

UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI
Facultatea de Matematică și Informatică

Disertație masterală

Étale stuff

Autor:
Andrei Sipoș

Profesor coordonator:
Lect. dr. Victor Vuletescu

București, 2014

Cuprins

Introducere	v
1 Situl étale	1
1.1 Morfisme étale	1
1.2	2
2 De la étale la ℓ-adic	3
3 Numărarea punctelor	5

Introducere

Acest text își propune să:

- enunțe cadrul de desfășurare al coomologiei étale
- prezinte versiuni étale ale unor rezultate fundamentale în topologie, precum dualitatea Poincaré sau formulele de tip Lefschetz
- aplice aceste rezultate la studiul funcțiilor zeta asociate varietăților peste corpuri finite

Capitolul 1

Situl étale

Pîs pîs pîs

1.1 Morfisme étale

Definiția 1.1. Un morfism de inele $A \rightarrow B$ se numește **plat** dacă functorul $B \otimes_A \cdot : A\text{-Mod} \rightarrow B\text{-Mod}$ este exact.

Definiția 1.2. Un morfism de varietăți (sau scheme) $\phi : Y \rightarrow X$ este **plat** dacă morfismele locale $\mathcal{O}_{X, \phi(y)} \rightarrow \mathcal{O}_{Y, y}$ sunt plate pentru orice y din Y .

Definiția 1.3. Un morfism local de inele locale $f : A \rightarrow B$ se numește **neramificat** dacă $A/\mathfrak{m}_A \hookrightarrow B/f(\mathfrak{m}_A)B$ este o extindere finită și separabilă.

Definiția 1.4. Un morfism de varietăți (sau scheme) $\phi : Y \rightarrow X$ este **neramificat** dacă este de tip finit și morfismele locale $\mathcal{O}_{X, \phi(y)} \rightarrow \mathcal{O}_{Y, y}$ sunt neramificate pentru orice y din Y .

Definiția 1.5. Un morfism (regulat) între două varietăți este **étale** dacă este plat și neramificat.

Morfismele étale au următoarele proprietăți:

Propoziția 1.6. 1. Orice imersie deschisă este étală.

2. Compunerea a două morfisme étale este étală.

3. Un morfism care este schimbare de bază a unui morfism étale este étale.

4. Dacă $\phi \circ \psi$ și ϕ sunt étale, atunci și ψ este étale.

De acum încolo vom lucra cu o varietate X peste un corp algebric închis k .

O vecinătate étală a unui punct x din X este o aplicație étală $\phi : U \rightarrow X$ împreună cu un punct $u \in U$ cu $\phi(u) = x$. Un morfism de vecinătăți étale $(V, v) \rightarrow (U, u)$ este o aplicație regulată de la V la U care duce pe v în u (dacă există, este unică, din anumite proprietăți ale

morfismelor étale). Am obținut astfel o categorie index și putem defini **inelul local în x pentru topologia étală** ca fiind:

$$\mathcal{O}_{X,\bar{x}} = \varinjlim_{(U,u)} \Gamma(U, \mathcal{O}_U)$$

Dat fiind că orice vecinătate Zariski, fiind imersie deschisă, este étală, din proprietatea limitei inductive avem un morfism natural

$$\mathcal{O}_{X,x} \rightarrow \mathcal{O}_{X,\bar{x}}$$

1.2

Capitolul 2

De la étale la ℓ -adic

Capitolul 3

Numărarea punctelor

Problema pe care urmează să o formulăm a pornit de la cea a numărării punctelor de pe o curbă eliptică. Ne este cunoscută din studiul acelor curbe inegalitatea Hasse-Weil, care spune că pentru orice curbă eliptică X definită peste un corp finit \mathbb{F}_q , dacă notăm $N_m(X) = \#X(\mathbb{F}_{q^m})$, are loc relația:

$$|N_m(X) - (q^m + 1)| \leq 2\sqrt{q^m}$$

Mai precis, există două numere algebrice α_1, α_2 de modul \sqrt{q} astfel încât pentru orice m :

$$N_m(X) = 1 - \alpha_1^m - \alpha_2^m + q^m$$

André Weil a propus următoarea generalizare:

Teorema 3.1. (Conjecturile Weil) Fie X o varietate proiectivă netedă definită peste \mathbb{F}_q de dimensiune d . Atunci:

1. există $2d$ numere naturale b_0, \dots, b_{2d} și o familie de numere complexe $\{\alpha_{j,u}\}_{\substack{j \in \overline{0, 2d} \\ u \in \overline{1, b_j}}}$ astfel încât pentru orice m am:

$$N_m(X) = \sum_{j=0}^{2d} (-1)^j \left(\sum_{u=1}^{b_j} \alpha_{j,u}^m \right)$$

Mai mult, $b_0 = b_{2d} = 1, \alpha_{0,1} = 1, \alpha_{2d,1} = q^d$. Numărul $\sum_j (-1)^j b_j$ va fi notat cu χ .

2. pentru orice j , b_j este egal cu b_{2d-j} , iar $(\frac{q^d}{\alpha_{2d-j,1}}, \dots, \frac{q^d}{\alpha_{2d-j,b_j}})$ e o permutare a enumerării $(\alpha_{j,1}, \dots, \alpha_{j,b_j})$.
3. pentru orice j, u , avem că $\alpha_{j,u}$ e număr algebric de modul $q^{\frac{j}{2}}$.

Se observă că dacă X este curbă eliptică se reconstituie relația de mai devreme, cu $b_1 = 2 = \dim H^1(\mathbb{C}/\Lambda, \mathbb{Q})$ (pentru Λ o latice în planul complex).

Un mod mai pragmatic de a exprima coniecturile Weil este reprezentat de instrumentul funcțiilor generatoare.

Ne bazăm pe identitatea formală:

$$\log\left(\frac{1}{1-x}\right) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{x^m}{m}$$

scrisă eventual

$$\frac{1}{1-x} = \exp\left(\sum_{m=1}^{\infty} \frac{x^m}{m}\right)$$

ce se poate verifica via expansiune în serie Taylor în jurul lui zero.

Definind $Z_X(t) = \exp\left(\sum_{m=1}^{\infty} N_m \frac{t^m}{m}\right)$ (fixând pe X), obținem din punctul 1 al coniecturilor:

$$\begin{aligned} Z_X(t) &= \exp\left(\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{2d} (-1)^j \sum_{u=1}^{b_j} \alpha_{j,u}^m \frac{t^m}{m}\right) \\ &= \prod_{j=0}^{2d} \left(\prod_{u=1}^{b_j} \exp\left(\sum_{m=1}^{\infty} \frac{(\alpha_{j,u} t)^m}{m}\right)\right)^{(-1)^j} \\ &= \prod_{j=0}^{2d} \left(\frac{1}{\prod_{u=1}^{b_j} (1 - \alpha_{j,u} t)}\right)^{(-1)^j} \\ &= \prod_{j=0}^{2d} P_j(t)^{(-1)^{j+1}} \end{aligned}$$

unde am notat $P_j(t) = \prod_{u=1}^{b_j} (1 - \alpha_{j,u} t)$ (și am $P_0(t) = 1 - t$, $P_{2d}(t) = 1 - q^d t$).

Vom deriva acum din punctul 2 o relație pe care o va satisface $Z_X(t)$. Aplicăm relația de permutare între enumerări și obținem:

$$\begin{aligned} P_{2d-j}(t) &= \prod_u (1 - \alpha_{2d-j,u} t) = \prod_u \left(1 - \frac{q^d}{\alpha_{j,u}} t\right) \\ &= \left(\prod_u \alpha_{j,u}\right)^{-1} \prod_u (\alpha_{j,u} - q^d t) \\ &= \left(\prod_u \alpha_{j,u}\right)^{-1} (-1)^{b_j} (q^d t)^{b_j} \prod_u \left(1 - \frac{\alpha_{j,u}}{q^d t}\right) \\ &= \left(\prod_u \alpha_{j,u}\right)^{-1} (-1)^{b_j} (q^d t)^{b_j} P_j\left(\frac{1}{q^d t}\right) \end{aligned}$$

Folosim acum atât simetria b_j -urilor cât și permutarea enumerărilor:

$$\begin{aligned} P_j(t)P_{2d-j}(t) &= (q^d t)^{2b_j} (q^d)^{-b_j} P_j\left(\frac{1}{q^d t}\right) P_{2d-j}\left(\frac{1}{q^d t}\right) \\ &= (q^d)^{\frac{b_j + b_{2d-j}}{2}} t^{b_j + b_{2d-j}} P_j\left(\frac{1}{q^d t}\right) P_{2d-j}\left(\frac{1}{q^d t}\right) \end{aligned}$$

Însă $(\prod_s \alpha_{d,u})^2 = (q^d)^{b_d}$, deci $\prod_s \alpha_{d,u} = \pm (q^d)^{\frac{b_d}{2}}$, și pot scoate relația (pentru indicele d):

$$P_d(t) = \pm (-1)^{b_d} (q^d t)^{b_d} (q^d)^{\frac{b_d}{2}} P_d\left(\frac{1}{q^d t}\right)$$

Și obțin astfel formula pentru funcția Z_X :

$$\begin{aligned} Z_X(t) &= \prod_{j=0}^{2d} P_j(t)^{(-1)^{j+1}} \\ &= \pm \prod_{j=0}^{2d} P_j\left(\frac{1}{q^d t}\right)^{(-1)^{j+1}} (q^d)^{-\frac{\sum_j (-1)^{j+1} b_j}{2}} t^{-\sum_j (-1)^{j+1} b_j} \\ &= \pm q^{\frac{d_X}{2}} t^X Z_X\left(\frac{1}{q^d t}\right) \end{aligned}$$

numită **ecuația funcțională** a lui Z_X .

O altă reformulare ne este dată de următoarea substituție:

$$\zeta_X(s) = Z_X(q^{-s})$$

Notând pentru un punct închis $x \in X$ cu $\kappa(x)$ corpul rezidual al său, cu $\deg(x)$ gradul extinderii $\kappa(x) : \mathbb{F}_q$ și cu

$$N_m(x) = \begin{cases} \deg(x) & \text{dacă } \deg(x) \mid m \\ 0 & \text{altfel} \end{cases}$$

avem din cele cunoscute de la teoria schemelor:

$$N_m = \sum_x N_m(x)$$

Obținem rescrierile:

$$\begin{aligned}
 Z_X(t) &= \exp\left(\sum_{m \geq 1} N_m \frac{t^m}{m}\right) = \exp\left(\sum_{m \geq 1} \sum_x N_m(x) \frac{t^m}{m}\right) \\
 &= \exp\left(\sum_x \sum_{\substack{m \geq 1 \\ \deg(x) | m}} N_m(x) \frac{t^m}{m}\right) \\
 &= \exp\left(\sum_x \sum_{n \geq 1} \deg(x) \frac{t^{n \cdot \deg(x)}}{n \cdot \deg(x)}\right) \\
 &= \exp\left(\sum_x \sum_{n \geq 1} \frac{(t^{\deg(x)})^n}{n}\right) = \exp\left(\sum_x \log \frac{1}{1 - t^{\deg(x)}}\right) \\
 &= \exp \log \prod_x \frac{1}{1 - t^{\deg(x)}} = \prod_x \frac{1}{1 - t^{\deg(x)}}
 \end{aligned}$$

și deci

$$\zeta_X(s) = \prod_x \frac{1}{1 - (q^{\deg(x)})^{-s}} = \prod_x \frac{1}{1 - (\#k(x))^{-s}}$$

Ultima formulă are sens pentru o schemă oarecare, nu neapărat peste un corp finit. De pildă, înlocuind X cu $\text{Spec } \mathbb{Z}$, apare:

$$\zeta_{\text{Spec } \mathbb{Z}}(s) = \prod_{p \in \text{Max } \mathbb{Z}} \frac{1}{1 - (\#(\mathbb{Z}/p))^{-s}} = \prod_{p \text{ prim}} \frac{1}{1 - p^{-s}}$$

binecunoscuta funcție zeta a lui Riemann (punctele închise din $\text{Spec } \mathbb{Z}$ sunt precis idealele maximale ale lui \mathbb{Z}), ceea ce ne justifică notația.

Atenție, însă: funcția Z_X nu are sens decât pentru scheme definite pentru un corp finit!

Este clar că $s \in \mathbb{C}$ este zerou, respectiv pol, pentru ζ_X dacă și numai dacă q^{-s} va avea aceeași calitate pentru Z_X (și orice $t \in \mathbb{C}^*$ se poate scrie ca q^{-s} , e drept, într-o infinitate de moduri). Iau un astfel de s . Din exprimarea rațională a lui Z_X rezultă că $q^{-s} = \frac{1}{\alpha_{j,u}}$ pentru anumite j și u , iar ultima afirmație din conjecturi implică $|q^{-s}| = q^{-\frac{j}{2}}$. Scriu $s = a + bi$, cu $a, b \in \mathbb{R}$, și am $q^{-s} = e^{-s \ln q} = e^{-a \ln q - bi \ln q}$. Deci $q^{-\frac{j}{2}} = |e^{-a \ln q - bi \ln q}| = q^{-a}$ și $\frac{j}{2} = a = \text{Re } s$.

Invers, acum, dacă fac presupunerea că orice s zerou sau pol al lui ζ_X are proprietatea că $\text{Re } s = \frac{j}{2}$ (cu $j \in \overline{0, 2d}$), pot face următorul raționament. Iau $t \in \mathbb{C}^*$ zerou sau pol pentru Z_X și fie s cu $t = q^{-s}$. Atunci s este zerou/pol pentru ζ_X și $\text{Re } s = \frac{j}{2}$. Ca înainte, avem $|t| = |q^{-s}| = q^{-\text{Re } s} = q^{-\frac{j}{2}}$. Deci zerourile și polii lui Z_X au modulul $q^{-\frac{j}{2}}$.

Rezultă că acea condiție 3 este echivalentă cu faptul că funcția zeta a varietății are zerourile și polii pe liniile $\text{Re } s = \frac{j}{2}$, ceea ce justifică numele dat condiției de **ipoteză Riemann**.

Mai mult decât atât, această separare după modul a zerourilor și polilor lui Z_X ne permit să extragem P_j -urile din Z_X și să obținem în mod reciproc din ecuația funcțională condiția 2 din conjecturile Weil.

Toate aceste manipulări de formule ne învață să apreciem modul cum coomologia étală conduce în mod natural măcar la expresia rațională și la ecuația funcțională a funcției Z_X .

Să vedem cum. Mai întâi, vom obține o altă descriere a lui $X(\mathbb{F}_{q^m})$ cu ajutorul aplicației Frobenius.

Orice \mathbb{F}_q -algebră A admite endomorfismul Frobenius $a \mapsto a^q$, ce se dualizează la o aplicație $\text{Spec } A \rightarrow \text{Spec } A$. Această familie de aplicații se prelungește unic la o întreagă transformare naturală $\{F_X : X \rightarrow X\}_{X \in \mathbb{F}_q\text{-Sch}}$. Din naturalitate, rezultă că acționează pe varietăți afine sau proiective în mod firesc, prin ridicarea la puterea q a coordonatelor. În particular F_X are gradul $q^{\dim X}$, după cum se verifică ușor pe spațiile afine.

Rezultă deci $X(\mathbb{F}_{q^m}) = \text{Fix}(F_X^m)$.

Lema 3.2. $\Gamma_{F^m} \cdot \Delta_X = \sum_{P \in \text{Fix}(F_X^m)} P$ (în sensul că toate apar cu multiplicitate 1).

Demonstrație. E suficient să arătăm pentru $m = 1$ (F^m este Frobeniusul lui \mathbb{F}_{q^m}). Notez $F = F_X$.

Fie $P \in \text{Fix}(F)$. Înlocuiesc X cu o vecinătate afină a lui P , să zicem $U = \text{Spec } A$, cu $A = \mathbb{F}_q[t_1, \dots, t_n] = \mathbb{F}_q[T_1, \dots, T_n]_a$.

Atunci pentru orice i am $t_i \circ F = t_i^q$ și $(dt_i)_P \circ (dF)_P = (dt_i^q)_P = qt_i^{q-1}(dt_i)_P = 0$.

Ca urmare diferențiala lui F în P este zero, ca urmare graficul lui Frobenius nu este tangent la diagonală în (P, P) , iar numărul de intersecție (multiplicitatea) este 1. \square

Aplicând formula de punct fix a lui Lefschetz, rezultă (pentru $(\ell, q) = 1$):

$$N_m = \sum_r (-1)^r \text{Tr}(F_{|H^r(X, \mathbb{Q}_\ell)}^m)$$

Putem folosi formula pentru a prelucra funcția Z a lui X :

$$\begin{aligned} Z_X(t) &= \exp\left(\sum_{m=1}^{\infty} N_m \frac{t^m}{m}\right) \\ &= \exp\left(\sum_{m=1}^{\infty} \left(\sum_{r=0}^{2d} (-1)^r \text{Tr}(F_{|H^r(X, \mathbb{Q}_\ell)}^m)\right) \frac{t^m}{m}\right) \\ &= \prod_{r=0}^{2d} \exp\left(\sum_{m=1}^{\infty} \text{Tr}(F_{|H^r(X, \mathbb{Q}_\ell)}^m) \frac{t^m}{m}\right) (-1)^r \end{aligned}$$

Scriem acum fiecare $F_{|H^r(X, \mathbb{Q}_\ell)}$ ca matrice pătratică superior triunghiulară (eventual peste o extindere a lui \mathbb{F}_q) cu numărul de linii egal cu $b_r = \dim H^r(X, \mathbb{Q}_\ell)$. Se observă atunci că dacă elementele de pe diagonală (valorile proprii) sunt $\alpha_{r,1}, \dots, \alpha_{r,b_r}$, atunci $\text{Tr}(F_{|H^r(X, \mathbb{Q}_\ell)}^m)$ va fi egal cu $\sum_{i=1}^{b_r} \alpha_{r,i}^m$ și deci pot aplica exact același raționament ca mai devreme pentru a exprima rațional pe Z_X .

Vom avea $Z_X \in \mathbb{Q}_\ell(t) \cap \mathbb{Q}[[t]] \subseteq \mathbb{Q}(t)$, însă aceasta nu ne garantează că fiecare P_j este în $\mathbb{Q}[t]$ (că este „independent de ℓ ”) - aceasta se poate face doar presupunând ipoteza lui Riemann, care ne permite, după cum am spus și mai devreme, să separăm P_j -urile după modulul rădăcinilor.

Altă consecință a raționamentului precedent a fost că am identificat $\alpha_{j,u}$ -urile ca fiind valorile proprii ale operatorilor induși de Frobenius pe spațiile de coomologie.

Aceasta ne arată în particular că $b_0 = b_{2d} = 1$.

Trecem acum la demonstrarea simetriei între valorile proprii pe spațiile de ordin r și $2d - r$, relație care după cum am observat ne implică o ecuație funcțională.

Avem biliniara nedegenerată dată de dualitatea Poincaré:

$$\langle , \rangle = \eta_X \circ \cup : H^{2d-r}(X, \mathbb{Q}_\ell) \times H^r(X, \mathbb{Q}_\ell) \rightarrow H^{2d}(X, \mathbb{Q}_\ell) \simeq \mathbb{Q}_\ell(-d)$$

ce din start ne indică $b_r = b_{2d-r}$.

Știm că $F_r^* = F_{|H^r(X, \mathbb{Q}_\ell)}$ are adjunct relativ la \langle , \rangle :

$$\langle F_{*2d-r}(x), x' \rangle = \langle x, F_r^*(x') \rangle, \forall x \in H^{2d-r}(X, \mathbb{Q}_\ell), x' \in H^r(X, \mathbb{Q}_\ell)$$

Din considerente de algebră liniară rezultă că valorile proprii ale lui F_r^* coincid cu ale lui F_{*2d-r} . Însă $F_{*r} \circ F_r^* = q^d (= \deg F)$.

De aici rezultă că dacă $(\alpha_1, \dots, \alpha_v)$ sunt valorile proprii ale lui F_r^* , $(\frac{q^d}{\alpha_1}, \dots, \frac{q^d}{\alpha_v})$ sunt cele ale lui F_{*r} , deci (din cele anterioare) și ale lui F_{*2d-r}^* , i.e. exact ce ni se cerea. Iar faptul că $\alpha_{0,1} = 1$ și $\alpha_{2d,1} = q^d$ rezultă din modul cum acționează operatorii Frobenius pe H^0 , respectiv pe H^{2d} . (FCKGW DE CE??? trebuie văzut cum merge Frobeniusul)

În acest moment, tot ce ne rămâne este să demonstrăm ipoteza lui Riemann.