburg*, 8 (1930), pp. 292-306 [*Collected Papers*, pp. 165-179].
- [2] DELANGE, H. Généralisation du théorème de Ikehara. *Ann. scient. Ec. Norm. Sup., Série 3*, 71 (1954), pp. 213-242 [*Math. Rev.*, t. 16, 921e].
- [3] — Sur la distribution des entiers ayant certaines propriétés. *Ann. scient. Ec. Norm. Sup., Série 3*, 73 (1956), pp. 15-74 [*Math. Rev.*, t. 18, 720a].
- [4] DELIGNE, P. Formes modulaires et représentations l -adiques. *Séminaire Bourbaki*, 1968/69, exposé 355, pp. 139-172. — Berlin, Springer-Verlag, 1971 (Lecture Notes in Mathematics, 179).
- [5] — et SERRE, J.-P. Formes modulaires de poids 1. *Ann. scient. Ec. Norm. Sup., Série 4*, 7 (1974), pp. 507-530.
- [6] HARDY, G. H. *Ramanujan*. Cambridge, Cambridge University Press, 1940; New York, Chelsea publishing Company, 1959 [*Math. Rev.*, t. 3, 71d].
- [7] KOLBERG O. Congruences for the coefficients of the modular invariant $j(\tau)$. *Math. Scand.* 10 (1962), pp. 173-181 [*Math. Rev.*, t. 26, 1287].
- [8] LANDAU, E. Über die Einteilung der positiven ganzen Zahlen in vier Klassen nach der Mindestzahl der zu ihrer additiven Zusammensetzung erforderlichen Quadrate. *Arch. der Math. und Phys.*, (3) 13 (1908), pp. 305-312.
- [9] LANG, S. and TROTTER, H. Frobenius Distributions in GL_2 -Extensions. Lecture Notes in Mathematics 504, Berlin, Springer-Verlag, 1976.