

*P. DELIGNE*

# COHOMOLOGIE ETALE

**S.G.A. 4 1/2**



Séminaire de Géométrie Algébrique du Bois-Marie

Cohomologie Étale

(SGA  $4\frac{1}{2}$ )

par P. Deligne

avec la collaboration de J.F. Boutot,  
A. Grothendieck, L. Illusie et J.L. Verdier

1977

## Typesetters note

This is a L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X rendition of Deligne et. al.'s *Cohomologie Étale*, Lecture Notes in Mathematics, 569, Springer-Verlag. The source code may be found at GitHub (<https://www.github.com/dkmiller/sga4.5>). It is an essentially unmodified version of the original. Most changes are slight, e.g. using script instead of roman letters for sheaves. The biggest is that  $\mathcal{H}om$  is used to denote “sheaf hom,” and  $R\mathcal{H}om$  its derived functor, while  $R\mathrm{hom}$  is used to denote the derived functor of the regular hom-functor. Any comments or corrections should be sent to [dkmiller@math.cornell.edu](mailto:dkmiller@math.cornell.edu).

## Introduction

Ce volume a pour but de faciliter au non-expert l'usage de la cohomologie  $\ell$ -adique. J'espère qu'il lui permettra souvent d'éviter le recours aux exposés touffus de SGA 4 et SGA 5. Il contient aussi quelques résultats nouveaux.

Le premier exposé, rédigé par J.F. Boutot, survole SGA 4. Il donne les principaux résultats – avec une généralité minimale, souvent insuffisante pour les applications – et une idée de leur démonstration. Pour des résultats complets, ou des démonstrations détaillées, SGA 4 reste indispensable.

Le “Rapport sur la formule des traces” contient une démonstration complétée de la formule des traces pour l'endomorphisme de Frobenius. La démonstration est celle donnée par Grothendieck dans SGA 5, élaguée de tout détail inutile. Ce rapport devrait permettre à l'utilisateur d'oublier SGA 5, qu'on pourra considérer comme une série de digression, certaines très intéressantes. Son existence permettra de publier prochainement SGA 5 tel quel. Il est complété par l'exposé “Applications de la formule des traces aux sommes trigonométriques” qui explique comment la formule des traces permet l'étude de sommes trigonométriques, et donne des exemples.

Le public visé par les autres exposés est plus limité, et leur style s'en ressent. L'exposé “Fonctions  $L$  modulo  $\ell^n$  et modulo  $p$ ” est une généralisation “modulaire” du Rapport, basée sur l'étude SGA 4 XVII 5.5 des puissances symétriques. L'exposé “La classe de cohomologie associée à un cycle” définit cette classes dans divers contextes, et donne la compatibilité entre intersections et cup-produits. Dans “Dualité” sont rassemblés quelques résultats connus, pour lesquels manquait une référence, et quelques compatibilités. L'exposé “Théorèmes de finitude en cohomologie  $\ell$ -adique” est nouveau. Il donne notamment, en cohomologie sans supports, des théorèmes de finitude analogues à ceux connus en cohomologie à supports compacts.

Pour plus de détails sur les exposés, je renvoie à leur introduction respective.

Je remercie enfin J.L. Verdier de m'avoir permis de reproduire ici ses notes “Catégories dérivées.” Elles restent je crois très utiles, et étaient : devenues introuvables.

Dans les références internes à ce volume, les exposés sont cités par un titre abrégé, indiqué entre [ ] dans la table des matières.

Bures-sur-Yvette, le 20 Septembre 1976

Pierre Deligne

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Cohomologie étale : les points de départ</b>	<b>2</b>
1	Topologies de Grothendieck . . . . .	2
2	Topologie étale . . . . .	8
3	Cohomologie des courbes . . . . .	12
4	Théorème de changement de base pour un morphisme propre . . . . .	18
5	Acyclicité locale des morphismes lisses . . . . .	24
6	Dualité de Poincaré . . . . .	30
<b>2</b>	<b>Rapport sur la formule des traces</b>	<b>34</b>
1	Quelques rappels . . . . .	34
2	$\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux . . . . .	36
3	Formule des traces et fonctions $L$ . . . . .	38
4	Réduction à des théorèmes en $\mathbb{Z}/\ell^n$ -cohomologie . . . . .	40
5	La méthode de Nielsen-Wecken . . . . .	45
6	Fin de la preuve de 4.10 . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Fonctions <math>L</math> modulo <math>\ell^n</math> et modulo <math>p</math></b>	<b>50</b>
1	Tenseurs symétriques . . . . .	50
2	Le Théorème . . . . .	53
3	Théorie d'Artin-Scheier . . . . .	55
4	Formule des traces modulo $p$ . . . . .	58
<b>4</b>	<b>La classe de cohomologie associée à un cycle</b>	<b>60</b>
1	Cohomologie à support et cup-produits . . . . .	60
2	La classe de cohomologie associée à un cycle . . . . .	64
3	Application : la formule des traces de Lefschetz dans le cas propre et lisse . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Dualité</b>	<b>74</b>
1	Bidualité locale, en dimension 1 . . . . .	74
2	La dualité de Poincaré pour les courbes, d'après M. Artin . . . . .	76
3	Dualité de Poincaré pour les courbes . . . . .	77
4	Compatibilité SGA 4 XVIII 3.1.10.3 . . . . .	80
<b>6</b>	<b>Applications de la formule des traces aux sommes trigonométriques</b>	<b>81</b>
1	Principes . . . . .	81
2	Dictionnaire . . . . .	89
3	Sommes à une variable . . . . .	92
4	Sommes de Gauss et sommes de Jacob . . . . .	96
5	Caractères de Hecke . . . . .	102
6	Les caractères de Hecke définis par les sommes de Jacobi . . . . .	104
7	Sommes de Kloosterman généralisées . . . . .	107
8	Autres applications . . . . .	113

<b>7</b>	<b>Théorèmes de finitude en cohomologie <math>\ell</math>-adique</b>	<b>115</b>
1	Énoncé des théorèmes . . . . .	115
2	Théorèmes génériques . . . . .	117
3	Preuve de 1.1 et constructibilité des faisceaux de cycles évanescents . . . . .	121
4	Bidualité locale . . . . .	124
5	Appendice, par L. Illusie . . . . .	124
<b>8</b>	<b>Catégories dérivées</b>	<b>130</b>
1	Catégories triangulées : définitions et exemples . . . . .	130
2	Les catégories quotients . . . . .	135
3	Les catégories dérivées d'une catégorie abélienne . . . . .	141
4	Les foncteurs dérivés . . . . .	145
5	Exemples . . . . .	148
<b>A</b>	<b>Erratum pour SGA 4, tome 3</b>	<b>150</b>

# Chapitre 1

## Cohomologie étale : les points de départ

### 1 Topologies de Grothendieck

A l'origine, les topologies de Grothendieck sont apparues comme sous-jacentes à sa théorie de la descente (cf. SGA 1 VI, VIII) ; l'usage des théorie de cohomologie correspondantes est plus tardif. La même démarche est suivi ici : en formalisant les notions classiques de localisation, de propriété locale et de recollement (1.1, 1.2, 1.3), en dégage le concept général de topologie de Grothendieck (1.6) ; pour en justifier l'introduction en géométrie algébrique, on démontre un théorème de descente fidèlement plat (1.4), généralisation du classique théorème de Hilbert (1.5).

Le lecteur trouvera une exposition plus compète, mais concise, du formalisme dans Giraud [Gir64]. Les notes de M. Artin : “Grothendieck topologies” [Art62] (chapitres I à III) restent également utiles. Les 866 pages des exposés I à V de SGA 4 sont précieuses lorsqu'on considère des topologies exotiques, telle celle qui donne naissance à la cohomologie cristalline ; pour utiliser la topologie étale si proche de l'intuition classique, il n'est pas indispensable de les lire.

#### 1.1 Cribles

Soient  $X$  un espace topologique et  $f : X \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction à valeur réelles sur  $X$ . La continuité de  $f$  est une propriété de nature locale ; autrement dit, si  $f$  est continue sur tout ouvert suffisamment petit de  $X$ ,  $f$  est continue sur  $X$  tout entier. Pour formaliser la notion de “propriété de nature locale,” nous introduirons quelques définitions.

On dit qu'un ensemble  $\mathcal{U}$  d'ouverts de  $X$  est un *crible* si pour tout  $U \in \mathcal{U}$  et  $V \subset U$ , on a  $V \in \mathcal{U}$ . On dit qu'un crible est *couvrant* si la réunion de tout les ouverts appartenant à ce crible est égale à  $X$ .

Etant donnée une famille  $\{U_i\}$  d'ouverts de  $X$ , le crible engendré par  $\{U_i\}$  est par définition l'ensemble des ouverts  $U$  de  $X$  tels que  $U$  soit contenu dans l'un des  $U_i$ .

On dit qu'une propriété  $P(U)$ , définie pour tout ouvert  $U$  de  $X$ , est *locale* si, pour tout crible couvrant  $\mathcal{U}$  de tout ouvert  $U$  de  $X$ ,  $P(U)$  est vraie si et seulement si  $P(V)$  est vraie pour tout  $V \in \mathcal{U}$ . Par exemple, étant donné  $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ , la propriété “ $f$  est continue sur  $U$ ” est locale.

#### 1.2 Faisceaux

Précisons la notion de fonction donnée localement sur  $X$ .

##### 1.2.1 Point de vue des cribles

Soit  $\mathcal{U}$  un crible d'ouverts de  $X$ . On appelle fonction donnée  $\mathcal{U}$ -localement sur  $X$  la donnée pour tout  $U \in \mathcal{U}$  d'une fonction  $f_U$  sur  $U$  telle que, si  $V \subset U$ , on ait  $f_V = f_U|_V$ .



### 1.2.2 Pointe de vue de Čech

Si le crible  $\mathcal{U}$  est engendré par une famille d'ouverts  $U_i$  de  $X$ , se donner une fonction  $\mathcal{U}$ -localement revient à se donner une fonction  $f_i$  sur chaque  $U_i$ , telle que  $f_i|_{U_i \cap U_j} = f_j|_{U_i \cap U_j}$ .

Autrement dit, si  $Z = \coprod U_i$ , se donner une fonction  $\mathcal{U}$ -localement revient à se donner une fonction sur  $Z$  qui soit constante sur les fibres de la projection naturelle  $Z \rightarrow X$ .

### 1.2.3

Les fonctions continues forment un faisceau ; cela signifie que pour tout crible couvrant  $\mathcal{U}$  d'un ouvert  $V$  de  $X$  et toute fonction donnée  $\mathcal{U}$ -localement  $\{f_U\}$  telle que chaque  $f_U$  soit continue sur  $U$ , il existe une unique fonction continue  $f$  sur  $V$  telle que  $f|_U = f_U$  pour tout  $U \in \mathcal{U}$ .

## 1.3 Champs

Précisons maintenant la notion de fibré vectoriel donné localement sur  $X$ .

### 1.3.1 Point de vue des cribles

Soit  $\mathcal{U}$  un crible d'ouverts de  $X$ . On appelle fibré vectoriel donné  $\mathcal{U}$ -localement sur  $X$  les données de

- a) un fibré vectoriel  $E_U$  sur chaque  $U \in \mathcal{U}$ ,
- b) si  $V \subset U$ , un isomorphisme  $\rho_{U,V} : E_V \xrightarrow{\sim} E_U|_V$ , vérifiant
- c) si  $W \subset V \subset U$ , le diagramme

$$\begin{array}{ccc} E_W & \xrightarrow{\rho_{U,W}} & E_U|_W \\ & \searrow \rho_{V,W} & \uparrow \rho_{U,V}|_W \\ & & E_V|_W \end{array}$$

commute, c'est-à-dire  $\rho_{U,W} = (\rho_{U,V} \text{ restreint à } W) \circ \rho_{V,W}$ .

### 1.3.2 Point de vue de Čech

Si le crible  $\mathcal{U}$  est engendré par une famille d'ouverts  $U_i$  de  $X$ , se donner un fibré vectoriel  $\mathcal{U}$ -localement revient à se donner :

- a) un fibré vectoriel  $E_i$  sur chaque  $U_i$ ,
- b) si  $U_{ij} = U_i \cap U_j = U_i \times_X U_j$ , un isomorphisme  $\rho_{ji} : E_i|_{U_{ij}} \xrightarrow{\sim} E_j|_{U_{ij}}$ , de sorte que
- c) si  $U_{ijk} = U_i \times_X U_j \times_X U_k$ , le diagramme

$$\begin{array}{ccc} E_i|_{U_{ijk}} & \xrightarrow{\rho_{ki}|_{U_{ijk}}} & E_k|_{U_{ijk}} \\ & \searrow \rho_{ji}|_{U_{ijk}} & \uparrow \rho_{kj}|_{U_{ijk}} \\ & & E_j|_{U_{ijk}} \end{array}$$

commute, c'est-à-dire  $\rho_{ki} = \rho_{kj} \circ \rho_{ji}$  sur  $U_{ijk}$ .

Autrement dit, si  $Z = \coprod U_i$  et si  $\pi : Z \rightarrow X$  est la projection naturelle, se donner un fibré vectoriel  $\mathcal{U}$ -localement revient à se donner :

- a) un fibré vectoriel  $E$  sur  $Z$ ,
- b) si  $x$  et  $y$  sont deux points de  $Z$  tels que  $\pi(x) = \pi(y)$ , un isomorphisme  $\rho_{yx} : E_x \xrightarrow{\sim} E_y$  entre les fibres de  $E$  en  $x$  et en  $y$ , dépendant continûment de  $(x, y)$  et tel que,
- c) si  $x, y$  et  $z$  sont trois points de  $Z$  tels que  $\pi(x) = \pi(y) = \pi(z)$ , on ait  $\rho_{zx} = \rho_{zy} \circ \rho_{yx}$ .

## 1.3.3

Un fibré vectoriel  $E$  sur  $X$  définit un fibré vectoriel donné  $\mathcal{U}$ -localement  $E_{\mathcal{U}}$  ; le système des restrictions  $E_U$  de  $E$  aux objets de  $\mathcal{U}$ . Le fait que la notion de fibré vectoriel est de nature locale peut s'exprimer ainsi : pour tout crible couvrant  $\mathcal{U}$  de  $X$ , le foncteur  $E \mapsto E_{\mathcal{U}}$ , des fibrés vectoriels sur  $X$  dans les fibrés vectoriels donnés  $\mathcal{U}$ -localement, est une équivalence de catégories.

## 1.3.4

Si dans 1 on remplace “ouvert de  $X$ ” par “partie de  $X$ ”, on obtient la notion de crible de sous-espaces de  $X$ . Dans ce cadre aussi on dispose de théorèmes de recollement. Par exemple : soient  $X$  un espace et  $\mathcal{C}$  un crible de sous-espaces de  $X$  engendré par un recouvrement fermé localement fini de  $X$ , alors le foncteur  $E \mapsto E_{\mathcal{C}}$ , des fibrés vectoriels sur  $X$  dans les fibrés vectoriels donnés  $\mathcal{C}$ -localement est une équivalence de catégories.

En géométrie algébrique, il est utile de considérer aussi des “cribles d'espaces au-dessus de  $X$ ” ; c'est ce que nous verrons au paragraphe suivant.

## 1.4 Descente fidèlement plat

## 1.4.1

Dans le cadre des schémas, la topologie de Zariski n'est pas assez fine pour l'étude des problèmes non linéaires et on est amené à remplacer dans les définitions précédentes les immersions ouvertes par des morphismes plus généraux. De ce point de vue, les techniques de descente apparaissent comme des techniques de localisation. Ainsi l'énoncé de descente suivant peut s'exprimer en disant que les propriétés considérées sont de nature locale pour la topologie fidèlement plate (on dit qu'un morphisme de schémas est fidèlement plat s'il est plat et surjectif).

**Proposition 1.4.2.** *Soient  $A$  un anneau et  $B$  une  $A$ -algèbre fidèlement plate. Alors :*

- (i) *Une suite  $\Sigma = (M' \rightarrow M \rightarrow M'')$  de  $A$ -modules est exacte dès que la suite  $\Sigma_{(B)}$  qui s'en déduit par extension des scalaires à  $B$  est exacte.*
- (ii) *Un  $A$ -module  $M$  est de type fini (resp. de présentation finie, plat, localement libre de rang fini, inversible (i.e. localement libre de rang un)) dès que le  $B$ -module  $M_{(B)}$  l'est.*

*Démonstration.* (i) Le foncteur  $M \mapsto M_{(B)}$  étant exact (platitude de  $B$ ), il suffit de montrer que, si un  $A$ -module  $N$  est non nul,  $N_{(B)}$  est non nul. Si  $N$  est non nul,  $N$  contient un sous-module monogène non nul  $A/\mathfrak{a}$  ; alors  $N_{(B)}$  contient un sous-module monogène  $(A/\mathfrak{a})_{(B)} = B/\mathfrak{a}B$ , non nul par surjectivité du morphisme structural  $\varphi : \text{Spec}(B) \rightarrow \text{Spec}(A)$  (si  $V(\mathfrak{a})$  est non vide,  $\varphi^{-1}(V(\mathfrak{a})) = V(\mathfrak{a}B)$  est non vide).

(ii) Pour toute famille  $(x_i)$  d'éléments de  $M_{(B)}$ , il existe un sous-module de type fini  $M'$  de  $M$  tel que  $M'_{(B)}$  contienne les  $x_i$ . Si  $M_{(B)}$  est de type fini et si les  $x_i$  engendrent  $M_{(B)}$ , on a  $M'_{(B)} = M_{(B)}$ , donc  $M' = M$  et  $M$  est de type fini.  $\square$

Si  $M_{(B)}$  est de présentation finie, on peut, d'après ce qui précède, trouver une surjection  $A^n \rightarrow M$ . Si  $N$  est le noyau de cette surjection, le  $B$ -module  $N_{(B)}$  est de type fini, donc  $N$  l'est, et  $M$  est de présentation finie. L'assertion pour “flat” résulte aussitôt de (i) ; “localement libre de rang fini” signifie “plat et de présentation finie” et le rang se teste par extension des scalaires à des corps.

## 1.4.3

Soient  $X$  un schéma et  $\mathcal{S}$  une classe de  $X$ -schémas stable par produit fibré sur  $X$ . Une classe  $\mathcal{U} \subset \mathcal{S}$  est un *crible* sur  $X$  (relativement à  $\mathcal{S}$ ) si, pour tout morphisme  $\varphi : V \rightarrow U$  de  $X$ -schémas, avec  $U, V \in \mathcal{S}$  et  $U \in \mathcal{U}$ , on a  $V \in \mathcal{U}$ . Le crible *engendré* par une famille  $\{U_i\}$  de  $X$ -schémas dans  $\mathcal{S}$  est la classe des  $V \in \mathcal{S}$  tels qu'il existe un morphisme de  $X$ -schémas de  $V$  dans l'un des  $U_i$ .

## 1.4.4

Soit  $\mathcal{U}$  un crible sur  $X$ . On appelle module quasi-cohérent donné  $\mathcal{U}$ -localement sur  $X$  la donnée de

- a) un module quasi-cohérent  $E_U$  sur chaque  $U \in \mathcal{U}$ ,
- b) pour tout  $U \in \mathcal{U}$  et pour tout morphisme  $\varphi : V \rightarrow U$  de  $X$ -schémas dans  $\mathcal{S}$ , un isomorphisme  $\rho_\varphi : E_V \xrightarrow{\sim} \varphi^* E_U$ , ceux-ci étant tels que
- c) si  $\psi : W \rightarrow V$  est un morphisme de  $X$ -schémas dans  $\mathcal{S}$ , le diagramme

$$\begin{array}{ccc} E_W & \xrightarrow{\rho_{\varphi \circ \psi}} & \psi^* \varphi^* E_U \\ & \searrow \rho_\psi & \uparrow \psi^* \rho_\varphi \\ & & \psi^* E_V \end{array}$$

commute, c'est-à-dire  $\rho_{\varphi \circ \psi} = (\psi^* \rho_\varphi) \circ \rho_\psi$ .

Si  $E$  est un module quasi-cohérent sur  $X$ , on note  $E_{\mathcal{U}}$  le module donné  $\mathcal{U}$ -localement valant  $\varphi_U^* E$  sur  $\varphi : U \rightarrow X$  et tel que, pour tout morphisme  $\psi : V \rightarrow U$  l'isomorphisme de restriction  $\rho_\psi$  soit l'isomorphisme canonique  $E_V = (\varphi_U \circ \psi)^* E \xrightarrow{\sim} \psi^* \varphi_U^* E = \psi^* E_U$ .

**Théorème 1.4.5.** *Soit  $\{U_i\} \in \mathcal{S}$  une famille finie de  $X$ -schémas plats sur  $X$  telle que  $X$  soit la réunion des images des  $U_i$ , et soit  $\mathcal{U}$  le crible engendré par  $\{U_i\}$ . Alors le foncteur  $E \mapsto E_{\mathcal{U}}$  est une équivalence de la catégorie des modules quasi-cohérents sur  $X$  avec la catégorie des modules quasi-cohérents donnés  $\mathcal{U}$ -localement.*

*Démonstration.* Nous ne traiterons que le cas où  $x$  est affine et où  $\mathcal{U}$  est engendré par un  $X$ -schéma affine  $U$  fidèlement plat sur  $X$ . La réduction à ce cas est formelle. On pose  $X = \text{Spec}(A)$  et  $U = \text{Spec}(B)$ .

Si le morphisme  $U \rightarrow X$  admet une section,  $X$  appartient au crible  $\mathcal{U}$  et l'assertion est évidente. Nous nous réduisons à ce cas.

Un module quasi-cohérent donné  $\mathcal{U}$ -localement définit des modules  $M'$ ,  $M''$  et  $M'''$  sur  $U$ ,  $U \times_X U$  et  $U \times_X U \times_X U$ , et des isomorphismes  $\rho : p^* M^\bullet \simeq M^\bullet$  pour tout morphisme de projection  $p$  entre ces espaces ; c'est là un *diagramme cartésien*

$$M^* : M' \rightrightarrows M'' \rightrightarrows M'''$$

au-dessus de

$$U_* : U \rightrightarrows U \times_X U \rightrightarrows U \times_X U \times_X U.$$

Réciproquement  $M^*$  détermine le module donné  $\mathcal{U}$ -localement : pour  $V \in \mathcal{U}$ , il existe  $\varphi : V \rightarrow U$  et on pose  $M_U = \varphi^* M'$  ; pour  $\varphi_1, \varphi_2 : V \rightarrow U$ , on a une identification naturelle  $\varphi_1^* M' \simeq (\varphi_1 \times \varphi_2)^* M'' \simeq \varphi_2^* M'$ , et on voit en utilisant  $M'''$  que ces identifications sont compatibles, de sorte que la définition est légitime. Bref, il revient au même de se donner un module  $\mathcal{U}$ -localement ou un diagramme  $M^*$  cartésien sur  $U_*$ .

Traduisons en termes algébriques : se donner  $M^*$  revient à se donner un diagramme cartésien de modules

$$M' \begin{array}{c} \xrightarrow{\partial_0} \\ \xrightarrow{\partial_1} \end{array} M'' \begin{array}{c} \xrightarrow{\partial_0} \\ \xrightarrow{\partial_1} \\ \xrightarrow{\partial_2} \end{array} M'''$$

au-dessus du diagramme d'anneaux

$$B \begin{array}{c} \xrightarrow{\partial_0} \\ \xrightarrow{\partial_1} \end{array} B \otimes_A B \begin{array}{c} \xrightarrow{\partial_0} \\ \xrightarrow{\partial_1} \\ \xrightarrow{\partial_2} \end{array} B \otimes_A B \otimes_A B$$

(précisons : on a  $\partial_i(bm) = \partial_i(b) \cdot \partial_i(m)$ , les identités usuelles telles que  $\partial_0 \partial_1 = \partial_0 \partial_0$  sont vraies, et “cartésien” signifie que les morphismes  $\partial_i : M' \otimes_{B, \partial_i} (B \otimes_A B) \rightarrow M''$  et  $M'' \otimes_{B \otimes_A B, \partial_i} (B \otimes_A B \otimes_A B) \rightarrow M'''$  sont des isomorphismes).

Le foncteur  $E \mapsto E_{\mathcal{U}}$  devient le foncteur qui, à un  $A$ -module  $M$ , associe

$$M^* = (M \otimes_A B \rightrightarrows M \otimes_A B \otimes_A B \rightrightarrows M \otimes_A B \otimes_A B \otimes_A B).$$

Il admet pour adjoint à droite le foncteur

$$(M' \rightrightarrows M'' \rightrightarrows M''') \longmapsto \ker(M' \rightrightarrows M''').$$

Il nous faut prouver que les flèches d'adjonction

$$M \rightarrow \ker(M \otimes_A B \rightrightarrows M \otimes_A B \otimes_A B)$$

et

$$\ker(M' \rightrightarrows M'') \otimes_A B \rightarrow M'$$

sont des isomorphismes. D'après (1.4.2.i), il suffit de le prouver après un changement de base fidèlement plat  $A \rightarrow A'$  ( $B$  devenant  $B' = B \otimes_A A'$ ). Prenant  $A' = B$ , ceci nous ramène au cas où  $U \rightarrow X$  admet une section.  $\square$

## 1.5 Un cas particulier : le théorème 90 de Hilbert

### 1.5.1

Soient  $k$  un corps,  $k'$  une extension galoisienne de  $k$  et  $G = \text{Gal}(k'/k)$ . Alors l'homomorphisme

$$\begin{aligned} k' \otimes_k k' &\rightarrow \bigoplus_{\sigma \in G} k' \\ x \otimes y &\mapsto \{x \cdot \sigma(y)\}_{\sigma \in G} \end{aligned}$$

est bijectif.

On en déduit qu'il revient au même de se donner un module localement pour le crible engendré par  $\text{Spec}(k')$  sur  $\text{Spec}(k)$  ou de se donner un  $k'$ -espace vectoriel muni d'une action semi-linéaire de  $G$ , c'est-à-dire :

- a) un  $k'$ -espace vectoriel  $V'$ ,
- b) pour tout  $\sigma \in G$ , un endomorphisme  $\varphi_\sigma$  de la structure de groupe de  $V'$  tel que  $\varphi_\sigma(\lambda v) = \sigma(\lambda)\varphi_\sigma(v)$ , pour tout  $\lambda \in k'$  et  $v \in V'$ , vérifiant la condition
- c) pour tout  $\sigma, \tau \in G$ , on a  $\varphi_{\tau\sigma} = \varphi_\tau \circ \varphi_\sigma$ .

Soit  $V = V'^G$  le groupe des invariants par cette action de  $G$  ; c'est un  $k$ -espace vectoriel et, d'après le théorème 1.4.5, on a :

**Proposition 1.5.2.** *L'inclusion de  $V$  dans  $V'$  définit un isomorphisme  $V \otimes_k k' \xrightarrow{\sim} V'$ .*

En particulier, si  $V'$  est de dimension 1 et si  $v' \in V$  est non nul,  $\varphi_\sigma$  est déterminé par la constante  $c(\sigma) \in k'^\times$  telle que  $\varphi_\sigma(v') = c(\sigma)v'$  et la condition c) s'écrit

$$c(\tau\sigma) = c(\tau) \cdot \tau(c(\sigma)).$$

D'après la proposition il existe un vecteur invariant non nul  $v = \mu v'$ ,  $\mu \in k'^\times$ . On a donc pour tout  $\sigma \in G$ ,

$$c(\sigma) = \mu \cdot \sigma(\mu^{-1}).$$

Autrement dit tout 1-cocycle de  $G$  à valeurs dans  $k'^\times$  est un cobord :

**Corollaire 1.5.3.** *On a  $H^1(G, k'^\times) = 0$ .*

## 1.6 Topologies de Grothendieck

Nous transcrivons maintenant les définitions des paragraphes précédents dans un cadre abstrait englobant à la fois le cas des espaces topologiques et celui des schémas.

## 1.6.1

Soient  $\mathcal{S}$  une catégorie et  $U$  un objet de  $\mathcal{S}$ . On appelle *crible* sur  $U$  un sous-ensemble  $\mathcal{U}$  de  $\text{Ob}(\mathcal{S}/U)$  tel que si  $\varphi : V \rightarrow U$  appartient à  $\mathcal{U}$  et si  $\psi : W \rightarrow V$  est un morphisme dans  $\mathcal{S}$ , alors  $\varphi \circ \psi : W \rightarrow U$  appartient à  $\mathcal{U}$ .

Si  $\{\varphi_i : U_i \rightarrow U\}$  est une famille de morphismes, le crible engendré par les  $U_i$  est par définition l'ensemble des morphismes  $\varphi : V \rightarrow U$  qui se factorisent à travers l'un des  $\varphi_i$ .

Si  $\mathcal{U}$  est un crible sur  $U$  et si  $\varphi : V \rightarrow U$  est un morphisme, la restriction  $\mathcal{U}_V$  de  $\mathcal{U}$  à  $V$  est par définition le crible sur  $V$  constitué par les morphismes  $\psi : W \rightarrow V$  tels que  $\varphi \circ \psi : W \rightarrow U$  appartienne à  $\mathcal{U}$ .

## 1.6.2

La donnée d'une *topologie de Grothendieck* sur  $\mathcal{S}$  consiste en la donnée pour tout objet  $U$  de  $\mathcal{S}$  d'un ensemble  $\mathcal{C}(U)$  de cribles sur  $U$ , dits cribles couvrants, de telle sorte que les axiomes suivants soient satisfaits :

- a) Le crible engendré par l'identité de  $U$  est couvrant.
- b) Si  $\mathcal{U}$  est un crible couvrant sur  $U$  et si  $V \rightarrow U$  est un morphisme, le crible  $\mathcal{U}_V$  est couvrant.
- c) Un crible localement couvrant est couvrant. Autrement dit, si  $\mathcal{U}$  est un crible couvrant sur  $U$  et si  $\mathcal{U}'$  est un crible sur  $U$  tel que, pour tout  $V \rightarrow U$  appartenant à  $\mathcal{U}$ , le crible  $\mathcal{U}'_V$  est couvrant, alors  $\mathcal{U}'$  est couvrant.

On appelle *site* la donnée d'une catégorie munie d'une topologie de Grothendieck.

## 1.6.3

Étant donnée un site  $\mathcal{S}$ , on appelle *préfaisceau* sur  $\mathcal{S}$  un foncteur contravariant  $\mathcal{F}$  de  $\mathcal{S}$  dans la catégorie des ensembles. Pour tout objet  $U$  de  $\mathcal{S}$ , on appelle section de  $\mathcal{F}$  au-dessus de  $U$  les éléments de  $\mathcal{F}(U)$ . Pour tout morphisme  $V \rightarrow U$  et pour tout  $s \in \mathcal{F}(U)$ , on note  $s|_V$  ( $s$  restreint à  $V$ ) l'image de  $s$  dans  $\mathcal{F}(V)$ .

Si  $\mathcal{U}$  est un crible sur  $U$ , on appelle section donnée  $\mathcal{U}$ -localement la donnée, pour tout  $V \rightarrow U$  appartenant à  $\mathcal{U}$ , d'une section  $s_V \in \mathcal{F}(V)$  telle que, pour tout morphisme  $W \rightarrow V$ , on ait  $s_V|_W = s_W$ . On dit que  $\mathcal{F}$  est un *faisceau* si, pour tout objet  $U$  de  $\mathcal{S}$ , pour tout crible couvrant  $\mathcal{U}$  sur  $U$  et pour tout section donnée  $\mathcal{U}$ -localement  $\{s_V\}$ , il existe une unique section  $s \in \mathcal{F}(U)$  telle que  $s|_V = s_V$ , pour tout  $V \rightarrow U$  appartenant à  $\mathcal{U}$ .

On définit de manière analogue les *faisceaux abéliens* en remplaçant la catégorie des ensembles par celle des groupes abéliens. On montre que la catégorie des faisceaux abéliens sur  $\mathcal{S}$  est une catégorie abélienne possédant suffisamment d'injectifs. Une suite  $\mathcal{F} \xrightarrow{f} \mathcal{G} \xrightarrow{g} \mathcal{H}$  de faisceaux est exacte si, pour tout objet  $U$  de  $\mathcal{S}$ , et pour tout  $s \in \mathcal{G}(U)$  telle que  $g(s) = 0$ , il existe localement  $t$  tel que  $f(t) = s$ ; i.e. s'il existe un crible couvrant  $\mathcal{U}$  sur  $U$  et pour tout  $V \in \mathcal{U}$ , une section  $t_V$  de  $\mathcal{F}$  sur  $V$  telle que  $f(t_V) = s|_V$ .

## 1.6.4 Exemples

Nous en avons vu deux plus haut.

- a) Soient  $X$  un espace topologique et  $\mathcal{S}$  la catégorie dont les objets sont les ouverts de  $X$  et les morphismes les inclusions naturelles. La topologie de Grothendieck sur  $\mathcal{S}$  correspondant à la topologie usuelle de  $X$  est celle pour laquelle un crible  $\mathcal{U}$  sur un ouvert  $U$  de  $X$  est couvrant si la réunion des ouverts appartenant à ce crible est égale à  $U$ . Il est clair que la catégorie des faisceaux sur  $\mathcal{S}$  est équivalente à la catégorie des faisceaux sur  $X$  au sens usuel.
- b) Soient  $X$  un schéma et  $\mathcal{S}$  la catégorie des schémas sur  $X$ . On appelle topologie fpqc (fidèlement plate quasi-compacte) sur  $\mathcal{S}$  la topologie de Grothendieck pour laquelle un crible sur un  $X$ -schéma  $U$  est couvrant s'il est engendré par une famille finie de morphismes plats dont les images recouvrent  $U$ .

## 1.6.5 Cohomologie

On supposera toujours que la catégorie  $\mathcal{S}$  a un objet final  $X$ . Alors on appelle sections globales d'un faisceau abélien  $\mathcal{F}$ , et on note  $\Gamma\mathcal{F}$  ou  $H^0(X, \mathcal{F})$ , le groupe  $\mathcal{F}(X)$ . Le foncteur  $\mathcal{F} \mapsto \Gamma\mathcal{F}$  est un foncteur exact à gauche de la catégorie des faisceaux abéliens sur  $\mathcal{S}$  dans la catégorie des groupes abéliens, ou note

$H^i(X, -)$  ses dérivés (ou satellites). Ces groupes de cohomologie représentent les obstructions à passer du local au global. Par définition, si  $0 \rightarrow \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{G} \rightarrow \mathcal{H} \rightarrow 0$  est une suite exacte de faisceaux abéliens, on a une suite exacte longue de cohomologie :

$$\begin{aligned} 0 \longrightarrow H^0(X, \mathcal{F}) \longrightarrow H^0(X, \mathcal{G}) \longrightarrow H^0(X, \mathcal{H}) \longrightarrow H^1(X, \mathcal{F}) \longrightarrow \dots \\ \dots \longrightarrow H^n(X, \mathcal{F}) \longrightarrow H^n(X, \mathcal{G}) \longrightarrow H^n(X, \mathcal{H}) \longrightarrow H^{n+1}(X, \mathcal{F}) \longrightarrow \dots \end{aligned}$$

### 1.6.6

Étant donné un faisceau abélien  $\mathcal{F}$  sur  $\mathcal{S}$ , on appelle  $\mathcal{F}$ -*torseur* un faisceau  $\mathcal{G}$  muni d'une action  $\mathcal{F} \times \mathcal{G} \rightarrow \mathcal{G}$  de  $\mathcal{F}$  telle que localement (après restriction à tous les objets d'un crible couvrant l'objet final  $X$ )  $\mathcal{G}$  muni de l'action de  $\mathcal{F}$  soit isomorphe à  $\mathcal{F}$  muni de l'action canonique  $\mathcal{F} \times \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{F}$  par translations. On peut montrer que  $H^1(X, \mathcal{F})$  s'interprète comme l'ensemble des classes à isomorphisme près de  $\mathcal{F}$ -torseurs.

## 2 Topologie étale

On spécialise les définitions du chapitre précédent au cas de la topologie étale d'un schéma  $X$  (2.1, 2.2, 2.3). La cohomologie correspondante coïncide dans le cas où  $X$  est le spectre d'un corps  $K$  avec la cohomologie galoisienne de  $K$  (2.4).

### 2.1 Topologie étale

Nous commencerons par quelques rappels sur la notion de morphisme étale.

**Définition 2.1.1.** Soit  $A$  un anneau (commutatif). On dit qu'une  $A$ -algèbre  $B$  est étale si  $B$  est une  $A$ -algèbre de présentation finie et si les conditions équivalentes suivantes sont vérifiées :

a) Pour toute  $A$ -algèbre  $C$  et pour tout idéal de carré nul  $J$  de  $C$ , l'application canonique

$$\mathrm{hom}_{A\text{-alg}}(B, C) \rightarrow \mathrm{hom}_{A\text{-alg}}(B, C/J)$$

est une bijection.

b)  $B$  est un  $A$ -module plat et  $\Omega_{B/A} = 0$  (on note  $\Omega_{B/A}$  le module des différentielles relatives).

c) Soit  $B = A[X_1, \dots, X_n]/I$  une présentation de  $B$ . Alors pour tout idéal premier  $\mathfrak{p}$  de  $A[X_1, \dots, X_n]$  contenant  $I$ , il existe des polynômes  $P_1, \dots, P_n \in I$  tels que  $I_{\mathfrak{p}}$  soit engendré par les images de  $P_1, \dots, P_n$  et  $\det(\partial P_i / \partial X_j) \notin \mathfrak{p}$ .

(cf. [GR71, I] ou [Ray70, V])

On dit qu'un morphisme de schémas  $f : X \rightarrow S$  est *étale* si pour tout  $x \in X$  il existe un voisinage ouvert affine  $U = \mathrm{Spec}(A)$  de  $f(x)$  et un voisinage ouvert affine  $V = \mathrm{Spec}(B)$  de  $x$  dans  $X \times_S U$  tel que  $B$  soit une  $A$ -algèbre étale.

#### 2.1.2 Exemples

- a) Si  $A$  est un corps, une  $A$ -algèbre  $B$  est étale si et seulement si c'est un produit fini d'extensions séparables de  $A$ .
- b) Si  $X$  et  $S$  sont des schémas de type fini sur  $\mathbb{C}$ , un morphisme  $f : X \rightarrow S$  est étale si et seulement si son analyticité  $f^{\mathrm{an}} : X^{\mathrm{an}} \rightarrow Y^{\mathrm{an}}$  est un isomorphisme local.

### 2.1.3 Sorite

- a) (changement de base) Si  $f : X \rightarrow S$  est un morphisme étale, il en est de même de  $f_{S'} : X \times_S S' \rightarrow S'$  pour tout morphisme  $S' \rightarrow S$ .
- b) (composition) Le composé de deux morphismes étales est un morphisme étale.
- c) Si  $f : X \rightarrow S$  et  $g : Y \rightarrow S$  sont deux morphismes étales, tout  $S$ -morphisme de  $X$  dans  $Y$  est étale.
- d) (descente) Soit  $f : X \rightarrow S$  un morphisme. S'il existe un morphisme fidèlement plat  $S' \rightarrow S$ , tel que  $f_{S'} : X \times_S S' \rightarrow S'$  soit étale, alors  $f$  est étale.

### 2.1.4

Soit  $X$  un schéma. Soit  $\mathcal{S}$  la catégorie des  $X$ -schémas étales; d'après (2.1.3.c) tout morphisme de  $\mathcal{S}$  est un morphisme étale. On appelle *topologie étale* sur  $\mathcal{S}$  la topologie pour laquelle un crible sur  $U$  est couvrant s'il est engendré par une famille finie de morphismes  $\varphi_i : U_i \rightarrow U$  tels que la réunion des images des  $\varphi_i$  recouvre  $U$ . On appelle *site étale* de  $X$ , et note  $X_{\text{ét}}$ , le site défini par  $\mathcal{S}$  de la topologie étale.

## 2.2 Exemples de faisceaux

### 2.2.1 Faisceau constant

Soit  $C$  un groupe abélien et supposons pour simplifier  $X$  noethérien. On notera  $\underline{C}_X$  (ou même  $C$  s'il n'y a pas d'ambiguïté) le faisceau défini par  $U \mapsto C^{\pi_0(U)}$ , où  $\pi_0(U)$  est l'ensemble (fini) des composantes connexes de  $U$ . Le cas le plus important sera  $C = \mathbb{Z}/n$ . On a donc par définition

$$H^0(X, \mathbb{Z}/n) = (\mathbb{Z}/n)^{\pi_0(X)}.$$

De plus  $H^1(X, \mathbb{Z}/n)$  est l'ensemble des classes d'isomorphisme de  $\mathbb{Z}/n$ -torseurs (1.6.6), autrement dit de revêtements étales galoisiens de  $X$  de groupe  $\mathbb{Z}/n$ . En particulier, si  $X$  est connexe et si  $\pi_1(X)$  est son groupe fondamental pour un point bas choisi, on a

$$H^1(X, \mathbb{Z}/n) = \text{hom}(\pi_1(X), \mathbb{Z}/n).$$

### 2.2.2 Groupe multiplicatif

On notera  $\mathbb{G}_{m,X}$  (ou  $\mathbb{G}_m$  s'il n'y a pas d'ambiguïté) le faisceau défini par  $U \mapsto \Gamma(U, \mathcal{O}_U^\times)$ ; il s'agit bien d'un faisceau grâce au théorème de descente fidèlement plate (1.4.5). On a par définition

$$H^0(X, \mathbb{G}_m) = H^0(X, \mathcal{O}_X)^\times;$$

en particulier si  $X$  est réduit, connexe et propre sur un corps algébriquement clos  $k$ , on a :

$$H^0(X, \mathbb{G}_m) = k^\times.$$

**Proposition 2.2.3.** *On a un isomorphisme :*

$$H^1(X, \mathbb{G}_m) = \text{Pic}(X),$$

où  $\text{Pic}(X)$  est le groupe des classes de faisceaux inversibles sur  $X$ .

*Démonstration.* Soit  $*$  le foncteur qui, à un faisceau inversible  $\mathcal{L}$  sur  $X$ , associe le préfaisceau  $\mathcal{L}^*$  suivant sur  $X_{\text{ét}}$  : pour  $\varphi : U \rightarrow X$  étale,

$$\mathcal{L}^*(U) = \text{Isom}_U(\mathcal{O}_U, \varphi^* \mathcal{L}).$$

D'après (1.4.2.i) et (1.4.5) (pleine fidélité), ce préfaisceau est un faisceau; c'est même un  $\mathbb{G}_m$ -torseur. On vérifie aussitôt que

- a) le foncteur  $*$  est compatible à la localisation (étale);
- b) il induit une équivalence de la catégorie des faisceaux inversibles triviaux (i.e. à  $\mathcal{O}_X$ ) avec la catégorie des  $\mathbb{G}_m$ -torseurs triviaux :  $\mathcal{L}$  est trivial si et seulement si  $\mathcal{L}^*$  l'est.

De plus, d'après (1.4.2.ii) et (1.4.5),

c) la notion de faisceau inversible est locale pour la topologie étale.

Il résulte formellement de a), b), c) que  $*$  est une équivalence entre la catégorie des faisceaux inversibles sur  $X$  est celle des  $\mathbb{G}_m$ -torseurs sur  $X_{\text{ét}}$ ; elle induit l'isomorphisme cherché. On construit comme suit l'équivalence inverse : si  $\mathcal{T}$  est un  $\mathbb{G}_m$ -torseur, il existe un recouvrement étale fini  $\{U_i\}$  de  $X$  tel que les toseurs  $\mathcal{T}/U_i$  soient triviaux;  $\mathcal{T}$  est alors trivial sur chaque  $V$  étale sur  $X$  appartenant au crible  $\mathcal{U} \subset X_{\text{ét}}$  engendré par  $\{U_i\}$ . Sur chaque  $V \in \mathcal{U}$ ,  $\mathcal{T}|_V$  correspond à un faisceau inversible  $\mathcal{L}_V$  (par b)) et les  $\mathcal{L}_V$  constituent un faisceau inversible donné  $\mathcal{U}$ -localement  $\mathcal{L}_{\mathcal{U}}$  (par a)). Par c), ce dernier provient d'un faisceau inversible  $\mathcal{L}(\mathcal{T})$  sur  $X$ , et  $\mathcal{T} \mapsto \mathcal{L}(\mathcal{T})$  est l'inverse cherché de  $*$ .  $\square$

## 2.2.4 Racines de l'unité

Pour tout entier  $n > 0$ , on appelle faisceau des racines  $n$ -ièmes de l'unité, et on note  $\mu_n$ , le noyau de l'élévation à puissance  $n$ -ième dans  $\mathbb{G}_m$ . Si  $X$  est un schéma sur un corps séparablement clos  $k$  et si  $n$  est inversible dans  $k$ , le choix d'une racine primitive  $n$ -ième de l'unité  $\zeta \in k$  définit un isomorphisme  $i \mapsto \zeta^i$  de  $\mathbb{Z}/n$  avec  $\mu_n$ .

La relation entre cohomologie à coefficients dans  $\mu_m$  et cohomologie à coefficients dans  $\mathbb{G}_m$  est donnée par la suite exacte de cohomologie déduite de la

**Théorème 2.2.5** (Théorie de Kummer). *Si  $n$  est inversible sur  $X$ , l'élévation à la puissance  $n$ -ième dans  $\mathbb{G}_m$  est un épimorphisme de faisceaux. On a donc une suite exacte*

$$0 \rightarrow \mu_n \rightarrow \mathbb{G}_m \rightarrow \mathbb{G}_m \rightarrow 0.$$

*Démonstration.* Soient  $U \rightarrow X$  un morphisme étale et  $a \in \mathbb{G}_m(U) = \Gamma(U, \mathcal{O}_U^\times)$ . Puisque  $n$  est inversible sur  $U$ , l'équation  $T^n - a = 0$  est séparable; autrement dit  $U' = \text{Spec}(\mathcal{O}_U[T]/(T^n - a))$  est étale au-dessus de  $U$ . Par ailleurs  $U' \rightarrow U$  est surjectif et  $a$  admet une racine  $n$ -ième sur  $U'$ , d'où résultat.  $\square$

## 2.3 Fibres, images directes

### 2.3.1

On appelle *pointe géométrique* de  $X$  un morphisme  $\bar{x} \rightarrow X$ , où  $\bar{x}$  est le spectre d'un corps séparablement clos  $k(\bar{x})$ . On le notera abusivement  $\bar{x}$ , sous-entendant le morphisme  $\bar{x} \rightarrow X$ . Si  $x$  est l'image de  $\bar{x}$  dans  $X$ , on dit que  $\bar{x}$  est centré en  $x$ . Si le corps  $k(\bar{x})$  est une extension algébrique du corps résiduel  $k(x)$ , on dit que  $\bar{x}$  est un point géométrique *algébrique* de  $X$ .

On appelle *voisinage étale* de  $\bar{x}$  un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc} & & U \\ & \nearrow & \downarrow \\ \bar{x} & \longrightarrow & X, \end{array}$$

où  $U \rightarrow X$  est un morphisme étale.

Le *localisé stricte* de  $X$  en  $\bar{x}$  est l'anneau  $\mathcal{O}_{X,\bar{x}} = \varinjlim \Gamma(U, \mathcal{O}_U)$ , la limite inductive étant sur les voisinages étales de  $\bar{x}$ . C'est un anneau local strictement hensélien dont le corps résiduel est la clôture séparable du corps résiduel  $k(x)$  de  $X$  en  $x$  dans  $k(\bar{x})$ . Il joue le rôle d'anneau local pour la topologie étale.

### 2.3.2

Étant donné un faisceau  $\mathcal{F}$  sur  $X_{\text{ét}}$ , on appelle *fibre* de  $\mathcal{F}$  en  $\bar{x}$  l'ensemble (resp. le groupe, ...)  $\mathcal{F}_{\bar{x}} = \varinjlim \mathcal{F}(U)$ , la limite inductive étant toujours prise sur les voisinages étales de  $\bar{x}$ .

Pour qu'un homomorphisme de faisceaux  $\mathcal{F} \rightarrow \mathcal{G}$  soit un mono-/epi-/isomorphisme il faut et il suffit qu'il en soit ainsi des morphismes  $\mathcal{F}_{\bar{x}} \rightarrow \mathcal{G}_{\bar{x}}$  induit sur les fibres et tout point géométrique de  $X$ . Si  $X$  est de type fini sur un corps algébriquement clos, il suffit qu'il en soit ainsi en les points rationnelles de  $X$ .



### 2.3.3

Si  $f : X \rightarrow Y$  est un morphisme de schémas et  $\mathcal{F}$  un faisceau sur  $X_{\text{ét}}$ , l'image directe  $f_*\mathcal{F}$  de  $\mathcal{F}$  par  $f$  est le faisceau sur  $Y_{\text{ét}}$  défini par  $f_*\mathcal{F}(V) = \mathcal{F}(X \times_Y V)$  pour tout  $V$  étale sur  $Y$ . Le foncteur  $f_* : \text{Sh}(X_{\text{ét}}) \rightarrow \text{Sh}(Y_{\text{ét}})$  est exact à gauche. Ses foncteurs dérivés à droite  $R^q f_*$  s'appellent images directes supérieures. Si  $\bar{y}$  est un point géométrique de  $Y$ , on a

$$(R^q f_*\mathcal{F})_{\bar{y}} = \varinjlim H^q(V \times_Y X, \mathcal{F}),$$

limite inductive prise sur les voisinages étales  $V$  de  $\bar{y}$ .

Soient  $\mathcal{O}_{Y, \bar{y}}$  le localisé stricte de  $Y$  en  $\bar{y}$ ,  $\tilde{Y} = \text{Spec}(\mathcal{O}_{Y, \bar{y}})$  et  $\tilde{X} = X \times_Y \tilde{Y}$ . On peut étendre  $\mathcal{F}$  à  $\tilde{X}_{\text{ét}}$  (c'est un cas particulier de la notion générale d'image réciproque) de la manière suivante : soit  $\tilde{U}$  un schéma étale sur  $\tilde{X}$ , alors il existe un voisinage étale  $V$  de  $\bar{y}$  et un schéma étale  $U$  sur  $X \times_Y V$  tel que  $\tilde{U} = U \times_V \tilde{Y}$ ; on posera

$$\mathcal{F}(\tilde{U}) = \varinjlim \mathcal{F}(U \times_V V'),$$

le limite inductive étant prise sur les voisinages étales  $V'$  de  $\bar{y}$  qui dominent  $V$ . Avec cette définition, on a

$$(R^q f_*\mathcal{F})_{\bar{y}} = H^q(\tilde{X}, \mathcal{F}).$$

Le foncteur  $f_*$  a un adjoint à gauche  $f^*$ , le foncteur “image réciproque.” Si  $\bar{x}$  est un point géométrique de  $X$  et  $f(\bar{x})$  son image dans  $Y$ , on a  $(f^*\mathcal{F})_{\bar{x}} = \mathcal{F}_{f(\bar{x})}$ . Cette formule montre que  $f^*$  est un foncteur exact. Le foncteur  $f_*$  transforme donc faisceau injectif en faisceau injectif, et la suite spectrale du foncteur compose  $\Gamma \circ f_*$  (resp.  $g_* f_*$ ) fournit la

**Théorème 2.3.4** (Suite spectrale de Leray). *Soient  $\mathcal{F}$  un faisceau abélien sur  $X_{\text{ét}}$  et  $f : X \rightarrow Y$  un morphisme de schémas (resp. des morphismes de schémas  $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z$ ). On a une suite spectrale*

$$\begin{aligned} E_2^{pq} &= H^p(Y, R^q f_*\mathcal{F}) \Rightarrow H^{p+q}(X, \mathcal{F}) \\ (\text{resp.} \quad E_2^{pq} &= R^p g_* R^q f_*\mathcal{F} \Rightarrow R^{p+q}(gf)_*\mathcal{F}). \end{aligned}$$

**Corollaire 2.3.5.** *Si  $R^q f_*\mathcal{F} = 0$  pour tout  $q > 0$ , on a  $H^p(Y, f_*\mathcal{F}) = H^p(X, \mathcal{F})$  (resp.  $R^p g_*(\mathcal{F}_*\mathcal{F}) = R^p(gf)_*\mathcal{F}$ ) pour tout  $p \geq 0$ .*

Cela s'applique en particulier dans le cas suivant :

**Proposition 2.3.6.** *Soit  $f : X \rightarrow Y$  un morphisme fini (voire, par passage à la limite, un morphisme entier) et  $\mathcal{F}$  un faisceau abélien sur  $X$ . Alors  $R^q f_*\mathcal{F} = 0$ , pour tout  $q > 0$ .*

En effet soient  $\bar{y}$  un point géométrique de  $Y$ ,  $\tilde{Y}$  le spectre du localisé strict de  $Y$  en  $y$  et  $\tilde{X} = X \times_Y \tilde{Y}$ ; d'après ce qui précède, il suffit de montrer que  $H^q(\tilde{X}, \mathcal{F}) = 0$  pour tout  $q > 0$ . Or  $\tilde{X}$  est le spectre d'un produit d'anneaux locaux strictement henséliens (cf. [Ray70, I]), le foncteur  $\Gamma(\tilde{X}, -)$  est exact car tout  $\tilde{X}$ -schéma étale et surjectif admet une section, d'où l'assertion.

## 2.4 Cohomologie galoisienne

Pour  $X = \text{Spec}(K)$  le spectre d'un corps, nous allons voir que la cohomologie étale s'identifie à la cohomologie galoisienne.

### 2.4.1

Commençons par une analogie topologique. Si  $K$  est le corps des fonctions d'une variété algébrique affine intègre  $Y = \text{Spec}(A)$  sur  $\mathbb{C}$ , on a  $K = \varinjlim_{f \in A} A[1/f]$ .

Autrement dit  $X = \varprojlim U$ ,  $U$  parcourant l'ensemble des ouverts de  $Y$ . On sait qu'il existe des ouverts de Zariski arbitrairement petits qui pour la topologie classique sont des  $K(\pi, 1)$ . On ne sera donc pas surpris si l'on considère  $\text{Spec}(K)$  lui-même comme un  $K(\pi, 1)$ ,  $\pi$  étant le groupe fondamental (au sens algébrique) de  $X$ , autrement dit le groupe de Galois de  $\bar{K}/K$ , où  $\bar{K}$  est clôture séparable de  $K$ .

### 2.4.2

Plus précisément soient  $K$  un corps,  $\bar{K}$  un clôture séparable de  $K$  et  $G = \text{Gal}(\bar{K}/K)$  le groupe de Galois topologique. À toute  $K$ -algèbre finie étale  $A$  (produit fini d'extensions séparables de  $K$ ), associons l'ensemble fini  $\text{hom}_K(A, \bar{K})$ . Le groupe de Galois  $G$  opère sur cet ensemble à travers un quotient discret (donc fini). Si  $A = K[T]/(F)$ , il s'identifie à l'ensemble des racines dans  $\bar{K}$  du polynôme  $F$ . La théorie de Galois, sous la forme que lui a donnée Grothendieck, dit que :

**Proposition 2.4.3.** *Le foncteur*

$$\left\{ \begin{array}{c} K\text{-algèbres} \\ \text{finies étales} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{c} \text{ensembles finis sur lesquels} \\ G \text{ opère continûment} \end{array} \right\}$$

*qui à une algèbre étale  $A$  associe  $\text{hom}_K(A, \bar{K})$  est une anti-équivalence de catégories.*

On en déduit une description analogue des faisceaux pour la topologie étale sur  $\text{Spec}(K)$  :

**Proposition 2.4.4.** *Le foncteur*

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Faisceaux étales} \\ \text{sur } \text{Spec}(K) \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{c} \text{ensembles sur lesquels} \\ G \text{ opère continûment} \end{array} \right\}$$

*qui à un faisceau  $\mathcal{F}$  associe sa fibre  $\mathcal{F}_{\bar{K}}$  au point géométrique  $\text{Spec}(\bar{K})$  est une équivalence de catégories.*

On dit que  $G$  opère continûment sur un ensemble  $E$  si le fixateur de tout élément de  $E$  est un sous-groupe ouvert de  $G$ . Le foncteur en sens inverse est décrit de la manière évidente : soient  $A$  une  $K$ -algèbre finie étale,  $U = \text{Spec}(A)$  et  $U(\bar{K}) = \text{hom}_K(A, \bar{K})$  le  $G$ -ensemble correspondant à ; alors on a  $\mathcal{F}(U) = \text{hom}_{G\text{-ens}}(U(\bar{K}), \mathcal{F}_{\bar{K}})$ .

En particulier, si  $X = \text{Spec}(K)$ , on a  $\mathcal{F}(X) = \mathcal{F}_{\bar{K}}^G$ . Si l'on se restreint aux faisceaux abéliens, on obtient en passant aux foncteurs dérivés des isomorphismes canoniques

$$H^q(X_{\text{et}}, \mathcal{F}) = H^q(G, \mathcal{F}_{\bar{K}})$$

### 2.4.5 Exemples

- a) Au faisceau constant  $\mathbb{Z}/n$  correspond  $\mathbb{Z}/n$  avec action triviale de  $G$ .
- b) Au faisceau des racines  $n$ -ièmes de l'unité  $\mu_n$  correspond le groupe  $\mu_n(\bar{K})$  des racines  $n$ -ièmes de l'unité dans  $\bar{K}$ , avec l'action naturelle de  $G$ .
- c) Au faisceau  $\mathbb{G}_m$  correspond le groupe  $\bar{K}^\times$  avec l'action naturelle de  $G$ .

## 3 Cohomologie des courbes

Dans le cas des espaces topologiques, des déviassages utilisant la formule de Künneth et des décompositions simpliciales permettent de se ramener pour calculer la cohomologie à l'intervalle  $I = [0, 1]$  pour lequel on a  $H^0(I, \mathbb{Z}) = \mathbb{Z}$  et  $H^q(I, \mathbb{Z}) = 0$  pour  $q > 0$ .

Dans notre cas, les déviassages aboutiront à des objets plus compliqués, à savoir les courbes sur un corps algébriquement clos ; nous allons calculer leur cohomologie dans ce chapitre. La situation est plus complexe que dans le cas topologique car les groupes de cohomologie sont nuls pour  $q > 2$  seulement. L'ingrédient essentiel des calculs est la nullité du groupe de Brauer du corps des fonctions d'une telle courbe (théorème de Tsen, 3.2).

### 3.1 Le groupe de Brauer

Rappelons-en tout d'abord la définition classique :

**Définition 3.1.1.** *Soit  $K$  un corps et  $A$  une  $K$ -algèbre de dimension finie. On dit que  $A$  est une algèbre simple centrale sur  $K$  si les conditions équivalentes suivantes sont vérifiées :*

- a) *A n'a pas d'idéal bilatère non trivial et son centre est  $K$ .*
- b) *Il existe une extension galoisienne finie  $K'/K$  telle que  $A_{K'} = A \otimes_K K'$  soit isomorphe à une algèbre de matrices carrées sur  $K'$ .*
- c) *A est  $K$ -isomorphe à algèbre de matrices carrées sur un corps gauche de centre  $K$ .*

Deux telles algèbres sont dites équivalentes si les corps gauches qui leur sont associés par c) sont  $K$ -isomorphes. Si ces algèbres ont même dimension, cela revient à dire qu'elles sont  $K$ -isomorphes. Le produit tensoriel définit par passage au quotient une structure de groupe abélien sur l'ensemble des classes d'équivalence. C'est ce groupe que l'on appelle classiquement *le groupe de Brauer* de  $K$  et que l'on note  $\text{Br}(K)$ .

### 3.1.2

On notera  $\text{Br}(n, K)$  l'ensemble des classes de  $K$ -isomorphisme de  $K$ -algèbres  $A$  telles qu'il existe une extension galoisienne finie  $K'$  de  $K$  pour laquelle  $A_{K'}$  est isomorphe à l'algèbre  $M_n(K')$  des matrices carrées  $n \times n$  sur  $K'$ . Par définition  $\text{Br}(K)$  est réunion des sous-ensembles  $\text{Br}(n, K)$  pour  $n \in \mathbb{N}$ . Soient  $\bar{K}$  une clôture algébrique de  $K$  et  $G = \text{Gal}(\bar{K}/K)$ . L'ensemble  $\text{Br}(n, K)$  est l'ensemble des “formes” de  $M_n(\bar{K})$ , il est donc canoniquement isomorphe à  $H^1(G, \text{Aut}(M_n(\bar{K})))$ .

On sait que tout automorphisme de  $M_n(\bar{K})$  est intérieur. Par conséquent le groupe  $\text{Aut}(M_n(\bar{K}))$  s'identifie au groupe linéaire projectif  $\text{PGL}(n, \bar{K})$  et on a une bijection canonique :

$$\theta_n : \text{Br}(n, K) \xrightarrow{\sim} H^1(G, \text{PGL}(n, \bar{K})).$$

D'autre part la suite exacte :

$$1 \rightarrow \bar{K}^\times \rightarrow \text{GL}(n, \bar{K}) \rightarrow \text{PGL}(n, \bar{K}) \rightarrow 1, \quad (3.1.2.1)$$

permet de définir un opérateur cobord :

$$\Delta_n : H^1(G, \text{PGL}(n, \bar{K})) \rightarrow H^2(G, \bar{K}^\times).$$

En composant  $\theta_n$  et  $\Delta_n$ , on obtient une application :

$$\delta_n : \text{Br}(n, K) \rightarrow H^2(G, \bar{K}^\times).$$

On vérifie facilement que les applications  $\delta_n$  sont compatibles entre elles et définissent un homomorphisme de groupes :

$$\delta : \text{Br}(K) \rightarrow H^2(G, \bar{K}^\times).$$

**Proposition 3.1.3.** *L'homomorphisme  $\delta : \text{Br}(K) \rightarrow H^2(G, \bar{K}^\times)$  est bijectif.*

Cela résulte des deux lemmes suivants :

**Lemme 3.1.4.** *L'application  $\Delta_n : H^1(G, \text{PGL}(n, \bar{K})) \rightarrow H^2(G, \bar{K}^\times)$  est injective.*

D'après [Ser94], cor. à la prop. I-44, il suffit de vérifier que chaque fois qu'on tord la suite exacte (3.1.2.1) par un élément de  $H^1(G, \text{PGL}(n, \bar{K}))$ , le  $H^1$  du groupe médian est trivial. Ce groupe médian est le groupe des  $\bar{K}$ -points du groupe multiplicatif d'une algèbre centrale simple  $A$  de rang  $n^2$  sur  $K$ . Pour prouver que  $H^1(G, A_{\bar{K}}^\times) = 0$ , on interprète  $A^\times$  comme le groupe des automorphismes du  $A$ -module libre  $L$  de rang 1, et  $H^1$  comme l'ensemble des “formes” de  $L$  – des  $A$ -modules de rang  $n^2$  sur  $K$ , automatiquement libres.

**Lemme 3.1.5.** *Soient  $\alpha \in H^2(G, \bar{K}^\times)$ ,  $K'$  une extension finie de  $K$  contenue dans  $\bar{K}$ ,  $n = [K' : K]$ , et  $G' = \text{Gal}(\bar{K}/K')$ . Si l'image de  $\alpha$  dans  $H^2(G', \bar{K}^\times)$  est nulle, alors,  $\alpha$  appartient à l'image de  $\Delta_n$ .*

Remarquons tout d'abord qu'on a :

$$H^2(G', \bar{K}^\times) \simeq H^2(G, (\bar{K} \otimes_K K')^\times).$$

(D'un point de vue géométrique si l'on note  $x = \text{Spec}(K)$ ,  $x' = \text{Spec}(K')$  et  $\pi : x' \rightarrow x$  le morphisme canonique, on a  $R^q \pi_* (\mathbb{G}_{m, x'}) = 0$  pour  $q > 0$  et par suite  $H^q(x', \mathbb{G}_{m, x'}) \simeq H^q(x, \pi_* \mathbb{G}_{m, x'})$  pour  $q \geq 0$ ).

Par ailleurs la choix d'une base de  $K'$  en tant qu'espace vectoriel sur  $K$  permet de définir un homomorphisme

$$(\bar{K} \otimes_K K')^\times \rightarrow \mathrm{GL}(n, \bar{K})$$

qui, à un élément  $x$ , fait correspondre l'endomorphisme de multiplication par  $x$  de  $\bar{K} \otimes_K K'$ . On a alors un diagramme commutatif à lignes exactes :

$$\begin{array}{ccccccc} 1 & \longrightarrow & \bar{K}^\times & \longrightarrow & (\bar{K} \otimes_K K')^\times & \longrightarrow & (\bar{K} \otimes_K K')^\times / \bar{K}^\times \longrightarrow 1 \\ & & \parallel & & \downarrow & & \downarrow \\ 1 & \longrightarrow & \bar{K}^\times & \longrightarrow & \mathrm{GL}(n, \bar{K}) & \longrightarrow & \mathrm{PGL}(n, \bar{K}) \longrightarrow 1 \end{array}$$

Le lemme résulte du diagramme commutatif que l'on en déduit en passant à la cohomologie :

$$\begin{array}{ccccc} \mathrm{H}^1(G, (\bar{K} \otimes_K K')^\times / \bar{K}^\times) & \longrightarrow & \mathrm{H}^2(G, \bar{K}^\times) & \longrightarrow & \mathrm{H}^2(G, (\bar{K} \otimes_K K')^\times) \\ \downarrow & & \parallel & & \\ \mathrm{H}^1(G, \mathrm{PGL}(n, \bar{K})) & \xrightarrow{\Delta_n} & \mathrm{H}^2(G, \bar{K}^\times). \end{array}$$

**Proposition 3.1.6.** *Soient  $K$  un corps,  $\bar{K}$  une clôture algébrique de  $K$  et  $G = \mathrm{Gal}(\bar{K}/K)$ . Supposons que, pour tout extension finie  $K'$  de  $K$ , on ait  $\mathrm{Br}(K') = 0$ . Alors on a :*

- i)  $\mathrm{H}^q(G, \bar{K}^\times) = 0$  pour tout  $q > 0$ .
- ii)  $\mathrm{H}^q(G, \mathcal{F}) = 0$  pour tout  $G$ -module de torsion  $\mathcal{F}$  et pour tout  $q \geq 2$ .

(Pour la démonstration, cf. [Ser94]).

### 3.2 Le théorème de Tsen

**Définition 3.2.1.** *On dit qu'un corps  $K$  est  $C_1$  si tout polynôme homogène non constant  $f(x_1, \dots, x_n)$  de degré  $d < n$  a un zéro non trivial.*

**Proposition 3.2.2.** *Si un corps  $K$  est  $C_1$ , on a  $\mathrm{Br}(K) = 0$ .*

Il s'agit de montrer que tout corps gauche  $D$  de centre  $K$  et fini sur  $K$  est égale à  $K$ . Soient  $r^2$  le degré de  $D$  sur  $K$  et  $\mathrm{Nrd} : D \rightarrow K$  la norme réduite.

(Localement pour la topologie étale sur  $K$ ,  $D$  est isomorphe – non canoniquement – à une algèbre de matrices  $M_r$  et la norme réduite coïncide avec l'application déterminant. Celle-ci est bien définie, indépendamment de l'isomorphisme choisi entre  $D$  et  $M_r$  car tout automorphisme de  $M_r$  est intérieur et deux matrices semblables ont même déterminant. Cette application définie localement pour la topologie étale se descend, à cause de son unicité locale, en une application  $\mathrm{Nrd} : D \rightarrow K$ ).

Le seul zéro de  $\mathrm{Nrd}$  est l'élément nul de  $D$ , car, si  $x \neq 0$ , on a  $\mathrm{Nrd}(x) \cdot \mathrm{Nrd}(x^{-1}) = 1$ . D'autre part, si  $\{e_1, \dots, e_{r^2}\}$  est une base de  $D$  sur  $K$  et si  $x = \sum x_i e_i$ , la fonction  $\mathrm{Nrd}(x)$  s'écrit comme un polynôme homogène  $\mathrm{Nrd}(x_1, \dots, x_{r^2})$  de degré  $r$  (c'est clair localement pour la topologie étale). Puisque  $K$  est  $C_1$ , on a  $r^2 \leq r$ , c'est-à-dire  $r = 1$  et  $D = K$ .

**Théorème 3.2.3 (Tsen).** *Soient  $k$  un corps algébriquement clos et  $K$  une extension de degré de transcendance 1 de  $k$ . Alors  $K$  est  $C_1$ .*

Supposons tout d'abord que  $K = k(X)$ . Soit

$$f(T) = \sum a_{i_1, \dots, i_n} T_1^{i_1} \cdots T_n^{i_n}$$

un polynôme homogène de degré  $d < n$  à coefficients dans  $k(X)$ . Quitte à multiplier les coefficients par un dénominateur commun on peut supposer qu'ils sont dans  $k[X]$ . Soit alors  $\delta = \sup \deg(a_{i_1, \dots, i_n})$ . On cherche un zéro non trivial dans  $k[X]$  par la méthode des coefficients indéterminés en écrivant chaque  $T_i$  ( $i = 1, \dots, n$ )

comme un polynôme de degré  $N$  en  $X$ . Alors l'équation  $f(T) = 0$  devient un système d'équations homogènes en les  $n \times (N + 1)$  coefficients des polynômes  $T_i(X)$  exprimant la nullité des coefficients du polynôme en  $X$  obtenu en remplaçant  $T_i$  par  $T_i(X)$ . Ce polynôme est de degré  $\delta + Nd$  au plus, il y a donc  $\delta + Nd + 1$  équations en  $n \times (N + 1)$  variables. Comme  $k$  est algébriquement clos ce système a une solution non triviale si  $n(N + 1) > Nd + \delta + 1$ , ce qui sera le cas pour  $N$  assez grand si  $d < n$ .

Il est clair que, pour démontrer le théorème dans le cas général, il suffit de le démontrer lorsque  $K$  est une extension finie d'une extension transcendent pure  $k(X)$  de  $k$ . Soit  $f(T) = f(T_1, \dots, T_n)$  un polynôme homogène de degré  $d < n$  à coefficients dans  $K$ . Soient  $a = [K : k(X)]$  et  $e_1, \dots, e_s$  une base de  $K$  sur  $k(X)$ . Introduisons de nouvelles variables  $U_{ij}$ , en nombre  $sn$ , telles que  $T_i = \sum U_{ij} e_j$ . Pour que le polynôme  $f(T)$  ait un zéro non trivial dans  $K$ , il suffit que le polynôme  $g(X_{ij}) = N_{K/k}(f(T))$  ait un zéro non trivial dans  $k(X)$ . Or  $g$  est un polynôme de degré  $sd$  en  $sn$  variables, d'où le résultat.

**Corollaire 3.2.4.** *Soient  $k$  un corps algébriquement clos et  $K$  une extension de degré de transcendance 1 de  $k$ . Alors les groupes de cohomologie étale  $H^q(\text{Spec}(K), \mathbb{G}_m)$  sont nuls pour tout  $q > 0$ .*

### 3.3 Cohomologie des courbes lisses

Dorénavant, et sauf mention expresse du contraire, les groupes de cohomologie considérés sont les groupes des cohomologie étale.

**Proposition 3.3.1.** *Soient  $k$  un corps algébriquement clos et  $X$  une courbe projective non singulière connexe sur  $k$ . Alors on a :*

$$\begin{aligned} H^0(X, \mathbb{G}_m) &= k^\times, \\ H^1(X, \mathbb{G}_m) &= \text{Pic}(X), \\ H^q(X, \mathbb{G}_m) &= 0 \text{ pour } q \geq 2. \end{aligned}$$

Soient  $\eta$  le point générique de  $X$ ,  $j : \eta \rightarrow X$  le morphisme canonique et  $\mathbb{G}_{m,X}$  le groupe multiplicatif du corps des fractions  $K(X)$ . Pour tout point fermé  $x$  de  $X$ , soit  $i_x : x \rightarrow X$  l'immersion canonique et  $\mathbb{Z}_x$  le faisceau constant de valeur  $\mathbb{Z}$  sur  $x$ . Ainsi  $j_* \mathbb{G}_{m,\eta}$  est le faisceau des fonctions méromorphes non nulles sur  $X$  et  $\bigoplus_{x \in X} i_{x*} \mathbb{Z}_x$  le faisceau des diviseurs, on a donc une suite exacte de faisceaux :

$$0 \longrightarrow \mathbb{G}_m \longrightarrow j_* \mathbb{G}_{m,\eta} \xrightarrow{\text{div}} \bigoplus_{x \in X} i_{x*} \mathbb{Z}_x \longrightarrow 0. \quad (3.3.1.1)$$

**Lemme 3.3.2.** *On a  $R^q j_* \mathbb{G}_{m,\eta} = 0$  pour tout  $q > 0$ .*

Il suffit de montrer que la fibre de ce faisceau en tout point fermé  $x$  de  $X$  est nulle. Si  $\tilde{\mathcal{O}}_{X,x}$  est l'hensélisé de  $X$  en  $x$  et  $K$  le corps des fractions de  $\tilde{\mathcal{O}}_{X,x}$ , on a

$$\text{Spec}(K) = \eta \times_X \text{Spec}(\tilde{\mathcal{O}}_{X,x}),$$

donc  $(R^q j_* \mathbb{G}_{m,\eta})_x = H^q(\text{Spec}(K), \mathbb{G}_m)$ .

Or  $K$  est une extension algébrique de  $k(X)$ , donc une extension de degré de transcendance 1 de  $k$  : le lemme résulte de (3.2.4).

**Lemme 3.3.3.** *On a  $H^q(X, j_* \mathbb{G}_{m,\eta}) = 0$  pour tout  $q > 0$ .*

En effet de (3.3.2) et de la suite spectrale de Leray pour  $j$ , on déduit :

$$H^q(X, j_* \mathbb{G}_{m,\eta}) = H^q(\eta, \mathbb{G}_{m,\eta})$$

pour tout  $q \geq 0$  et le deuxième membre est nul pour  $q > 0$  d'après (3.2.4).

**Lemme 3.3.4.** *On a  $H^q(X, \bigoplus_{x \in X} i_{x*} \mathbb{Z}_x) = 0$  pour tout  $q > 0$ .*

En effet pour tout point fermé de  $X$ , on a  $R^q i_{x*} \mathbb{Z}_x 0$  pour  $q > 0$ , car  $i_x$  est un morphisme fini (2.3.6), et

$$H^q(X, i_{x*} \mathbb{Z}_x) = H^q(x, \mathbb{Z}_x).$$

Le deuxième membre est nul pour tout  $q > 0$ , car  $x$  est le spectre d'un corps algébriquement clos (On voit que le lemme est vrai plus généralement pour tout faisceau “gratte-ciel” sur  $X$ ).

On déduit des lemmes précédents et de la suite exacte (3.3.1.1) les égalités :

$$H^q(X, \mathbb{G}_m) = 0 \text{ pour } q \geq 2,$$

et une suite exacte de cohomologie en bas degré :

$$1 \rightarrow H^0(X, \mathbb{G}_m) \rightarrow H^0(X, j_* \mathbb{G}_{m,\eta}) \rightarrow H^0\left(X, \bigoplus_{x \in X} i_{x*} \mathbb{Z}_x\right) \rightarrow H^1(X, \mathbb{G}_m) \rightarrow 1$$

qui n'est autre que la suite exacte :

$$1 \rightarrow k^\times \rightarrow k(X)^\times \rightarrow \text{Div}(X) \rightarrow \text{Pic}(X) \rightarrow 1.$$

De la proposition 3.3.1 on déduit que les groupes de cohomologie de  $X$  à valeur dans  $\mathbb{Z}/n$ ,  $n$  premier à la caractéristique de  $k$ , ont une valeur raisonnable :

**Corollaire 3.3.5.** *Si  $X$  est de genre  $g$  et si  $n$  est inversible dans  $k$ , les  $H^q(X, \mathbb{Z}/n)$  sont nuls pour  $q > 2$ , et libres sur  $\mathbb{Z}/n$  de rang  $1, 2g, 1$  pour  $q = 0, 1, 2$ . Remplaçant  $\mathbb{Z}/n$  par le groupe isomorphe  $\mu_n$ , on a des isomorphismes canoniques*

$$\begin{aligned} H^0(X, \mu_n) &= \mu_n \\ H^1(X, \mu_n) &= \text{Pic}^0(X)_n \\ H^2(X, \mu_n) &= \mathbb{Z}/n. \end{aligned}$$

Comme le corps  $k$  est algébriquement clos,  $\mathbb{Z}/n$  est isomorphe (non canoniquement) à  $\mu_n$ . De la suite exacte de Kummer :

$$0 \rightarrow \mu_n \rightarrow \mathbb{G}_m \rightarrow \mathbb{G}_m \rightarrow 0,$$

et de la proposition 3.3.1, on déduit les égalité :

$$H^q(X, \mathbb{Z}/n) = 0 \text{ pour } q > 2,$$

et, en bas degré, des suites exactes :

$$\begin{aligned} 0 &\longrightarrow H^0(X, \mu_n) \longrightarrow k^\times \xrightarrow{n} k^\times \longrightarrow 0 \\ 0 &\longrightarrow H^1(X, \mu_n) \longrightarrow \text{Pic}(X) \xrightarrow{n} H^2(X, \mu_n) \longrightarrow 0. \end{aligned}$$

De plus on a une suite exacte :

$$0 \longrightarrow \text{Pic}^0(X) \longrightarrow \text{Pic}(X) \xrightarrow{\deg} \mathbb{Z} \longrightarrow 0,$$

et  $\text{Pic}^0(X)$  s'identifie au groupe des points rationnels sur  $k$  d'une variété abélienne de dimension  $g$ , la jacobienne de  $X$ . Dans un tel groupe, la multiplication par  $n$  est surjective et son noyau est un  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ -module libre de rang  $2g$  (car  $n$  est inversible dans  $k$ ) ; d'où le corollaire.

De dévissage astucieux, utilisant la “méthode de la trace,” permet d'obtenir en corollaire la

**Proposition 3.3.6** ([AGV72, IX 5.7]). *Soient  $k$  un corps algébriquement clos,  $X$  une courbe algébrique sur  $k$  et  $\mathcal{F}$  un faisceau de torsion sur  $X$ . Alors :*

- i) *On a  $H^q(X, \mathcal{F}) = 0$  pour  $q > 2$ .*
- ii) *Si  $X$  est affine, on a même  $H^q(X, \mathcal{F}) = 0$  pour  $q > 1$ .*

Pour la démonstration, ainsi que pour l'exposé de la “méthode de la trace,” nous renvoyons à [AGV72, IX 5].

### 3.4 Dévissages

Pour calculer la cohomologie des variétés de dimension  $> 1$  on emploie des fibrations par des courbes, ce qui permet de se ramener à étudier les morphismes dont les fibres sont de dimension  $\leq 1$ . Ce principe possède plusieurs variantes, indiquons-en quelques-unes.

#### 3.4.1

Soient  $A$  une  $k$ -algèbre de type fini et  $a_1, \dots, a_n$  des générateurs de  $A$ . Si l'on pose  $X_0 = \text{Spec}(k)$ ,  $X_i = \text{Spec}(k[a_1, \dots, a_i])$ ,  $X_n = \text{Spec}(A)$ , les inclusions canoniques  $k[a_1, \dots, a_i] \rightarrow k[a_1, \dots, a_i, a_{i+1}]$  définissent des morphismes  $X_n \rightarrow X_{n-1} \rightarrow \dots \rightarrow X_1 \rightarrow X_0$  dont les fibres sont de dimension  $\leq 1$ .

#### 3.4.2

Dans le cas d'un morphisme lisse, on peut être plus précis. On appelle *fibration élémentaire* un morphisme de schémas  $f : X \rightarrow S$  qui peut être plongé dans un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{j} & \bar{X} & \xleftarrow{i} & Y \\ & \searrow f & \downarrow \bar{f} & \swarrow g & \\ & & S & & \end{array}$$

satisfaisant aux conditions suivantes :

- i)  $j$  est une immersion ouverte dense dans chaque fibre et  $X = \bar{X} \setminus Y$ .
- ii)  $\bar{f}$  est lisse et projectif, à fibres géométriques irréductibles et de dimension 1.
- iii)  $g$  est un revêtement étale et aucune fibre de  $g$  n'est vide.

On appelle *bon voisinage* relatif à  $S$  un  $S$ -schéma  $X$  tel qu'il existe  $S$ -schémas  $X = X_n, \dots, X_0 = S$  et des fibrations élémentaires  $f_i : X_i \rightarrow X_{i-1}$ ,  $i = 1, \dots, n$ . On peut montrer [AGV72, XI 3.3] que si  $X$  est un schéma lisse sur un corps algébriquement clos  $k$  tout point rationnel de  $X$  possède un voisinage ouvert qui est un bon voisinage (relatif à  $\text{Spec}(K)$ ).

#### 3.4.3

On peut dévisser un morphisme propre  $f : X \rightarrow S$  de la façon suivante. D'après le lemme de Chow, il existe un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc} X & \xleftarrow{\pi} & \bar{X} \\ & \searrow f & \downarrow \bar{f} \\ & & S \end{array}$$

où  $\pi$  et  $\bar{f}$  sont des morphismes projectifs,  $\pi$  étant de plus un isomorphisme au-dessus d'un ouvert dense de  $X$ . Localement sur  $S$ ,  $\bar{X}$  est un sous-schéma fermé d'un espace projectif type  $\mathbb{P}_S^n$ .

On dévisse ce dernier en considérant la projection  $\varphi : \mathbb{P}_S^n \rightarrow \mathbb{P}_S^1$  qui envoie le point de coordonnées homogènes  $(x_0, x_1, \dots, x_n)$  sur  $(x_0, x_1)$ . C'est une application rationnelle définie en dehors du fermé  $Y \simeq \mathbb{P}_S^{n-2}$  de  $\mathbb{P}_S^n$  d'équations homogènes  $x_0 = x_1 = 0$ . Soit  $u : P \rightarrow \mathbb{P}_S^n$  l'éclatement à centre  $Y$  ; les fibres de  $u$  sont de dimension  $\leq 1$ . De plus il existe un morphisme naturel  $v : P \rightarrow \mathbb{P}_S^1$  qui prolonge l'application rationnelle  $\varphi$  et  $v$  fait de  $P$  un  $\mathbb{P}_S^1$ -schéma localement isomorphe à l'espace projectif type  $\mathbb{P}^{n-1}$  que l'on peut à son tour projeter sur un  $\mathbb{P}^1$ , etc.

#### 3.4.4

On peut balayer une variété projective et lisse  $X$  par un *pinceau de Lefschetz*. L'éclaté  $\tilde{X}$  de l'intersection de l'axe du pinceau avec  $X$  se projette sur  $\mathbb{P}^1$  et les fibres de cette projection sont les sections hyperplans de  $X$  par les hyperplans du pinceau.

## 4 Théorème de changement de base pour un morphisme propre

### 4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la démonstration et aux applications du

**Théorème 4.1.1.** *Soient  $f : X \rightarrow S$  un morphisme propre de schémas et  $\mathcal{F}$  un faisceau abélien de torsion sur  $X$ . Alors, quel que soit  $q \geq 0$ , la fibre de  $R^q f_* \mathcal{F}$  en un point géométrique  $s$  de  $S$  est isomorphe à la cohomologie  $H^q(X_s, \mathcal{F})$  de la fibre  $X_s = X \otimes_S \text{Spec } k(s)$  de  $f$  en  $s$ .*

Pour  $f : X \rightarrow S$  une application continue propre et séparé (séparée signifie que la diagonale de  $X \times_S X$  est fermée) entre espaces topologiques, et  $\mathcal{F}$  un faisceau abélien sur  $X$ , le résultat analogue est bien connu, et élémentaire : comme  $f$  est fermée, les  $f^{-1}(V)$  pour  $V$  voisinage de  $s$  forment un système fondamental de voisinages de  $X_s$ , et on vérifie que  $H^\bullet(X_s, \mathcal{F}) = \varinjlim_U H^\bullet(U, \mathcal{F})$ , pour  $U$  parcourant les voisinages de  $X_s$ . En pratique,  $X_s$  a même un système fondamental  $\mathcal{U}$  de voisinages  $U$  dont il est rétracte par déformation et, pour  $\mathcal{F}$  constant, on a donc  $H^\bullet(X_s, \mathcal{F}) = H^\bullet(U, \mathcal{F})$ . En termes imagés : la fibre spéciale avale la fibre générale.

Dans le cas des schémas la démonstration est plus délicate et il est indispensable de supposer que  $\mathcal{F}$  est de torsion ([AGV72, XII.2]). Compte tenu de la description des fibres de  $R^q f_* \mathcal{F}$  (2.3.3), le théorème (4.1.1) est essentiellement équivalent au

**Théorème 4.1.2.** *Soient  $A$  un anneau local strictement hensélien et  $S = \text{Spec}(A)$ . Soient  $f : X \rightarrow S$  un morphisme propre et  $X_0$  la fibre fermée de  $f$ . Alors, pour tout faisceau abélien de torsion  $\mathcal{F}$  sur  $X$  et pour tout  $q \geq 0$ , on a  $H^q(X, \mathcal{F}) \xrightarrow{\sim} H^q(X_0, \mathcal{F})$ .*

Par passage à la limite on voit qu'il suffit de démontrer le théorème lorsque  $A$  est l'hensélisé strict d'une  $\mathbb{Z}$ -algèbre de type fini en un idéal premier. On traite d'abord le cas  $q = 0$  ou  $1$  et  $\mathcal{F} = \mathbb{Z}/n$  (4.2). Un argument basé sur la notion de faisceau constructible (4.3) montre d'ailleurs qu'il suffit de considérer le cas où  $\mathcal{F}$  est constant. D'autre part le dévissage (3.4.3) permet de supposer que  $X_0$  est une courbe ; dans ce cas il ne reste plus qu'à démontrer le théorème pour  $q = 2$  (4.4).

Entre autres applications (4.6), le théorème permet de définir la notion de cohomologie à support propre (4.5).

### 4.2 Démonstration pour $q = 0$ ou $1$ et $\mathcal{F} = \mathbb{Z}/n$

Le résultat pour  $q = 0$  et  $\mathcal{F}$  constant est équivalent à la proposition suivante (théorème de connexion de Zariski) :

**Proposition 4.2.1.** *Soient  $A$  un anneau local hensélien noethérien et  $S = \text{Spec}(A)$ . Soient  $f : X \rightarrow S$  un morphisme propre et  $X_0$  la fibre fermée de  $f$ . Alors les ensembles de composantes connexes  $\pi_0(X)$  et  $\pi_0(X_0)$  sont en bijection.*

Il revient au même de montrer que les ensembles de parties à la fois ouvertes et fermées  $\text{Of}(X)$  et  $\text{Of}(X_0)$  sont en bijection. On sait que l'ensemble  $\text{Of}(X)$  correspond bijectivement à l'ensemble des idempotents de  $\Gamma(X, \mathcal{O}_X)$ , de même  $\text{Of}(X_0)$  correspond bijectivement à l'ensemble des idempotents de  $\Gamma(X_0, \mathcal{O}_{X_0})$ . Il s'agit donc de montrer que l'application canonique

$$\text{Idem } \Gamma(X, \mathcal{O}_X) \rightarrow \text{Idem } \Gamma(X_0, \mathcal{O}_{X_0})$$

est bijective.

On notera  $\mathfrak{m}$  l'idéal maximal de  $A$ ,  $\Gamma(X, \mathcal{O}_X)^\wedge$  le complété de  $\Gamma(X, \mathcal{O}_X)$  pour la topologie  $\mathfrak{m}$ -adique et, pour tout entier  $n \geq 0$ ,  $X_n = X \otimes_A A/\mathfrak{m}^{n+1}$ . D'après le théorème de finitude pour les morphismes propres [Gro67, III.3.2],  $\Gamma(X, \mathcal{O}_X)$  est une  $A$ -algèbre finie ; comme  $A$  est hensélien, il en résulte que l'application canonique

$$\text{Idem } \Gamma(X, \mathcal{O}_X) \rightarrow \text{Idem } \Gamma(X, \mathcal{O}_X)^\wedge$$

est bijective.

D'après le théorème de comparaison pour les morphismes propres [Gro67, III.4.1], l'application canonique

$$\Gamma(X, \mathcal{O}_X)^\wedge \rightarrow \varprojlim \Gamma(X_n, \mathcal{O}_{X_n})$$



est bijective. En particulier l'application canonique

$$\mathrm{Idem} \Gamma(X, \mathcal{O}_X)^\wedge \rightarrow \varprojlim \mathrm{Idem} \Gamma(X_n, \mathcal{O}_{X_n})$$

est bijective. Mais, puisque  $X_n$  et  $X_0$  ont même espace topologique sous-jacent, l'application canonique

$$\mathrm{Idem} \Gamma(X_n, \mathcal{O}_{X_n}) \rightarrow \mathrm{Idem} \Gamma(X_0, \mathcal{O}_{X_0})$$

est bijective pour tout  $n$ , ce qui achève la démonstration.

Puisque  $H^1(X, \mathbb{Z}/n)$  est en bijection avec l'ensemble des classes d'isomorphisme de revêtements étales galoisiens de  $X$  de groupe  $\mathbb{Z}/n$ , le théorème pour  $q = 1$  et  $\mathcal{F} = \mathbb{Z}/n$  résulte de la proposition suivante.

**Proposition 4.2.2.** *Soient  $A$  un anneau local hensélien noethérien et  $S = \mathrm{Spec}(A)$ . Soient  $f : X \rightarrow S$  un morphisme propre et  $X_0$  la fibre fermée de  $f$ . Alors le foncteur de restriction*

$$\mathrm{Rev. et}(X) \rightarrow \mathrm{Rev. et}(X_0)$$

*est une équivalence de catégories.*

(Si  $X_0$  est connexe et si l'on a choisi un point géométrique de  $X_0$  comme point base, cela revient à dire que l'application canonique  $\pi_1(X_0) \rightarrow \pi_1(X)$  sur les groupes fondamentaux (profinis) est bijective).

La proposition (4.2.1) montre que ce foncteur est pleinement fidèle. En effet, si  $X'$  et  $X''$  sont deux revêtements étales de  $X$ , un  $X$ -morphisme de  $X'$  dans  $X''$  est déterminé par son graphe qui est une partie ouverte et fermée de  $X' \times_X X''$ .

Il s'agit donc de montrer que tout revêtement étale  $X'_0$  de  $X_0$  s'étend en un revêtement étale de  $X$ . On sait que les revêtements étales ne dépendent pas des éléments nilpotents [GR71, ch.1], par conséquent  $X'_0$  se relève de manière unique en un revêtement étale  $X'_n$  de  $X_n$  pour tout  $n \geq 0$ , autrement dit en un revêtement étale  $\mathcal{X}'$  du schéma formel  $\mathfrak{X}$  complété de  $X$  le long de  $X_0$ . D'après le théorème d'algébrisation des faisceaux cohérents formels de Grothendieck (théorème d'existence, [Gro67, III.5]),  $\mathcal{X}'$  est le complété formel d'un revêtement étale  $\bar{X}'$ , de  $\bar{X} = X \otimes_A \hat{A}$ .

Par passage à la limite, il suffit de démontrer la proposition dans le cas où  $A$  est l'hensélisé d'une  $\mathbb{Z}$ -algèbre de type fini. On peut alors appliquer le théorème d'approximation d'Artin au foncteur  $\mathcal{F} : (A\text{-algèbres}) \rightarrow (\text{ensembles})$  qui, à une  $A$ -algèbre  $B$ , fait correspondre l'ensemble des classes d'isomorphisme de revêtements étales de  $X \otimes_A B$ . En effet ce foncteur est localement de présentation finie : si  $B_i$  est un système inductif filtrant de  $A$ -algèbres et si  $B = \varinjlim B_i$ , on a  $\mathcal{F}(B) = \varinjlim \mathcal{F}(B_i)$ . D'après le théorème d'Artin, étant donné un élément  $\xi \in \mathcal{F}(\hat{A})$ , en l'occurrence la classe d'isomorphisme de  $\bar{X}'$ , il existe  $\xi \in \mathcal{F}(A)$  ayant même image que  $\bar{\xi}$  dans  $\mathcal{F}(A/\mathfrak{m})$ . Autrement dit il existe un revêtement étale  $X'$  de  $X$  dont la restriction à  $X_0$  est isomorphe à  $X'_0$ .

### 4.3 Faisceaux constructibles

Dans ce paragraphe, on considère un schéma *noethérien*  $X$  et on appelle faisceau sur  $X$  un faisceau *abélien* sur  $X_{\mathrm{et}}$ .

**Définition 4.3.1.** *On dit qu'un faisceau  $\mathcal{F}$  sur  $X$  est localement constant constructible (en abrégé l.c.c.) s'il est représenté par un revêtement étale de  $X$ .*

**Définition 4.3.2.** *On dit qu'un faisceau  $\mathcal{F}$  sur  $X$  est constructible s'il vérifie les conditions équivalentes suivantes :*

- (i) *Il existe une famille finie surjective de sous-schémas  $X_i$  de  $X$  tels que la restriction de  $\mathcal{F}$  à  $X_i$  soit l.c.c..*
- (ii) *Il existe une famille finie de morphismes finis  $p_i : X'_i \rightarrow X$ , pour chaque  $i$  un faisceau constant constructible (= défini par un groupe abélien fini)  $C_i$  sur  $X'_i$ , et un monomorphisme  $\mathcal{F} \rightarrow \prod p_{i*} C_i$ .*

On vérifie facilement que la catégorie des faisceaux constructibles sur  $X$  est une catégorie abélienne. De plus, si  $u : \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{G}$  est un homomorphisme de faisceaux et si  $\mathcal{F}$  est constructible, le faisceau  $\mathrm{im}(u)$  est constructible.

**Lemme 4.3.3.** *Tout faisceau de torsion  $\mathcal{F}$  est limite inductive filtrante de faisceaux constructibles.*

En effet, si  $j : U \rightarrow X$  est un schéma étale de type fini sur  $X$ , un élément  $\xi \in \mathcal{F}(U)$  tel que  $n\xi = 0$  définit un homomorphisme de faisceaux  $j_!\mathbb{Z}/n_U \rightarrow \mathcal{F}$  dont l'image (le plus petit sous-faisceau de  $\mathcal{F}$  dont  $\xi$  soit section locale) est un sous-faisceau constructible de  $\mathcal{F}$ . Il est clair que  $\mathcal{F}$  est limite inductive de tels sous-faisceaux.

**Définition 4.3.4.** *Soient  $\mathcal{C}$  une catégorie abélienne et  $T$  un foncteur défini sur  $\mathcal{C}$  à valeurs dans la catégorie des groupes abéliens. On dira que  $T$  est effaçable dans  $\mathcal{C}$  si, pour tout objet  $A$  de  $\mathcal{C}$  et tout  $\alpha \in T(A)$ , il existe un monomorphisme  $u : A \rightarrow M$  dans  $\mathcal{C}$  tel que  $T(u)\alpha = 0$ .*

**Lemme 4.3.5.** *Les foncteurs  $H^q(X, -)$  pour  $q > 0$  sont effaçables dans la catégorie des faisceaux constructibles sur  $X$ .*

Il suffit de remarquer que, si  $\mathcal{F}$  est un faisceau constructible, il existe nécessairement un entier  $n > 0$  tel que  $\mathcal{F}$  soit un faisceau de  $\mathbb{Z}/n$ -modules. Alors il existe un monomorphisme  $\mathcal{F} \hookrightarrow \mathcal{G}$ , où  $\mathcal{G}$  est un faisceau de  $\mathbb{Z}/n$ -modules et  $H^q(X, \mathcal{G}) = 0$  pour tout  $q > 0$ . On peut par exemple prendre pour  $\mathcal{G}$  la résolution de Godement  $\prod_{x \in X} i_{x*}\mathcal{F}_{\bar{x}}$ , où  $x$  parcourt les points de  $X$  et  $i_x : \bar{x} \rightarrow X$  est un point géométrique centré en  $X$ . D'après (4.3.3)  $\mathcal{G}$  est limite inductive de faisceaux constructibles, d'où le lemme, car les foncteurs  $H^q(X, -)$  commutent aux limites inductives.

**Lemme 4.3.6.** *Soit  $\varphi^\bullet : T^\bullet \rightarrow T'^\bullet$  un morphisme de foncteurs cohomologiques définis sur une catégorie abélienne  $\mathcal{C}$  et à valeurs dans la catégorie des groupes abéliens. Supposons que  $T^q$  est effaçable pour  $q > 0$  et soit  $\mathcal{E}$  un sous-ensemble d'objets de  $\mathcal{C}$  tel que tout objet de  $\mathcal{C}$  soit contenu dans un objet appartenant à  $\mathcal{E}$ . Alors les conditions suivantes sont équivalentes :*

- (i)  $\varphi^q(A)$  est bijectif pour tout  $q \geq 0$  et tout  $A \in \text{Ob } \mathcal{C}$ .
- (ii)  $\varphi^0(M)$  est bijectif et  $\varphi^q(M)$  surjectif pour tout  $q > 0$  et tout  $M \in \mathcal{E}$ .
- (iii)  $\varphi^0(A)$  est bijectif pour tout  $A \in \text{Ob } \mathcal{C}$  et  $T'^q$  est effaçable pour tout  $q > 0$ .

La démonstration se fait par récurrence sur  $q$  et ne présente pas de difficultés.

**Proposition 4.3.7.** *Soit  $X_0$  un sous-schéma de  $X$ . Supposons que, pour tout  $n \geq 0$  et pour tout schéma  $X'$  fini sur  $X$ , l'application canonique*

$$H^q(X', \mathbb{Z}/n) \rightarrow H^q(X'_0, \mathbb{Z}/n),$$

*où  $X'_0 = X' \times_X X_0$ , est bijective pour  $q = 0$  et surjective pour  $q > 0$ . Alors, pour tout faisceau de torsion  $\mathcal{F}$  sur  $X$  et pour tout  $q \geq 0$ , l'application canonique*

$$H^q(X, \mathcal{F}) \rightarrow H^q(X_0, \mathcal{F})$$

*est bijective.*

Par passage à la limite, il suffit de démontrer l'assertion pour  $\mathcal{F}$  constructible. On applique le lemme (4.3.6) en prenant pour  $\mathcal{C}$  la catégorie des faisceaux constructibles sur  $X$ ,  $T^q = H^q(X, -)$ ,  $T'^q = H^q(X_0, -)$ , et  $\mathcal{E}$  l'ensemble des faisceaux constructibles de la forme  $\prod p_{i*}C_i$ , où  $p_i : X'_i \rightarrow X$  est un morphisme fini et  $C_i$  un faisceau constant fini sur  $X'_i$ .

## 4.4 Fin de la démonstration

Par la méthode de fibration par des courbes (3.4.3), on se ramène à démontrer le théorème en dimension relative  $\leq 1$ . D'après le paragraphe précédent, il suffira de montrer que, si  $S$  est le spectre d'un anneau local noethérien strictement hensélien,  $f : X \rightarrow S$  un morphisme propre dont la fibre fermée  $X_0$  est de dimension  $\leq 1$  et  $n$  un entier  $\geq 0$ , l'homomorphisme canonique

$$H^q(X, \mathbb{Z}/n) \rightarrow H^q(X_0, \mathbb{Z}/n)$$

est bijectif pour  $q = 0$  et surjectif pour  $q > 0$ .

Les cas  $q = 0$  et  $1$  ont été vus plus haut et on a  $H^q(X_0, \mathbb{Z}/n) = 0$  pour  $q \geq 3$  ; il suffit donc de traiter le cas  $q = 2$ . On peut évidemment supposer que  $n$  est une puissance d'un nombre premier. Si  $n = p^r$ , où  $p$  est la caractéristique du corps résiduel de  $S$ , la théorie d'Artin-Schreier montre qu'on a  $H^2(X_0, \mathbb{Z}/p^r) = 0$ . Si  $n = \ell^r$ ,  $\ell \neq p$ , on déduit de la théorie de Kummer un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc} \text{Pic}(X) & \xrightarrow{\alpha} & H^2(X, \mathbb{Z}/\ell^r) \\ \downarrow & & \downarrow \\ \text{Pic}(X_0) & \xrightarrow{\beta} & H^2(X_0, \mathbb{Z}/\ell^r) \end{array}$$

où l'application  $\beta$  est surjective (On l'a vu au chapitre 3 pour une courbe lisse sur un corps algébriquement clos, mais des arguments similaires s'appliquent à n'importe quelle courbe sur un corps séparablement clos).

Pour conclure, il suffira donc de montrer :

**Proposition 4.4.1.** *Soient  $S$  le spectre d'un anneau local noethérien hensélien et  $f : X \rightarrow S$  un morphisme propre dont la fibre fermée  $X_0$  est de dimension  $\leq 1$ . Alors l'application canonique de restriction*

$$\text{Pic}(X) \rightarrow \text{Pic}(X_0)$$

*est surjective (Il suffit d'ailleurs que le morphisme  $f$  soit séparé de type fini).*

Pour simplifier la démonstration, nous supposons que  $X$  est intègre, bien que cela ne soit pas nécessaire. Tout faisceau inversible sur  $X_0$  est associé à un diviseur de Cartier (car  $X_0$  est une courbe, donc quasi-projectif), il suffit donc de montrer que l'application canonique  $\text{Div}(X) \rightarrow \text{Div}(X_0)$  est surjective.

Tout diviseur sur  $X_0$  est combinaison linéaire de diviseurs dont le support est concentré en un seul point fermé non isolé de  $X_0$ . Soient  $x$  un tel point,  $t_0 \in \mathcal{O}_{X_0, x}$  un élément régulier non inversible de  $\mathcal{O}_{X_0, x}$  et  $D_0$  le diviseur concentré en  $x$  d'équation locale  $t_0$ . Soit  $U$  un voisinage ouvert de  $x$  dans  $X$  tel qu'il existe une section  $t \in \Gamma(U, \mathcal{O}_U)$  relevant  $t_0$ . Soit  $Y$  le fermé de  $U$  d'équation  $t = 0$  ; quitte à prendre  $U$  assez petit, on peut supposer que  $x$  est le seul point de  $Y \cap X_0$ . Alors  $Y$  est quasi-fini au-dessus de  $S$  en  $x$  ; puisque  $S$  est le spectre d'un anneau local hensélien, on en déduit que  $Y = Y_1 \amalg Y_2$ , où  $Y_1$  est fini sur  $S$  et où  $Y_2$  ne rencontre pas  $X_0$ . De plus, comme  $X$  est séparé sur  $S$ ,  $Y_1$  est fermé dans  $X$ .

Quitte à remplacer  $U$  par un voisinage ouvert plus petit de  $x$ , on peut supposer que  $Y = Y_1$ , autrement dit que  $Y$  est fermé dans  $X$ . On définit alors un diviseur  $D$  sur  $X$  relevant  $D_0$  en posant  $D|X \setminus Y = 0$  et  $D|U = \text{div}(t)$  ce qui a un sens car  $t$  est inversible sur  $U \setminus Y$ .

#### 4.4.2 Remarque

Dans le cas où  $f$  est propre, on pourrait aussi faire une démonstration du même style que celle de la proposition (4.2.2). En effet, comme  $X_0$  est une courbe, il n'y a pas d'obstruction à relever un faisceau inversible sur  $X_0$  aux voisinages infinitésimaux  $X_n$  de  $X_0$ , donc au complété formel  $\hat{\mathfrak{X}}$  de  $X$  le long de  $X_0$ . On conclut alors en appliquant successivement le théorème d'existence de Grothendieck et le théorème d'approximation d'Artin.

### 4.5 Cohomologie à support propre

**Définition 4.5.1.** *Soit  $X$  un schéma séparé de type fini sur un corps  $k$ . D'après un théorème de Nagata, il existe un schéma  $\bar{X}$  propre sur  $k$  et une immersion ouverte  $j : X \rightarrow \bar{X}$ . Pour tout faisceau de torsion  $\mathcal{F}$  sur  $X$  on note  $j_! \mathcal{F}$  le prolongement par 0 de  $\mathcal{F}$  à  $\bar{X}$  et on définit les groupes de cohomologie à support propre  $H_c^q(X, \mathcal{F})$  en posant*

$$H_c^q(X, \mathcal{F}) = H^q(\bar{X}, j_! \mathcal{F}).$$

Montrons que cette définition est indépendante de la compactification  $j : X \rightarrow \bar{X}$  choisie. Soient  $j_1 : X \rightarrow \bar{X}_1$  et  $j_2 : X \rightarrow \bar{X}_2$  deux compactifications. Alors  $X$  s'envoie dans  $\bar{X}_1 \times \bar{X}_2$  par  $x \mapsto (j_1(x), j_2(x))$

et l'image fermée  $\bar{X}_3$  de  $X$  par cette application est une compactification de  $X$ . On a ainsi un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc} & \bar{X}_1 & \\ j_1 \nearrow & & \nwarrow p_1 \\ X & \xrightarrow{(j_1, j_2)} & \bar{X}_3 \\ j_2 \searrow & & \swarrow p_2 \\ & \bar{X}_2 & \end{array}$$

où  $p_1$  et  $p_2$ , les restrictions des projections naturelles à  $\bar{X}_3$ , sont des morphismes propres. Il suffit donc de traiter le cas où on a un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{j_2} & \bar{X}_2 \\ & \searrow j_1 & \downarrow p \\ & & \bar{X}_1 \end{array}$$

avec  $p$  un morphisme propre.

**Lemme 4.5.2.** *On a  $p_*(j_{2!}\mathcal{F}) = j_{1!}\mathcal{F}$  et  $R^q p_*(j_{2!}\mathcal{F}) = 0$ , pour  $q > 0$ .*

Notons tout de suite que lemme suffit pour conclure. En utilisant la suite spectrale de Leray du morphisme  $p$ , on en déduit qu'on a, pour tout  $q \geq 0$ ,

$$H^q(\bar{X}_2, j_{2!}\mathcal{F}) = H^q(\bar{X}_1, j_{1!}\mathcal{F}).$$

Pour démontrer le lemme, on raisonne fibre par fibre en utilisant le théorème de changement de base (4.1.1) pour  $p$ . Le résultat est immédiat, car, au-dessus d'un point de  $X$ ,  $p$  est un isomorphe et, au-dessus d'un point de  $\bar{X}_1 \setminus X$ ,  $j_{2!}\mathcal{F}$  est nul sur la fibre de  $p$ .

### 4.5.3

De même, si  $f : X \rightarrow S$  est un morphisme séparé de type fini de schémas noethériens, il existe un morphisme propre  $\bar{f} : \bar{X} \rightarrow S$  et une immersion ouverte  $j : X \rightarrow \bar{X}$ . On définit alors les images directes supérieures à support propre  $R^q f_!$  en posant pour tout faisceau de torsion  $\mathcal{F}$  sur  $X$

$$R^q f_! \mathcal{F} = R^q f_*(j_! \mathcal{F}).$$

On vérifie comme précédemment que cette définition est indépendante de la compactification choisie.

**Théorème 4.5.4.** *Soient  $f : X \rightarrow S$  un morphisme séparé de type fini de schémas noethériens et  $\mathcal{F}$  un faisceau de torsion sur  $X$ . Alors la fibre de  $R^q f_! \mathcal{F}$  en un point géométrique  $s$  de  $S$  est isomorphe à la cohomologie à support propre  $H_c^q(X_s, \mathcal{F})$  de la fibre  $X_s$  de  $f$  en  $s$ .*

C'est une simple variante du théorème de changement de base pour un morphisme propre (4.1.1). Plus généralement, si

$$\begin{array}{ccc} X & \xleftarrow{g'} & X' \\ \downarrow f & & \downarrow f' \\ S & \xleftarrow{g} & S' \end{array}$$

est un diagramme cartésien, on a un isomorphe canonique

$$g^*(R^q f_! \mathcal{F}) \simeq R^q f'_! (g'^* \mathcal{F}). \quad (4.5.4.1)$$

## 4.6 Applications

**Théorème 4.6.1** (d’annulation). *Soient  $f : X \rightarrow S$  un morphisme séparé de type fini dont les fibres sont de dimension  $\leq n$  et  $\mathcal{F}$  un faisceau de torsion sur  $X$ . Alors on a  $R^q f_! \mathcal{F} = 0$  pour  $q > 2n$ .*

D’après le théorème de changement de base, on peut supposer que  $S$  est le spectre d’un corps séparablement clos. Si  $\dim X = n$ , il existe un ouvert affine  $U$  de  $X$  tel que  $\dim(X \setminus U) < n$ ; on a alors une suite exacte  $0 \rightarrow \mathcal{F}_U \rightarrow \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{F}_{X \setminus U} \rightarrow 0$  et, par récurrence sur  $n$ , il suffit de démontrer le théorème pour  $X = U$  affine. Puis la méthode de fibration par des courbes (3.4.1) et le théorème de changement de base permettent de se ramener à une courbe sur un corps séparablement clos pour laquelle on déduit le résultat voulu du théorème de Tsen (3.3.6).

**Théorème 4.6.2** (de finitude). *Soient  $f : X \rightarrow S$  un morphisme séparé de type fini et  $\mathcal{F}$  un faisceau constructible sur  $X$ . Alors les faisceaux  $R^q f_! \mathcal{F}$  sont constructibles.*

Nous ne considérons que le cas où  $\mathcal{F}$  est annulé par un entier inversible sur  $X$ .

Par démontrer le théorème on se ramène au cas où  $\mathcal{F}$  est un faisceau constant  $\mathbb{Z}/n$  et où  $f : X \rightarrow S$  est un morphisme propre et lisse dont les fibres sont des courbes géométriquement connexes de genre  $g$ . Pour  $n$  inversible sur  $X$ , les faisceaux  $R^q f_* \mathcal{F}$  sont alors localement libres de rang fini, nuls pour  $q > 2$  (4.6.1). Remplaçant  $\mathbb{Z}/n$  par le faisceau localement isomorphe (sur  $S$ )  $\mu_n$ , on a canoniquement

$$\begin{aligned} R^0 f_* \mu_n &= \mu_n \\ R^1 f_* \mu_n &= \underline{\text{Pic}}(X/S)_n \\ R^2 f_* \mu_n &= \mathbb{Z}/n. \end{aligned} \tag{4.6.2.1}$$

**Théorème 4.6.3** (comparaison avec la cohomologie classique). *Soient  $f : X \rightarrow S$  un morphisme séparé de schémas de type fini sur  $\mathbb{C}$ , et  $\mathcal{F}$  un faisceau de torsion sur  $X$ . Notons par un exposant  $(-)^{\text{an}}$  le foncteur de passage aux espaces topologiques usuels, et par  $R^q f_!^{\text{an}}$  les foncteurs dérivés du foncteur image directe à support propre par  $f^{\text{an}}$ . On a*

$$(R^q f_! \mathcal{F})^{\text{an}} \simeq R^q f_!^{\text{an}} \mathcal{F}^{\text{an}}.$$

En particulier, pour  $S = \text{un point}$  et  $\mathcal{F}$  le faisceau constant  $\mathbb{Z}/n$ ,

$$H_c^q(X, \mathbb{Z}/n) \simeq H_c^q(X^{\text{an}}, \mathbb{Z}/n).$$

Des déviassages utilisant le théorème de changement de base nous ramènent au cas où  $X$  est une courbe propre et lisse, où  $S = \text{un point}$ , et où  $\mathcal{F} = \mathbb{Z}/n$ . Les groupes de cohomologie considérés sont alors nuls pour  $q \neq 0, 1, 2$ , et on invoque [Ser56] : en effet, si  $X$  est propre sur  $\mathbb{C}$ , on a  $\pi_0(X) = \pi_0(X^{\text{an}})$  et  $\pi_1(X) = \text{complété profini de } \pi_1(X^{\text{an}})$ , d’où l’assertion pour  $q = 0, 1$ . Pour  $q = 2$ , on utilise la suite exacte de Kummer et le fait que, par [Ser56] encore,  $\text{Pic}(X) = \text{Pic}(X^{\text{an}})$ .

**Théorème 4.6.4** (dimension cohomologique des schémas affines). *Soient  $X$  un schéma affine de type fini sur un corps séparablement clos et  $\mathcal{F}$  un faisceau de torsion sur  $X$ . Alors on a  $H^1(X, \mathcal{F}) = 0$  pour  $q > \dim(X)$ .*

Pour la très jolie démonstration nous revoyons à [AGV72], XIV §2 et 3.

### 4.6.5 Remarque

Ce théorème est en quelque sorte un substitut pour la théorie de Morse. Considérons en effet le cas classique où  $X$  est lisse et affine sur  $\mathbb{C}$  plongé dans un espace affine type  $\mathbb{C}^N$ . Alors, pour presque tout point  $p \in \mathbb{C}^N$ , la fonction “distance à  $p$ ” sur  $X$  est une fonction de Morse et les indices de ses points critiques sont plus petits que  $\dim(X)$ . Ainsi  $X$  est obtenu par recollement d’anses d’indice plus petit que  $\dim(X)$ , d’où l’analogie classique de (4.6.4).

## 5 Acyclicité locale des morphismes lisses

Soient  $X$  une variété analytique complexe et  $f : X \rightarrow D$  un morphisme de  $X$  dans le disque. On note  $[0, t]$  le segment de droit fermé d'extrémités 0 et  $t$  dans  $D$  et  $(0, t]$  le segment semi-ouvert. Si  $f$  est *lisse*, l'inclusion

$$j : f^{-1}((0, t]) \hookrightarrow f^{-1}([0, t])$$

est une équivalence d'homotopie ; on peut pousser la fibre spéciale  $X_0 = f^{-1}(0)$  dans  $f^{-1}([0, t])$ .

En pratique, pour  $t$  assez petit,  $f^{-1}((0, t])$  sera un fibré sur  $(0, t]$  de sorte que l'inclusion

$$X_t = f^{-1}(t) \hookrightarrow f^{-1}((0, t])$$

sera également une équivalence d'homotopie. On appelle alors *morphisme de cospécialisation* la classe d'homotopie d'applications :

$$\text{cosp} : X_0 \hookrightarrow f^{-1}([0, t]) \xleftarrow{\sim} f^{-1}((0, t]) \xleftarrow{\sim} X_t.$$

On peut exprimer cette construction en termes imagés en disant que, pour un morphisme lisse, la fibre générale avale la fibre spéciale.

Ne supposons plus  $f$  nécessairement lisse (mais supposons que  $f^{-1}((0, t])$  soit un fibré sur  $(0, t])$ ). On peut encore définir un morphisme  $\text{cosp}^\bullet$  en cohomologie dès que  $j_*\mathbb{Z} = \mathbb{Z}$  et  $R^q j_*\mathbb{Z} = 0$  pour  $q > 0$ . Sous ces hypothèses, la suite spectrale de Leray pour  $j$  montre qu'on a

$$H^\bullet(f^{-1}([0, t]), \mathbb{Z}) \xrightarrow{\sim} H^\bullet(f^{-1}((0, t]), \mathbb{Z})$$

et  $\text{cosp}^\bullet$  est le morphisme composé :

$$\text{cosp}^\bullet : H^\bullet(X_t, \mathbb{Z}) \xleftarrow{\sim} H^\bullet(f^{-1}((0, t]), \mathbb{Z}) \xleftarrow{\sim} H^\bullet(f^{-1}([0, t]), \mathbb{Z}) \rightarrow H^\bullet(X_0, \mathbb{Z})$$

La fibre de  $R^q j_*\mathbb{Z}$  en un point  $x \in X_0$  se calcule comme suit. On prend dans un espace ambiant une boule  $B_\varepsilon$  de centre  $x$  et de rayon  $\varepsilon$  assez petit, et pour  $\eta$  assez petit, on pose  $E = X \cap B_\varepsilon \cap f^{-1}(\eta t)$  ; c'est la *variété des cycles évanescents* en  $x$ . On a

$$(R^q j_*\mathbb{Z})_x \xleftarrow{\sim} H^q(X \cap B_\varepsilon \cap f^{-1}((0, \eta t]), \mathbb{Z}) \xrightarrow{\sim} H^q(E, \mathbb{Z})$$

et le morphisme de cospécialisation est défini en cohomologie dès que les variétés de cycles évanescents sont acycliques ( $H^0(E, \mathbb{Z}) = \mathbb{Z}$  et  $H^q(E, \mathbb{Z}) = 0$  pour  $q > 0$ ), ce qui s'exprime en disant que  $f$  est *localement acyclique*.

Ce chapitre est consacré à l'analogue de cette situation pour un morphisme lisse de schémas pour la cohomologie étale. Cependant il est indispensable dans ce cadre de se limiter aux coefficients de torsion et d'ordre *premier aux caractéristiques résiduelles*. Le paragraphe 5.1 est consacré à des généralités sur les morphismes localement acycliques et les flèches de cospécialisation. Dans le paragraphe 5.2, on démontre qu'un morphisme lisse est localement acyclique. Dans le paragraphe 5.3, on joint ce résultat à ceux du chapitre précédent pour en déduire deux applications : un théorème de spécialisation des groupes de cohomologie (la cohomologie des fibres géométriques d'un morphisme propre et lisse est localement constant) et un théorème de changement de base par un morphisme lisse.

Dans tout ce qui suit, on fixe un entier  $n$  et "schéma" signifie "schéma sur lequel  $n$  est inversible." "Point géométrique" signifiera toujours "point géométrique algébrique" (2.3.1)  $x : \text{Spec}(k) \rightarrow X$ , avec  $k$  algébriquement clos.

### 5.1 Morphismes localement acycliques

#### 5.1.1 Notation

Étant donné un schéma  $S$  et un point géométrique  $s$  de  $S$ , on notera  $\tilde{S}^s$  le spectre du localisé stricte de  $S$  en  $s$ .

**Définition 5.1.2.** On dit qu'un point géométrique  $t$  de  $S$  est une *générisation* de  $s$  s'il est défini par une clôture algébrique du corps résiduel d'un point de  $\tilde{S}^s$ . On dit aussi que  $s$  est une *spécialisation* de  $t$  et on appelle flèche de spécialisation le  $S$ -morphisme  $t \rightarrow \tilde{S}^s$ .

**Définition 5.1.3.** Soit  $f : X \rightarrow S$  un morphisme de schémas. Soient  $s$  un point géométrique de  $S$ ,  $t$  une générisation de  $s$ ,  $x$  un point géométrique de  $X$  au-dessus de  $s$  et  $\tilde{X}_t^x = \tilde{X}^x \times_{\tilde{S}^s} t$ . Alors on dit que  $\tilde{X}_t^x$  est une variété de cycles évanescents de  $f$  au point  $x$ .

On dit que  $f$  est localement acyclique si, la cohomologie réduite de toute variété de cycles évanescents  $\tilde{X}_t^x$  est nulle :

$$\hat{H}^\bullet(\tilde{X}_t^x, \mathbb{Z}/n) = 0, \quad (5.1.3.1)$$

i.e.  $H^0(X_t^x, \mathbb{Z}/n) = \mathbb{Z}/n$  et  $H^q(\tilde{X}_t^x, \mathbb{Z}/n) = 0$  pour  $q > 0$ .

**Lemme 5.1.4.** Soient  $f : X \rightarrow S$  un morphisme localement acyclique et  $g : S' \rightarrow S$  un morphisme quasi-fini (ou limite projective de morphismes quasi-finis). Alors le morphisme  $f' : X' \rightarrow S'$  déduit de  $f$  par changement de base est localement acyclique.

On vérifie en effet que tout variété de cycles évanescents de  $f'$  est une variété de cycles évanescents de  $f$ .

**Lemme 5.1.5.** Soit  $f : X \rightarrow S$  un morphisme localement acyclique. Pour tout point géométrique  $t$  de  $S$ , donnant lieu à un diagramme cartésien

$$\begin{array}{ccc} X_t & \xrightarrow{\varepsilon'} & X \\ \downarrow & & \downarrow f \\ t & \xrightarrow{\varepsilon} & S \end{array}$$

On a  $\varepsilon'_* \mathbb{Z}/n = f^* \varepsilon_* \mathbb{Z}/n$  et  $R^q \varepsilon'_* \mathbb{Z}/n = 0$  pour  $q > 0$ .

Soient  $\bar{S}$  l'adhérence de  $\varepsilon(t)$ ,  $S'$  le normalisé de  $\bar{S}$  dans  $k(t)$ , et le diagramme cartésien

$$\begin{array}{ccccc} X_t & \xrightarrow{i'} & X' & \xrightarrow{\alpha'} & X \\ \downarrow & & \downarrow f' & & \downarrow f \\ t & \xrightarrow{i} & S' & \xrightarrow{\alpha} & S \end{array}$$

Les anneaux locaux de  $S'$  sont normaux à corps de fractions séparablement clos. Ils sont donc strictement henséliens, et l'acyclicité locale de  $f'$  (5.1.4) fournit  $i'_* \mathbb{Z}/n = \mathbb{Z}/n$ ,  $R^q i'_* \mathbb{Z}/n = 0$  pour  $q > 0$ . Puisque  $\alpha$  est entier, on a alors

$$R^q \varepsilon'_* \mathbb{Z}/n = \alpha'_* R^q i'_* \mathbb{Z}/n = \alpha'_* f'^* R^q i_* \mathbb{Z}/n = f^* \alpha_* R^q i_* \mathbb{Z}/n = f^* R^q \varepsilon_* \mathbb{Z}/n,$$

et le lemme.

### 5.1.6

Etant donné un morphisme localement acyclique  $f : X \rightarrow S$  et une flèche de spécialisation  $t \rightarrow \tilde{S}^s$ , nous allons définir des homomorphismes canoniques, dits flèches de cospécialisation

$$\text{cosp}^\bullet : H^\bullet(X_t, \mathbb{Z}/n) \rightarrow H^\bullet(X_s, \mathbb{Z}/n),$$

reliant la cohomologie de la fibre générale  $X_t = X \times_S t$  et celle de la fibre spéciale  $X_s = X \times_S s$ .

Considérons le diagramme cartésien

$$\begin{array}{ccccc} X_t & \xrightarrow{\varepsilon'} & \tilde{X} & \longleftarrow & X_s \\ \downarrow & & \downarrow f' & & \downarrow \\ t & \xrightarrow{\varepsilon} & \tilde{S}^s & \longleftarrow & s \end{array}$$

déduit de  $f$  par changement de base. D'après (5.1.4),  $f'$  est encore localement acyclique. De la définition de l'acyclicité locale, on tire aussitôt que la restriction à  $X_s$  des faisceaux  $R^q \varepsilon'_* \mathbb{Z}/n$  est  $\mathbb{Z}/n$  pour  $q = 0$ , et 0 pour  $q > 0$ . Par (5.1.5) on sait même que  $R^q \varepsilon'_* \mathbb{Z}/n = 0$  pour  $q > 0$ . On définit  $\text{cosp}^\bullet$  comme la flèche composée

$$H^\bullet(X_t, \mathbb{Z}/n) \simeq H^\bullet(X, \varepsilon'_* \mathbb{Z}/n) \rightarrow H^\bullet(X_s, \mathbb{Z}/n). \quad (5.1.6.1)$$

**Variante** Soient  $\bar{S}$  l'adhérence de  $\varepsilon(t)$  dans  $\tilde{S}^s$ ,  $S'$  le normalisé de  $\bar{S}$  dans  $k(t)$  et  $X'/S'$  déduit de  $X/S$  par changement de base. Le diagramme (5.1.6.1) peut encore s'écrire

$$H^\bullet(X_t, \mathbb{Z}/n) \simeq H^\bullet(X', \mathbb{Z}/n) \rightarrow H^\bullet(X_s, \mathbb{Z}/n).$$

**Théorème 5.1.7.** *Soient  $S$  un schéma localement noethérien,  $s$  un point géométrique de  $S$  et  $f : X \rightarrow S$  un morphisme. On suppose*

- a) *le morphisme  $f$  est localement acyclique,*
- b) *pour tout morphisme de spécialisation  $t \rightarrow \tilde{S}^s$  et pour tout  $q \geq 0$ , les flèches de cospécialisation  $H^q(X_t, \mathbb{Z}/n) \rightarrow H^q(X_s, \mathbb{Z}/n)$  sont bijectives.*

*Alors l'homomorphisme canonique  $(R^q f_* \mathbb{Z}/n)_s \rightarrow H^q(X_s, \mathbb{Z}/n)$  est bijectif pour tout  $q \geq 0$ .*

Pour démontrer le théorème, il est clair qu'on peut supposer  $S = \tilde{S}^s$ . On va en fait montrer que, pour tout faisceau de  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ -modules  $\mathcal{F}$  sur  $S$ , l'homomorphisme canonique  $\varphi^q(\mathcal{F}) : (R^q f_* f^* \mathcal{F})_s \rightarrow H^q(X_s, f^* \mathcal{F})$  est bijectif.

Tout faisceau de  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ -modules est limite inductive filtrante de faisceaux constructibles de  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ -modules (4.3.3). De plus tout faisceau constructible de  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ -modules se plonge dans un faisceau de la forme  $\prod i_{\lambda*} C_\lambda$ , où  $i_\lambda : t_\lambda \rightarrow S$  est une famille finie de générisations de  $s$  et  $C_\lambda$  un  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ -module libre de rang fini sur  $t_\lambda$ . D'après la définition des flèches de cospécialisation, la condition b) signifie que les homomorphismes  $\varphi^q(\mathcal{F})$  sont bijectifs si  $\mathcal{F}$  est de cette forme.

On conclut à l'aide d'une variante du lemme (4.3.6) :

**Lemme 5.1.8.** *Soit  $\mathcal{C}$  une catégorie abélienne dans laquelle les limites inductives filtrantes existent. Soit  $\varphi^\bullet : T^\bullet \rightarrow T'^\bullet$  un morphisme de foncteurs cohomologiques commutant aux limites inductives filtrantes, définis sur  $\mathcal{C}$  et à valeurs dans la catégorie des groupes abéliens. Supposons qu'il existe deux sous-ensembles  $\mathcal{D}$  et  $\mathcal{E}$  d'objets de  $\mathcal{C}$  tels que :*

- a) *tout objet de  $\mathcal{C}$  est limite inductive filtrante d'objets appartenant à  $\mathcal{D}$ ,*
- b) *tout objet appartenant à  $\mathcal{D}$  est contenu dans un objet appartenant à  $\mathcal{E}$ .*

*Alors les conditions suivantes sont équivalentes :*

- (i)  *$\varphi^q(A)$  est bijectif pour tout  $q \geq 0$  et tout  $A \in \text{Ob } \mathcal{C}$ .*
- (ii)  *$\varphi^q(M)$  est bijectif pour tout  $q \geq 0$  et tout  $M \in \mathcal{E}$ .*

La démonstration du lemme se fait par passage à la limite inductive, récurrence sur  $q$  et application répétée du lemme des cinq au diagramme de suites exactes de cohomologie déduit d'une suite exacte  $0 \rightarrow A \rightarrow M \rightarrow A' \rightarrow 0$ , avec  $A \in \mathcal{D}$ ,  $M \in \mathcal{E}$ ,  $A' \in \text{Ob } \mathcal{C}$ .

**Corollaire 5.1.9.** *Soient  $S$  le spectre d'un anneau local noethérien strictement hensélien et  $f : X \rightarrow S$  un morphisme localement acyclique. Supposons que, pour tout point géométrique  $t$  de  $S$  on ait  $H^0(X_t, \mathbb{Z}/n) = \mathbb{Z}/n$  et  $H^q(X_t, \mathbb{Z}/n) = 0$  pour  $q > 0$  (autrement dit les fibres géométriques de  $f$  sont acycliques). Alors on a  $f_* \mathbb{Z}/n = \mathbb{Z}/n$  et  $R^q f_* \mathbb{Z}/n = 0$  pour  $q > 0$ .*

**Corollaire 5.1.10.** *Soient  $f : X \rightarrow Y$  et  $g : Y \rightarrow Z$  des morphismes de schémas localement noethériens. Alors, si  $f$  et  $g$  sont localement acycliques, il en est de même de  $g \circ f$ .*

On peut supposer que  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  sont strictement locaux et que  $f$  et  $g$  sont des morphismes locaux. Il s'agit alors de montrer que, si  $z$  est un point géométrique algébrique de  $Z$ , on a  $H^0(X_z, \mathbb{Z}/n) = \mathbb{Z}/n$  et  $H^q(X_z, \mathbb{Z}/n) = 0$  pour  $q > 0$ .

Puisque  $g$  est localement acyclique, on a  $H^0(Y_z, \mathbb{Z}/n) = \mathbb{Z}/n$ , et  $H^q(Y_z, \mathbb{Z}/n) = 0$  pour  $q > 0$ . Par ailleurs le morphisme  $f_z : X_z \rightarrow Y_z$  est localement acyclique (5.1.4) et ses fibres géométriques sont acycliques, car ce sont des variétés de cycles évanescents de  $f$ . D'après (5.1.9), on a donc  $R^q f_{z*} \mathbb{Z}/n = 0$  pour  $q > 0$ . De plus  $f_{z*} \mathbb{Z}/n$  est constant de fibre  $\mathbb{Z}/n$  sur  $Y_z$ . On conclut à l'aide de la suite spectrale de Leray de  $f_z$ .



## 5.2 Acyclicité locale d'un morphisme lisse

**Théorème 5.2.1.** *Un morphisme lisse est localement acyclique.*

Soit  $f : X \rightarrow S$  un morphisme lisse. L'assertion est locale pour la topologie étale sur  $X$  et  $S$ , on peut donc supposer que  $X$  est l'espace affine type de dimension  $d$  sur  $S$ . Par passage à la limite, on peut supposer que  $S$  est noethérien et la transitivité de l'acyclicité locale (5.1.10) montre qu'il suffit de traiter le cas  $d = 1$ .

Soient  $s$  un point géométrique de  $S$  et  $x$  un point géométrique de  $X$  centré en un point fermé de  $X_s$ . Il s'agit de montrer que les fibres géométriques du morphisme  $\tilde{X}^x \rightarrow \tilde{S}^s$  sont acycliques. On posera désormais  $S = \tilde{S}^s = \text{Spec}(A)$  et  $X = \tilde{X}^x$ . On a  $X \simeq \text{Spec } A\{T\}$ , où  $A\{T\}$  est l'hensélisé de  $A[T]$  au point  $T = 0$  au-dessus de  $s$ .

Si  $t$  est un point géométrique de  $S$ , la fibre  $X_t$  est limite projective de courbes affines et lisses sur  $t$ . On a donc  $H^q(X_t, \mathbb{Z}/n) = 0$  pour  $q \geq 2$  et il suffit de montrer que  $H^0(X_t, \mathbb{Z}/n) = \mathbb{Z}/n$  et  $H^1(X_t, \mathbb{Z}/n) = 0$  pour  $n$  premier à la caractéristique résiduelle de  $S$ . Cela résulte des deux propositions suivantes.

**Proposition 5.2.2.** *Soient  $A$  un anneau local strictement hensélien,  $S = \text{Spec}(A)$  et  $X = \text{Spec } A\{T\}$ . Alors les fibres géométriques de  $X \rightarrow S$  sont connexes.*

On peut se ramener par passage à limite au cas où  $A$  est un hensélisé strict d'une  $\mathbb{Z}$ -algèbre de type fini.

Soient  $\bar{t}$  un point géométrique de  $S$ , localisé en  $t$ , et  $k'$  une extension finie séparable de  $k(\bar{t})$  dans  $k(\bar{t})$ . On pose  $t' = \text{Spec}(k')$  et  $X_{t'} = X \times_S \text{Spec}(k')$ . Il nous faut vérifier que, quelques soient  $\bar{t}$  et  $t'$ ,  $X_{t'}$  est connexe (par quoi on entend connexe et non vide). Soit  $A'$  le normalisé de  $A$  dans  $k'$ , i.e. l'anneau des éléments de  $k'$  entiers sur l'image de  $A$  dans  $k(t)$ . On a  $A\{T\} \otimes_A A' \xrightarrow{\sim} A'\{T\}$  : le membre de gauche est en effet hensélien local (car  $A'$  est fini sur  $A$ , et local) et limite d'algèbres locales étales sur  $A'[T] = A[T] \otimes_A A'$ . Le schéma  $X_{t'}$  est donc encore la fibre en  $t'$  de  $X' = \text{Spec}(A'\{T\})$  sur  $S' = \text{Spec}(A')$ . Le schéma local  $X'$  est normal, donc intègre ; son localisé  $X_{t'}$  est encore intègre, a fortiori connexe.

**Proposition 5.2.3.** *Soient  $A$  un anneau local strictement hensélien,  $S = \text{Spec}(A)$  et  $X = \text{Spec}(A\{T\})$ . Soient  $\bar{t}$  un point géométrique de  $S$  et  $X_{\bar{t}}$  la fibre géométrique correspondante. Alors tout revêtement étale galoisien de  $X_{\bar{t}}$  d'ordre premier à la caractéristique du corps résiduel de  $A$  est trivial.*

**Lemme 5.2.4** (théorème de pureté de Zariski-Nagata en dimension 2). *Soient  $C$  un anneau local régulier de dimension 2 et  $C'$  une  $C$ -algèbre finie normale étale au-dessus de l'ouvert complémentaire du point fermé de  $\text{Spec}(C)$ . Alors  $C'$  est étale sur  $C$ .*

En effet  $C'$  est normal de dimension 2, donc  $\text{prof}(C') = 2$ . Puisque  $\text{prof}(C') + \dim \text{proj}(C') = \dim(C) = 2$ , on en conclut que  $C'$  est libre sur  $C$ . Alors l'ensemble des points de  $C$  où  $C'$  est ramifié est défini par une équation, le discriminant ; puisqu'il ne contient pas de point de hauteur 1, il est vide.

**Lemme 5.2.5** (cas particulier du lemme d'Abhyankar). *Soient  $S = \text{Spec}(V)$  un trait,  $\pi$  une uniformisante,  $\eta$  le point générique de  $S$ ,  $X$  lisse sur  $S$ , irréductible, de dimension relative 1,  $\tilde{X}_\eta$  un revêtement étale galoisien de  $X_\eta$ , de degré  $n$  inversible sur  $S$ , et  $S_1 = \text{Spec}(V[\pi^{1/n}])$ . Notons par un indice  $(-)_1$  le changement de base de  $S$  à  $S_1$ . Alors,  $\tilde{X}_{1\eta}$  se prolonge en un revêtement étale de  $X_1$ .*

Soit  $\tilde{X}_1$  le normalisé de  $X_1$  dans  $\tilde{X}_{1\eta}$ . Vu la structure des groupes d'inertie modérée des anneaux de valuation discrète localisés de  $X$  aux points génériques de la fibre spéciale  $X_s$ ,  $\tilde{X}_1$  est étale sur  $X_1$  sur la fibre générale, et aux points génériques de la fibre spéciale. Par (5.2.4), il est étale partout.

### 5.2.6

Notons  $t$  le point en lequel  $\bar{t}$  est localisé. Il nous est loisible de remplacer  $A$  par le normalisé de  $A$  dans une extension finie séparable  $k(t')$  de  $k(t)$  dans  $k(\bar{t})$  (cf. 5.2.2). Ceci, et un passage à la limite préliminaire, nous permettent de supposer que

- $A$  est normal noethérien, et  $t$  est le point générique de  $S$ .
- Le revêtement étale considéré de  $X_{\bar{t}}$  provient d'un revêtement étale de  $X_t$ .
- Il provient d'un revêtement étale  $\tilde{X}_U$  de l'image réciproque  $X_U$  d'un ouvert non vide  $U$  de  $S$  (résulte de b) :  $t$  est la limite des  $U$ ).

- d) La complément de  $U$  est de codimension  $\geq 2$  (ceci au prix d'agrandir  $k(t)$ , par application de (5.2.5) aux anneaux de valuation discrète localisés de  $S$  en les points de  $S \setminus U$  de codimension 1 dans  $S$ ; ces points sont en nombre fini).
- e) Le revêtement  $\tilde{X}_U$  est trivial au-dessus du sous-schéma  $T = 0$ . (Ceci quitte à encore agrandir  $k(t)$ ).

Lorsque ces conditions sont remplies, nous allons voir que le revêtement  $\tilde{X}_U$  est trivial.

**Lemme 5.2.7.** *Soient  $A$  un anneau local strictement hensélien normal et noethérien,  $U$  un ouvert de  $\text{Spec}(A)$  dont le complément est de codimension  $\geq 2$ ,  $V$  son image réciproque dans  $X = \text{Spec}(A\{T\})$  et  $V'$  un revêtement étale de  $V$ . Si  $V'$  est trivial au-dessus de  $T = 0$ , alors  $V'$  est trivial.*

Soit  $B = \Gamma(V', \mathcal{O})$ . Puisque  $V'$  est l'image inverse de  $V$  dans  $\text{Spec}(B)$ , il suffit de voir que  $B$  est fini étale sur  $A\{T\}$  (donc décomposé, puisque  $A\{T\}$  est strictement hensélien). Soit  $\hat{X} = A[[T]]$ , et notons par  $(-)^{\wedge}$  le changement de base de  $X$  à  $\hat{X}$ . Le schéma  $\hat{X}$  est fidèlement plat sur  $X$ . On a donc  $\Gamma(\hat{V}', \mathcal{O}) = B \otimes_{A\{T\}} A[[T]]$ , et il suffit de voir que cet anneau  $\hat{B}$  est fini étale sur  $A[[T]]$ .

Soit  $V_m$  (resp.  $V'_m$ ) le sous-schéma de  $\hat{V}$  (resp.  $\hat{V}'$ ) d'équation  $T^{m+1} = 0$ . Par hypothèse,  $V'_0$  est un revêtement trivial de  $V_0$  : une somme de  $n$  copies de  $V_0$ . De même pour  $V'_m/V_m$ , puisque les revêtements étales sont insensibles aux nilpotents. On en tire

$$\varphi : \Gamma(\hat{V}', \mathcal{O}) \rightarrow \varprojlim_m \Gamma(V'_m, \mathcal{O}) = \left( \varprojlim_m \Gamma(V_m, \mathcal{O}) \right)^n.$$

Par hypothèse, le complément de  $U$  est de profondeur  $\geq 2$  : on a  $\Gamma(V_m, \mathcal{O}) = A[T]/(T^{m+1})$ , et  $\varphi$  est un homomorphisme de  $\hat{B}$  dans  $A[[T]]^n$ . Au-dessus de  $U$ , il fournit  $n$  sections distinctes de  $\hat{V}'/\hat{V}$  :  $\hat{V}'$  est donc trivial, somme de  $n$  copies de  $\hat{V}$ . Le complément de  $\hat{V}$  dans  $\hat{X}$  étant encore de codimension  $\geq 2$  (donc de profondeur  $\geq 2$ ), on en déduit que  $\hat{B} = A[[T]]^n$ , d'où le lemme.

### 5.3 Applications

**Théorème 5.3.1** (spécialisation des groupes de cohomologie). *Soit  $f : X \rightarrow S$  un morphisme propre et localement acyclique, par exemple un morphisme propre et lisse. Alors les faisceaux  $R^q f_* \mathbb{Z}/n$  sont localement constants constructibles et pour toute flèche de spécialisation  $t \rightarrow \tilde{S}^s$ , les flèches de cospécialisation  $H^q(X_t, \mathbb{Z}/n) \rightarrow H^q(X_s, \mathbb{Z}/n)$  sont bijectives.*

Cela résulte immédiatement de la définition des flèches de cospécialisation et des théorèmes de finitude et de changement de base pour les propres.

**Théorème 5.3.2** (changement de base par un morphisme lisse). *Soit un diagramme cartésien*

$$\begin{array}{ccc} X' & \xrightarrow{g'} & X \\ \downarrow f' & & \downarrow f \\ S' & \xrightarrow{g} & S \end{array}$$

avec  $g$  lisse. Pour tout faisceau  $\mathcal{F}$  sur  $X$ , de torsion et premier aux caractéristiques résiduelles de  $S$ , on a

$$g^* R^q f_* \mathcal{F} \xrightarrow{\sim} R^q f'_*(g'^* \mathcal{F}).$$

En prenant un recouvrement ouvert de  $X$ , on se ramène au cas où  $X$  est affine, puis par un passage à la limite au cas où  $X$  est de type fini sur  $S$ . Alors  $f$  se factorise en une immersion ouverte  $j : X \rightarrow \bar{X}$  et un morphisme propre  $\bar{f} : \bar{X} \rightarrow S$ . De la suite spectrale de Leray pour  $\bar{f} \circ j$  et du théorème de changement de base pour les morphismes propres, on déduit qu'il suffit de démontrer le théorème dans le cas où  $X \rightarrow S$  est une immersion ouverte.

Dans ce cas, si  $\mathcal{F}$  est de la forme  $\varepsilon_* C$ , où  $\varepsilon : t \rightarrow X$  est un point géométrique de  $X$ , le théorème est corollaire de (5.1.5). Le cas général en résulte par le lemme (5.1.8).

**Corollaire 5.3.3.** *Soient  $K/k$  une extension de corps séparablement clos,  $X$  un  $k$ -schéma et  $n$  un entier premier à la caractéristique de  $k$ . Alors l'application canonique  $H^q(X, \mathbb{Z}/n) \rightarrow H^q(X_K, \mathbb{Z}/n)$  est bijective pour tout  $q \geq 0$ .*

Il suffit de remarquer que  $\bar{K}$  est limite inductive de  $\bar{k}$ -algèbres lisses.

**Théorème 5.3.4** (pureté relative). *Soit un diagramme commutatif*

$$\begin{array}{ccccc} U & \xrightarrow{j} & X & \xleftarrow{i} & Y \\ & \searrow & \downarrow f & \swarrow h & \\ & & S & & \end{array} \quad (5.3.4.1)$$

avec  $f$  lisse purement de dimension relative  $N$ ,  $h$  lisse purement de dimension relative  $N-1$ ,  $i$  un plongement fermé et  $U = X \setminus Y$ . Pour  $n$  premier aux caractéristiques résiduelles de  $S$ , on a

$$\begin{aligned} j_* \mathbb{Z}/n &= \mathbb{Z}/n \\ R^1 j_* \mathbb{Z}/n &= \mathbb{Z}/n(-1)_Y \\ R^q j_* \mathbb{Z}/n &= 0 \quad \text{pour } q \geq 2 \end{aligned}$$

Dans ces formules,  $\mathbb{Z}/n(-1)$  désigne le  $\mathbb{Z}/n$ -dual de  $\mu_n$ . Si  $t$  est une équation locale pour  $Y$ , l'isomorphisme  $R^1 j_* \mathbb{Z}/n \simeq \mathbb{Z}/n(-1)_Y$  est défini par l'application  $a : \mathbb{Z}/n \rightarrow R^1 j_* \mu_n$  qui envoie 1 sur la classe du  $\mu_n$ -torseur des racines  $n$ -ièmes de  $t$ .

La question est de nature locale. Ceci permet de remplacer  $(X, Y)$  par un couple localement isomorphe, par exemple

$$\begin{array}{ccccc} \mathbb{A}_T^1 & \xrightarrow{j} & \mathbb{P}_T^1 & \xleftarrow{i} & T \\ & \searrow g & \downarrow f & \swarrow & \\ & & T & & \end{array}$$

avec  $T = \mathbb{A}_S^{n-1}$  et  $i$  = section à l'infini. Le corollaire (5.1.9) s'applique à  $g$ , et fournit  $R^q g_* \mathbb{Z}/n = \mathbb{Z}/n$  pour  $q = 0$ , 0 pour  $q > 0$ . Pour  $f$ , on a par ailleurs (4.6.2.1)

$$R^q f_* \mathbb{Z}/n = \mathbb{Z}/n, 0, \mathbb{Z}/n(-1), 0 \text{ pour } q > 2.$$

On vérifie facilement que  $j_* \mathbb{Z}/n = \mathbb{Z}/n$ , et que les  $R^q j_* \mathbb{Z}/n = 0$  sont concentrés sur  $i(T)$  pour  $q > 0$ . La suite spectrale de Leray  $E_2^{pq} = R^p f_* R^q j_* \mathbb{Z}/n \Rightarrow R^{p+q} g_* \mathbb{Z}/n$  se réduit donc à

$$\begin{array}{ccccccc} i^* R^q j_* \mathbb{Z}/n & & 0 & & \cdots & & \\ & & & & & & \\ i^* R^1 j_* \mathbb{Z}/n & & 0 & & \cdots & & \\ & \searrow d_2 & & & & & \\ \mathbb{Z}/n & & 0 & \rightarrow & \mathbb{Z}/n(-1) & \rightarrow & 0 \quad \cdots \end{array}$$

$R^q j_* \mathbb{Z}/n = 0$  pour  $q \geq 2$ , et  $R^1 j_* \mathbb{Z}/n$  est le prolongement par zéro d'un faisceau localement libre de rang un sur  $T$  (isomorphe, via  $d_2$ , à  $\mathbb{Z}/n(-1)$ ). L'application  $a$ , définie plus haut, étant injective (ainsi qu'on le vérifie fibre par fibre), c'est un isomorphisme, et ceci prouve (5.3.4).

### 5.3.5

Nous renvoyons à [AGV72, XVI.4,5] pour la démonstration des applications suivantes du théorème d'acyclicité (5.2.1).

**Théorème 5.3.6.** Soient  $f : X \rightarrow S$  un morphisme de schémas de type finie sur  $\mathbb{C}$  et  $\mathcal{F}$  un faisceau constructible sur  $X$ . Alors

$$(R^q f_* \mathcal{F})^{\text{an}} \sim R^q f_*^{\text{an}}(\mathcal{F}^{\text{an}})$$

(cf. 4.6.3 : en cohomologie ordinaire, il est nécessaire de supposer  $\mathcal{F}$  est constructible et non seulement de torsion).

**Théorème 5.3.7.** Soient  $f : X \rightarrow S$  un morphisme de schémas de type fini sur un corps  $k$  de caractéristique 0 et  $\mathcal{F}$  un faisceau constructible sur  $X$ . Alors, les  $R^q f_* \mathcal{F}$  sont également constructibles.

La preuve utilise la résolution des singularités et (5.3.4). Elle est généralisée au cas d'un morphisme de type fini de schémas excellents de caractéristique 0 dans [AGV72, XIX.5]. Une autre démonstration, indépendante de la résolution, est donnée dans ce volume (Théorèmes de finitude en cohomologie  $\ell$ -adique, 1.1) elle s'applique à un morphisme de schémas de type fini sur un corps ou sur un anneau de Dedekind.

## 6 Dualité de Poincaré

### 6.1 Introduction

Soit  $X$  un variété topologique orientée, purement de dimension  $N$ , et supposons que  $X$  admette un recouvrement ouvert fini  $\mathcal{U} = (U_i)_{1 \leq i \leq K}$ , tel que les intersections non vides d'ouverts  $U_i$  soient homéomorphes à des boules. Pour une telle variété, le théorème de dualité de Poincaré peut se présenter ainsi :

- A La cohomologie de  $X$  est la cohomologie de Čech correspondant au revêtement  $\mathcal{U}$ . C'est la cohomologie du complexe

$$0 \rightarrow \mathbb{Z}^{A_0} \rightarrow \mathbb{Z}^{A_1} \rightarrow \dots \quad (1)$$

où  $A_k = \{(i_0, \dots, i_k) : i_0 < \dots < i_k \text{ et } U_{i_0} \cap \dots \cap U_{i_k} \neq \emptyset\}$ .

- B Pour  $a \in A_k$ ,  $a = (i_0, \dots, i_k)$ , soit  $U_a = U_{i_0} \cap \dots \cap U_{i_k}$  et soit  $j_a$  l'inclusion de  $U_a$  dans  $X$ . Le faisceau constant  $\mathbb{Z}$  sur  $X$  admet la résolution (à gauche)

$$\begin{array}{ccccccc} \dots & \longrightarrow & \bigoplus_{a \in A_1} j_{a!} \mathbb{Z} & \longrightarrow & \bigoplus_{a \in A_0} j_{a!} \mathbb{Z} & \longrightarrow & 0 \\ & & & & \downarrow & & \\ & & & & \mathbb{Z} & & \end{array} \quad (2)$$

La cohomologie à support compact  $H_c^*(X, j_{a!} \mathbb{Z})$  n'est autre que la cohomologie à support propre de la boule (orientée)  $U_a$  :

$$H_c^i(X, j_{a!} \mathbb{Z}) = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq N \\ \mathbb{Z} & \text{si } i = N \end{cases}$$

La suite spectrale d'hypercohomologie, pour le complexe (2), et la cohomologie à support propre, affirme donc que  $H_c^i(X)$  est le  $(i - N)$ -ième groupe de cohomologie d'un complexe

$$\dots \rightarrow \mathbb{Z}^{A_1} \rightarrow \mathbb{Z}^{A_0} \rightarrow 0. \quad (3)$$

Ce complexe est le dual du complexe (1), d'où la dualité de Poincaré.

Les points essentiels de cette construction sont

- l'existence d'une théorie de cohomologie à support propre :
- le fait que tout point  $x$  d'une variété  $X$  purement de dimension  $N$  a un système fondamental de voisinages ouverts  $U$  pour lesquels

$$H_c^i(U) = \begin{cases} 0 & \text{pour } i \neq N, \\ \mathbb{Z} & \text{pour } i = N. \end{cases} \quad (4)$$

La dualité de Poincaré en cohomologie étale peut se construire sur ce modèle. Pour  $X$  lisse purement de dimension  $N$  sur  $k$  algébriquement clos,  $n$  inversible sur  $X$  et  $x$  un point fermé de  $X$ , le point clef est de calculer la limite projective, étendue aux voisinages étales  $U$  de  $x$

$$\varprojlim H_c^i(U, \mathbb{Z}/n) = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq 2N \\ \mathbb{Z}/n & \text{si } i = 2N. \end{cases} \quad (5)$$

De même que pour les variétés topologiques il faut d'abord traiter directement le cas d'une boule ouverte (voire simplement celui de l'intervalle  $(0, 1)$ ), ici il faut d'abord traiter directement le cas des courbes (6.2). Le théorème d'acyclicité locale des morphismes lisses permet ensuite de ramener (5) à ce cas particulier (6.3).

Les isomorphismes (4) et (5) ne sont pas canoniques : ils dépendent du choix d'une *orientation* de  $X$ . Pour  $n$  inversible sur un schéma  $X$ ,  $\mu_n$  est un faisceau de  $\mathbb{Z}/n$ -modules libres de rang un. On note  $\mathbb{Z}/n(N)$  sa puissance tensorielle  $N$ -ième ( $N \in \mathbb{Z}$ ). La forme intrinsèque de la deuxième ligne de (5) est

$$\varprojlim H_c^{2N}(U, \mathbb{Z}/n(N)) = \mathbb{Z}/n, \quad (6)$$

et  $\mathbb{Z}/n(N)$  s'appelle le *faisceau d'orientation* de  $X$  ; le faisceau  $\mathbb{Z}/n(N)$  étant constant, isomorphe à  $\mathbb{Z}/n$ , on peut le faire sortir du signe  $N$  et écrire plutôt

$$\varprojlim H_c^{2N}(U, \mathbb{Z}/n) = \mathbb{Z}/n(-N), \quad (7)$$

et la dualité de Poincaré prendra la forme d'une dualité parfaite, à valeurs dans  $\mathbb{Z}/n(-N)$ , entre  $H^i(X, \mathbb{Z}/n)$  et  $H_c^{2N-i}(X, \mathbb{Z}/n)$ .

## 6.2 Le cas des courbes

### 6.2.1

Soient  $\bar{X}$  une courbe projective et lisse sur  $k$  algébriquement clos, et  $n$  inversible sur  $\bar{X}$ . La preuve de (3.3.5) fournit, pour  $\bar{X}$  connexe, un isomorphisme canonique

$$H^2(\bar{X}, \mu_n) = \text{Pic}(\bar{X})/n \text{Pic}(\bar{X}) \xrightarrow[\sim]{\deg} \mathbb{Z}/n$$

Soient  $D$  un diviseur réduit de  $\bar{X}$  et  $X = \bar{X} \setminus D$

$$X \xhookrightarrow{j} \bar{X} \xleftarrow{i} D.$$

La suite exacte  $0 \rightarrow j_! \mu_n \rightarrow \mu_n \rightarrow i_* \mu_n \rightarrow 0$  et le fait que  $H^i(\bar{X}, i_* \mu_n) = H^i(D, \mu_n) = 0$  pour  $i > 0$  fournissent un isomorphisme

$$H_c^2(X, \mu_n) = H^2(\bar{X}, j_! \mu_n) \xrightarrow{\sim} H^2(\bar{X}, \mu_n) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}/n.$$

Pour  $\bar{X}$  disconnexe, on a de même

$$H_c^2(X, \mu_n) = (\mathbb{Z}/n)^{\pi_0(X)}$$

et on définit le *morphisme trace* comme la somme

$$\text{Tr} : H_c^2(X, \mu_n) \simeq (\mathbb{Z}/n)^{\pi_0(X)} \xrightarrow{\Sigma} \mathbb{Z}/n.$$

**Théorème 6.2.2.** *La forme  $\text{Tr}(a \smile b)$  identifie chacun des deux groupes  $H^i(X, \mathbb{Z}/n)$  et  $H_c^{2-i}(X, \mu_n)$  au dual (à valeurs dans  $\mathbb{Z}/n$ ) de l'autre.*

*Preuve transcendante.* Si  $\bar{X}$  est une courbe projective et lisse sur un trait  $S$ , et que  $j : X \hookrightarrow \bar{X}$  est l'inclusion du complémentaire d'un diviseur  $D$  étale sur  $S$ , les cohomologies (resp. les cohomologies à support propre) des fibres géométriques spéciales et génériques de  $X/S$  sont “les mêmes,” i.e. les fibres de faisceaux localement constants sur  $S$ . Ceci se déduit des faits analogues pour  $\bar{X}$  et  $D$ , via la suite exacte

$0 \rightarrow j_! \mathbb{Z}/n \rightarrow \mathbb{Z}/n \rightarrow \mathbb{Z}/n_D \rightarrow 0$  (pour la cohomologie à supports propres) et les formules  $j_* \mathbb{Z}/n = \mathbb{Z}/n$ ,  $R^1 j_* \mathbb{Z}/n \simeq \mathbb{Z}/n_D(-1)$ ,  $R^i j_* \mathbb{Z}/n = 0$  ( $i \geq 2$ ) (pour la cohomologie ordinaire) (5.3.4).

Ce principe de spécialisation ramène (6.2.2) au cas où  $k$  est de caractéristique 0. Par (5.3.3), ce cas se ramène à celui où  $k = \mathbb{C}$ . Enfin, pour  $k = \mathbb{C}$ , les groupes  $H^\bullet(X, \mathbb{Z}/n)$  et  $H_c^\bullet(X, \mu_n)$  coïncident avec les groupes de même nom, calculés pour l'espace topologique classique  $X_{\text{cl}}$  et, via l'isomorphisme  $\mathbb{Z}/n \rightarrow \mu_n : x \mapsto \exp\left(\frac{2\pi i x}{n}\right)$ , le morphisme trace s'identifie à "intégration sur la classe fondamentale," de sorte que (6.2.2) résulte de la dualité de Poincaré pour  $X_{\text{cl}}$ .

### 6.2.3 Preuve algébrique

Pour une preuve très économique, voir (Dualité, §2). En voici une autre, liée à l'autodualité de la jacobienne.

Reprenons les notations de (6.2.1). On peut supposer – et on suppose – que  $X$  est connexe. Les cas  $i = 0$  et  $i = 2$  étant triviaux, on suppose aussi que  $i = 1$ . Définissons  ${}_D \mathbb{G}_m$  par la suite exacte  $0 \rightarrow {}_D \mathbb{G}_m \rightarrow \mathbb{G}_m \rightarrow i_* \mathbb{G}_m \rightarrow 0$  (sections de  $\mathbb{G}_m$  congrues à 1 mod  $D$ ). Le groupe  $H^1(\bar{X}, {}_D \mathbb{G}_m)$  classe les faisceaux inversibles sur  $\bar{X}$  trivialisés sur  $D$ . C'est le groupe des points de  $\text{Pic}_D(\bar{X})$ , une extension de  $\mathbb{Z}$  (le degré) par le groupe des points d'une jacobienne généralisée de Rosenlicht (correspondant au conducteur 1 en chaque point de  $D$ )  $\text{Pic}_D^0(\bar{X})$ , elle-même extension de la variété abélienne  $\text{Pic}^0(\bar{X})$  par le tore  $\mathbb{G}_m^D/(\mathbb{G}_m \text{ diagonal})$ .

a) La suite exacte  $0 \rightarrow j_! \mu_n \rightarrow {}_D \mathbb{G}_m \xrightarrow{n} {}_D \mathbb{G}_m \rightarrow 0$  fournit un isomorphisme

$$H_c^1(X, \mu_n) = \text{Pic}_D^0(\bar{X})_n. \quad (6.2.3.1)$$

b) L'application qui à  $x \in X(k)$  associe la classe du faisceau inversible  $\mathcal{O}(x)$  sur  $\bar{X}$ , trivialisé par 1 sur  $D$ , provient d'un morphisme

$$f : X \rightarrow \text{Pic}_D(\bar{X}).$$

Pour la suite, on fixe un point base 0 et on pose  $f_0(x) = f(x) - f(0)$ . Pour tout homomorphisme  $v : \text{Pic}_D^0(\bar{X})_n \rightarrow \mathbb{Z}/n$ , soit  $\bar{v} \in H^1(\text{Pic}_D^0(\bar{X}), \mathbb{Z}/n)$  l'image par  $v$  de la classe dans  $H^1(\text{Pic}_D^0(\bar{X}), \text{Pic}_D^0(\bar{X})_n)$  du tore défini par l'extension

$$0 \longrightarrow \text{Pic}_D^0(\bar{X})_n \longrightarrow \text{Pic}_D^0(\bar{X}) \xrightarrow{n} \text{Pic}_D^0(\bar{X}) \longrightarrow 0$$

La théorie du corps de classes géométrique (telle qu'exposée dans Serre [Ser59]) montre que l'application  $v \mapsto f_0^*(\bar{v})$  :

$$\text{hom}(\text{Pic}_D^0(\bar{X})_n, \mathbb{Z}/n) \rightarrow H^1(X, \mathbb{Z}/n) \quad (6.2.3.2)$$

est un isomorphisme. Pour déduire (6.2.2) de (6.2.3.1) et (6.2.3.2), il reste à savoir que

$$\text{Tr}(u \smile f_0^*(\bar{v})) = -v(u). \quad (6.2.2.3)$$

## 6.3 Le cas général

Soient  $X$  un variété algébrique lisse et purement de dimension  $N$ , sur  $k$  algébriquement clos. Pour énoncer le théorème de dualité de Poincaré, il faut tout d'abord définir le morphisme trace

$$\text{Tr} : H_c^{2N}(X, \mathbb{Z}/n(N)) \rightarrow \mathbb{Z}/n.$$

La définition est un dévissage pénible à partir du cas des courbes [AGV72, XVIII §2]. On a alors

**Théorème 6.3.1.** *La forme  $\text{Tr}(a \smile b)$  identifie chacun des groupes  $H_c^i(X, \mathbb{Z}/n(N))$  et  $H^{2N-i}(X, \mathbb{Z}/n)$  au dual de l'autre.*

Soient  $x \in X$  un point fermé et  $X_x$  le localisé strict de  $X$  en  $x$ . Nous posons, pour  $U$  parcourant les voisinages étales de  $x$

$$H_c^\bullet(X_x, \mathbb{Z}/n) = \varprojlim H_c^\bullet(U, \mathbb{Z}/n). \quad (6.3.1.1)$$

Il serait préférable de considérer plutôt le pro-objet “ $\varprojlim$ ”  $H_c^\bullet(U, \mathbb{Z}/n)$  mais, les groupes en jeu étant finis, la différence est inessentielle. Comme on a tenté de l’expliquer dans l’introduction, (6.3.1) résulte de ce que

$$\begin{aligned} H_c^i(X_x, \mathbb{Z}/n) &= 0 \text{ pour } i \neq 2N \text{ et que} \\ \text{Tr} : H_c^{2N}(X_x, \mathbb{Z}/n(N)) &\xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}/n \text{ est un isomorphisme.} \end{aligned} \quad (6.3.1.2)$$

Le cas où  $N = 0$  est trivial. Si  $N > 0$ , soit  $Y_y$  le localisé strict en un point fermé d’un schéma  $Y$  lisse purement de dimension  $N - 1$ , et soit  $f : X_x \rightarrow Y_y$  un morphisme essentiellement lisse (de dimension relative un). La démonstration utilise la suite spectrale de Leray en cohomologie à support propre pour  $f$ , pour se ramener au cas des courbes. Les “cohomologie à support propre” considérées étant définies comme des limites (6.3.1.1), l’existence d’une telle suite spectrale pose divers problèmes de passage à la limite, traités avec trop de détails dans [AGV72, XVIII]. Pour tout point géométrique  $z$  de  $Y_y$ , on a

$$(R^i f_! \mathbb{Z}/n)_z = H_c^i(f^{-1}(z), \mathbb{Z}/n).$$

La fibre géométrique  $f^{-1}(z)$  est une limite projective de courbes lisses sur un corps algébriquement clos. Elle vérifie la dualité de Poincaré. Sa cohomologie ordinaire est donnée par le théorème d’acyclicité locale pour les morphismes lisses :

$$H^i(f^{-1}(z), \mathbb{Z}/n) = \begin{cases} \mathbb{Z}/n & \text{pour } i = 0 \\ 0 & \text{pour } i > 0. \end{cases}$$

Par dualité, on a

$$H_c^i(f^{-1}(z), \mathbb{Z}/n) = \begin{cases} \mathbb{Z}/n(-1) & \text{pour } i = 2 \\ 0 & \text{pour } i \neq 2. \end{cases}$$

et la suite spectrale de Leray s’écrit

$$H_c^i(X_x, \mathbb{Z}/n(N)) = H_c^{i-2}(Y_y, \mathbb{Z}/n(N-1)).$$

On conclut par récurrence sur  $N$ .

## 6.4 Variantes et applications

On peut construire, en cohomologie étale, un “formalisme de dualité” (= des foncteurs  $Rf_!$ ,  $Rf_*$ ,  $Rf^!$  satisfaisant diverses compatibilités et formules d’adjonction) parallèle à celui qui existe en cohomologie cohérente. Dans ce langage, les résultats du paragraphe précédents se transcrivent comme suit : si  $f : X \rightarrow S$  est lisse et purement de dimension relative  $N$ , et que  $S = \text{Spec}(k)$ , avec  $k$  algébriquement clos, alors

$$Rf^! \mathbb{Z}/n = \mathbb{Z}/n[2N](N).$$

Ce résultat vaut sans hypothèse sur  $S$ . Il admet le

**Corollaire 6.4.1.** *Si  $f$  est lisse et purement de dimension relative  $N$ , et que les faisceaux  $R^i f_! \mathbb{Z}/n$  sont localement constants, alors les faisceaux  $R^i f_* \mathbb{Z}/n$  sont aussi localement constants, et*

$$R^i f_* \mathbb{Z}/n = \underline{\text{hom}}(R^{2N-i} f_! \mathbb{Z}/n(N), \mathbb{Z}/n).$$

En particulier, sous les hypothèses du corollaire, les faisceaux  $R^i f_* \mathbb{Z}/n$  sont constructibles. Partant de là, on peut montrer que, si  $S$  est de type fini sur le spectre d’un corps ou d’un anneau de Dedekind, alors, pour tout morphisme de type fini  $f : X \rightarrow S$  et tout faisceau constructible  $\mathcal{F}$  sur  $X$ , les faisceaux  $R^i f_* \mathcal{F}$  sont constructibles (Théorèmes de finitude en cohomologie  $\ell$ -adique, 1.1).

# Chapitre 2

## Rapport sur la formule des traces

Dans ce texte, j'ai tenté d'exposer de façon aussi directe que possible la théorie cohomologique de Grothendieck des fonctions  $L$ . Je suis de très près certains des exposés donnés par Grothendieck à l'IHES au printemps 1966. Dans l'esprit de ce volume, il ne sera pas fait appel à SGA 5 – sauf deux références à des passages de l'exposé XI, indépendant du reste de ce séminaire.

Dans le §10 (p.81-90) de [Del73], le lecteur trouvera un résumé de la théorie, dans le cas crucial des courbes.

### 1 Quelques rappels

#### 1.1 Notations

$p, q, \mathbb{F}, \mathbb{F}_q$  :  $p$  est un nombre premier,  $q = p^f$  une puissance de  $p$  et  $\mathbb{F}$  un clôture algébrique du corps premier  $\mathbb{F}_p$ . Pour toute puissance  $p^n$  de  $p$ , on note  $\mathbb{F}_{p^n}$  le sous-corps à  $p^n$  éléments de  $\mathbb{F}$ .

$X_0, X$  : On désignera souvent par un symbole affecté d'un indice 0 un objet sur  $\mathbb{F}_q$ . Le même symbole, sans 0, désigne alors l'objet qui s'en déduit par extension des scalaires à  $\mathbb{F}$ . Par exemple, si  $\mathcal{F}_0$  est un faisceau sur un schéma  $X_0$  sur  $\mathbb{F}_q$ , on note  $\mathcal{F}$  son image réciproque sur  $X = X_0 \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}$ .

$F$  : Si  $X_0$  est un schéma sur  $\mathbb{F}_q$ , on appelle *morphisme de Frobenius* et on note  $F$  l'endomorphisme de  $X_0$  qui “envoie le point de coordonnées  $x$  dans celui de coordonnées  $x^q$ ” : c'est l'identité sur l'espace topologique sous-jacent et, pour  $x$  une section locale du faisceau structurel,  $F^*x = x^q$ .

On désigne encore par  $F$  l'endomorphisme de  $X$  qui s'en déduit par extension des scalaires. Sur l'ensemble  $X(\mathbb{F}) = X_0(\mathbb{F})$  des points rationnels de  $X$ ,  $F$  agit comme la substitution de Frobenius  $\varphi \in \text{Gal}(\mathbb{F}/\mathbb{F}_q)$  définie par  $\varphi(x) = x^q$ . En particulier,  $X^F = X_0(\mathbb{F}_q)$ .

En cas d'ambiguïté, on écrira  $F_{(q)}$  plutôt que  $F$ .

#### 1.2 Correspondance de Frobenius

Soient  $X_0$  un schéma sur  $\mathbb{F}_q$ , et  $\mathcal{F}_0$  un faisceau sur  $X_0$ . J'aime voir comme suit la *correspondance de Frobenius* (un  $F$ -endomorphisme de  $\mathcal{F}_0$ ) :

$$F^* : F^* \mathcal{F}_0 \xrightarrow{\sim} \mathcal{F}_0 \quad (1.2.1)$$

On regarde  $\mathcal{F}_0$  comme le faisceau des sections locales d'un espace  $[\mathcal{F}_0]$  étale sur  $X_0$  ( $[\mathcal{F}_0]$  est un espace algébrique au sens de M. Artin). La fonctorialité de  $F$  fournit un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc} [\mathcal{F}_0] & \xrightarrow{F} & [\mathcal{F}_0] \\ \downarrow & & \downarrow \\ X_0 & \xrightarrow{F} & X_0 \end{array}$$



Parce que  $[\mathcal{F}_0]$  est étale sur  $X_0$ , ce diagramme est cartésien ; il fournit un isomorphisme  $[\mathcal{F}_0] \xrightarrow{\sim} F^*[\mathcal{F}_0]$  d'inverse (1.2.1). On note encore  $F^*$  les correspondances ou morphismes déduits de  $F$  par extension des scalaires ou par fonctorialité, tels  $F^* : H_c^\bullet(X, \mathcal{F}) \rightarrow H_c^\bullet(X, \mathcal{F})$ .

Pour une définition en forme, je renvoie à [Gro66, XI.1.2]. On n'y considère que le cas où  $q = p$ , mais le cas général se traite de même.

### 1.3

La correspondance de Frobenius est fonctorielle en  $(X_0, \mathcal{F}_0)$ . Si  $f_0 : X_0 \rightarrow Y_0$  est un morphisme de  $\mathbb{F}_q$ -schémas,  $\mathcal{F}_0$  un faisceau sur  $X_0$ ,  $\mathcal{G}_0$  un faisceau sur  $Y_0$  et  $u \in \text{hom}(f_0^* \mathcal{G}_0, \mathcal{F}_0)$  un  $f_0$ -morphisme de  $\mathcal{G}_0$  dans  $\mathcal{F}_0$ , on a un diagramme commutatif d'espaces  $f_0 F = F f_0$ , et au-dessus un diagramme commutatif de faisceaux

$$\begin{array}{ccc} X_0 & \xrightarrow{f_0} & Y_0 \\ \downarrow F & & \downarrow F \\ X_0 & \xrightarrow{f_0} & Y_0 \end{array} \quad \begin{array}{ccc} \mathcal{F}_0 & \xleftarrow{u} & \mathcal{G}_0 \\ \uparrow F^* & & \uparrow F^* \\ \mathcal{F}_0 & \xleftarrow{\quad} & \mathcal{G}_0 \end{array}$$

En particulier, la correspondance sur  $f_{0*} \mathcal{F}_0$  déduite la correspondance de Frobenius de  $(X_0, \mathcal{F}_0)$  est la correspondance de Frobenius de  $(Y_0, f_{0*} \mathcal{F}_0)$ .

### 1.4

Le morphisme naturel  $Y \rightarrow Y_0$  est limite de morphismes étales. Il en résulte que pour tout faisceau abélien  $\mathcal{F}_0$  sur  $X_0$ , les images réciproques sur  $Y$  des  $R^i f_{0*} \mathcal{F}_0$  sont les  $R^i f_* \mathcal{F}$ .

Sur  $R^i f_* \mathcal{F}$ , on dispose de

- a) la correspondance  $F^* R^i f_* \mathcal{F} \xrightarrow{\sim} R^i f_* \mathcal{F} \xrightarrow{F^*} R^i f_* \mathcal{F}$  déduite par fonctorialité de la correspondance Frobenius ;
- b) la correspondance  $F^* R^i f_* \mathcal{F} \rightarrow R^i f_* \mathcal{F}$  image réciproque sur  $Y$  de la correspondance de Frobenius sur  $R^i f_{0*} \mathcal{F}_0$ .

On déduit de (1.3) que ces correspondances coïncident. Elles induisent la terme initial d'une action de Frobenius sur toute la suite spectrale

$$H^p(Y, R^q f_* \mathcal{F}) \rightarrow H^{p+q}(X, \mathcal{F}).$$

De même en cohomologie à support propre, et pour la suite spectrale

$$H_c^p(Y, R^q f_* \mathcal{F}) \rightarrow H_c^{p+q}(X, \mathcal{F})$$

### 1.5 Changement de corps fini

Soient  $(X_0, \mathcal{F}_0)$  sur  $\mathbb{F}_q$ ,  $n$  un entier, et  $(X_1, \mathcal{F}_1)$  sur  $\mathbb{F}_{q^n}$  déduit de  $(X_0, \mathcal{F}_0)$  par extension des scalaires. On dispose d'une part de la correspondance de Frobenius  $F_{(q)} : X_0 \rightarrow X_0$ ,  $F_{(q)}^* : F_{(q)}^* \mathcal{F}_0 \rightarrow \mathcal{F}_0$ , d'autre part de  $F_{(q^n)} : X_1 \rightarrow X_1$ ,  $F_{(q^n)}^* : F_{(q^n)}^* \mathcal{F}_1 \rightarrow \mathcal{F}_1$ . On vérifie facilement que  $F_{(q^n)}$  se déduit de la puissance  $n$ -ième de  $F_{(q)}$  par extension des scalaires de  $\mathbb{F}_q$  à  $\mathbb{F}_{q^n}$  ; après extension des scalaires à  $\mathbb{F}$ , on a encore la même identité  $F_{(q^n)} = F_{(q)}^n$  entre endomorphismes de  $X$  et correspondances sur  $X$ .

Si  $x$  est un point fermé de  $X_0$ , avec  $[k(x), \mathbb{F}_q] = n$ , et que  $\bar{x} \in X_0(\mathbb{F}) = X(\mathbb{F})$  est localisé en  $x$ ,  $\bar{x}$  est un point fixe de  $F_{(q^n)} = F_{(q)}^n$ . On note  $F_x^*$  l'endomorphisme de  $\mathcal{F}_{\bar{x}}$  induit par  $F_{(q^n)}^*$ . A isomorphisme près,  $(F_{\bar{x}}^*, \mathcal{F}_{\bar{x}})$  ne dépend pas du choix de  $\bar{x}$ . La trace, etc. de  $F_x^*$  se désigne par une notation telle que  $\text{Tr}(F_x^*, \mathcal{F})$ .

### 1.6 Fonction $L$

Soit  $X_0$  un schéma de type fini sur  $\mathbb{F}_q$ . On note  $|X_0|$  l'ensemble de ses points fermés et, pour  $x \in |X_0|$ , on pose  $\deg(x) = [k(x), \mathbb{F}_p]$ . Si  $\mathcal{F}_0$  est un  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceau sur  $X_0$  (pour cette notion, voir ci-dessous) – ou un

faisceau constructible et plat de modules sur un anneau noethérien commutatif  $A$ , on note  $L(X_0, \mathcal{F}_0)$  la série formelle de terme constant 1, dans  $\mathbb{Q}_\ell[[t]]$  ou dans  $A[[t]]$ ,

$$L(X_0, \mathcal{F}_0) = \prod_{x \in |X_0|} \det \left( 1 - F_x^* t^{\deg(x)}, \mathcal{F} \right)^{-1}.$$

## 1.7 Remarque

Dans la définition (1.6), on a  $\deg(x) = [k(x), \mathbb{F}_p]$  (degré absolu) et non  $\deg(x) = [k(x), \mathbb{F}_q]$  (degré relatif à  $\mathbb{F}_q$ ). Ceci à pour effet que  $L(X_0, \mathcal{F}_0)$  ne dépend que du schéma  $X_0$  et du faisceau  $\mathcal{F}_0$ , non de  $q$  et du morphisme structurel  $X_0 \rightarrow \text{Spec}(\mathbb{F}_q)$ . L'indéterminée  $t$  est un avatar de  $p^{-s}$ .

## 1.8 Le point de vue galoisien

Ce n° ne sera pas utilisé dans la suite du rapport. Pour  $\mathcal{F}_0$  un faisceau abélien sur  $X_0$ , le groupe de Galois  $\text{Gal}(\mathbb{F}/\mathbb{F}_q)$  agit sur  $\mathbb{F}$ , et par transport de structure sur  $H_c^i(X, \mathcal{F})$ . En particulier, la substitution de Frobenius  $\varphi$  (1.1) induit un automorphisme, encore noté  $\varphi$ , de  $H_c^i(X, \mathcal{F})$ . La correspondance de Frobenius définit de son côté un endomorphisme  $F^*$  de  $H_c^i(X, \mathcal{F})$ . On a

$$F^{*-1} = \varphi \quad (\text{sur } H_c^i(X, \mathcal{F})). \quad (1.8.1)$$

Pour le voir, appliquons (1.4) au cas où  $Y_0$  est un point :  $Y_0 = \text{Spec}(\mathbb{F}_q)$ . On trouve que  $H_c^i(X, \mathcal{F})$  est la fibre, au point géométrique  $\text{Spec}(\mathbb{F})$  de  $Y_0$ , de  $R^i f_{!} \mathcal{F}_0$ , et que  $F^*$  est la fibre de la correspondance de Frobenius de  $R^i f_{!} \mathcal{F}_0$ . Soit  $[R^i f_{!} \mathcal{F}_0]$  comme en (1.2). On a  $H_c^i(X, \mathcal{F}) = [R^i f_{!} \mathcal{F}_0](\mathbb{F})$  et

- a)  $\varphi$  agit par transport de structure, via son action sur  $\mathbb{F}$ ,
- b)  $F^*$  est l'inverse de  $F : [R^i f_{!} \mathcal{F}_0](\mathbb{F}) \rightarrow [R^i f_{!} \mathcal{F}_0](\mathbb{F})$ .

On conclut par l'identité  $F = \varphi$  de (1.1).

Un des intérêts du point de vue galoisien est qu'il permet de raisonner par transport de structure.

## 2 $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux

La notion de  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux est développée en détail dans [Gro66, V, VI]. Nous n'utiliserons que les définitions et résultats ci-dessous.

**Définition 2.1.** Soit  $X$  un schéma noethérien. Un  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau  $\mathcal{F}$  sur  $X$  est un système projectif de faisceaux  $\mathcal{F}_n$  ( $n \geq 0$ ), avec  $\mathcal{F}_n$  un faisceau de  $\mathbb{Z}/\ell^{n+1}$ -modules constructibles [AGV72, IX.2], et tel que le morphisme de transition  $\mathcal{F}_n \rightarrow \mathcal{F}_{n-1}$  se factorise par un isomorphe

$$\mathcal{F}_n \otimes_{\mathbb{Z}/\ell^{n+1}} \mathbb{Z}/\ell^n \xrightarrow{\sim} \mathcal{F}_{n-1}.$$

On dit que  $\mathcal{F}$  est lisse si les  $\mathcal{F}_n$  sont localement constants.

La terminologie de [Gro66] est différents, on y dit “ $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau constructible” pour “ $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau,” et “constant tordu constructible” pour “lisse.”

De même, ci-dessous, pour les  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux.

### 2.2

Si  $k$  est un corps séparablement clos, un faisceau de  $\mathbb{Z}/\ell^n$ -modules sur  $\text{Spec}(k)$  s'identifie à un  $\mathbb{Z}/\ell^n$ -module, et le foncteur  $\mathcal{F} \mapsto \varprojlim \mathcal{F}_n$  identifie les  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceaux sur  $\text{Spec}(k)$  aux  $\mathbb{Z}_\ell$ -modules de type fini. Ceci justifie la définition suivante : la fibre du  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau  $\mathcal{F}$  en le point géométrique  $x$  de  $X$  est le  $\mathbb{Z}_\ell$ -module  $\varprojlim (\mathcal{F}_n)_x$ .

### 2.3

Supposons  $X$  connexe, et soit  $x$  un point géométrique de  $X$ . On sait que le foncteur “fibre en  $x$ ” est une équivalence de la catégorie des faisceaux localement constants constructibles de  $\mathbb{Z}/\ell^n$ -modules avec la catégorie des  $\mathbb{Z}/\ell^n$ -modules de type fini munis d’une action continue de  $\pi_1(X, x)$ . Par passage à la limite, on en déduit la proposition suivante.

**Proposition 2.4.** *Sous les hypothèses ci-dessus, le foncteur “fibre en  $x$ ” est une équivalence de la catégorie des  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceaux lisse sur  $X$  avec celle des  $\mathbb{Z}_\ell$ -modules de type fini munis d’une action continue de  $\pi_1(X, x)$ .*

**Proposition 2.5.** *Soit  $\mathcal{F}$  un  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau sur un schéma noethérien  $X$ . Il existe une partition finie de  $X$  en parties localement fermées  $X_i$  telles que les  $\mathcal{F}|_{X_i}$  soient lisses.*

Posons  $\mathrm{gr}_\ell^n \mathcal{F} = \ell^n \mathcal{F}_m / \ell^{n+1} \mathcal{F}_m$  pour  $m \geq n$ , et  $\mathrm{gr}_\ell \mathcal{F} = \bigoplus \mathrm{gr}_\ell^n \mathcal{F}$ . C’est un faisceau de modules sur l’anneau noethérien  $\mathrm{gr}_\ell \mathbb{Z} = \mathbb{Z}/\ell[t]$ , gradué de  $\mathbb{Z}$  pour la filtration  $\ell$ -adique. C’est un quotient de  $\mathrm{gr}_\ell^0 \mathcal{F} \otimes_{\mathbb{Z}/\ell} \mathbb{Z}/\ell[t]$ , donc un faisceau de  $\mathrm{gr}_\ell \mathbb{Z}$ -modules constructible [AGV72, IX.2]. et il existe une partition finie de  $X$  en parties localement fermées  $X_i$ , telle que  $\mathrm{gr}_\ell \mathcal{F}|_{X_i}$  sont localement constant. Chacun des faisceaux  $\mathrm{gr}_\ell^n \mathcal{F}|_{X_i}$  est alors localement constant ainsi que les  $\mathcal{F}_m|_{X_i}$ , qui en sont des extensions successives.

### 2.6

Si  $\mathcal{F}$  et  $\mathcal{G}$  sont deux  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceaux sur  $X$ , on pose  $\mathrm{hom}(\mathcal{F}, \mathcal{G}) = \varprojlim \mathrm{hom}(\mathcal{F}_n, \mathcal{G}_n)$ ; c’est un  $\mathbb{Z}_\ell$ -module. Puisque  $\mathrm{hom}(\mathcal{F}_n, \mathcal{G}_n) = \mathrm{hom}(\mathcal{F}_m, \mathcal{G}_n)$  pour  $m \geq n$ , on a encore

$$\mathrm{hom}(\mathcal{F}, \mathcal{G}) = \varprojlim_n \varinjlim_m \mathrm{hom}(\mathcal{F}_m, \mathcal{G}_n),$$

de sorte que le foncteur  $\mathcal{F} \mapsto \varprojlim \mathcal{F}_n$  est pleinement fidèle, de la catégorie des  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceaux dans celle pro-faisceaux sur  $X$  (= pro-objets de la catégorie des faisceaux sur  $X$ ). On l’utilisera pour identifier les  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceaux à certains pro-faisceaux (ceux tels que chaque  $\mathcal{F}_n = \mathcal{F}/\ell^{n+1} \mathcal{F}$  soit un faisceau, et que  $\mathcal{F} \xrightarrow{\sim} \varprojlim \mathcal{F}_n$ ). On vérifie aisément que si  $\mathcal{F} = \varprojlim \mathcal{F}_n$ , avec  $\mathcal{F}_n$  un faisceau constructible de  $\mathbb{Z}/\ell^n$ -modules, pour que  $\mathcal{F}$  soit un  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau, il faut et il suffit que les systèmes projectifs (en  $n$ )  $\mathcal{F}_n/\ell^{k+1} \mathcal{F}_n$  soient essentiellement constants : le système projectif des  $\mathcal{F}'_k = \varprojlim_n \mathcal{F}_n/\ell^{k+1} \mathcal{F}_n$  vérifie alors les conditions de (2.1), et  $\mathcal{F} = \varprojlim \mathcal{F}'_k$ .

Dans ce qui suit, nous abandonnons la notation  $\mathcal{F}_n$  de (2.1); si  $\mathcal{F}$  est un  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau, le faisceau  $\mathcal{F}_n$  de (2.1) sera noté  $\mathcal{F} \otimes \mathbb{Z}/\ell^{n+1}$ .

### 2.7

Dans la catégorie abélienne des pro-faisceaux, la sous-catégorie épaisse des  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceaux est stable par noyau, conoyau et extension. C’est claire pour les conoyaux. Pour les noyaux, si  $f : \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{G}$  est un morphisme de  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceaux, on déduit aisément de (2.4, 2.5) et de Artin-Rees que le système projectif des  $\ker(f : \mathcal{F} \otimes \mathbb{Z}/\ell^n \rightarrow \mathcal{G} \otimes \mathbb{Z}/\ell^n)$  vérifie le critère donné et (2.6) ci-dessus. Il existe même un entier  $r$  tel que pour tout  $n$

$$\ker(f) \otimes \mathbb{Z}/\ell^n = \ker(f : \mathcal{F} \otimes \mathbb{Z}/\ell^{n+r} \rightarrow \mathcal{G} \otimes \mathbb{Z}/\ell^{n+r}) \otimes \mathbb{Z}/\ell^n.$$

Le cas des extensions est laissé au lecteur.

### 2.8

Un  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau  $\mathcal{F}$  est *sans torsion* si  $\ker(\ell : \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{F}) = 0$ . Chaque  $\mathcal{F} \otimes \mathbb{Z}/\ell^n$  est alors plat sur  $\mathbb{Z}/\ell^n$  (i.e. à fibres des  $\mathbb{Z}/\ell^n$ -modules libres de type fini). On déduit de (2.4, 2.5) que pour tout  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau  $\mathcal{F}$  il existe un entier  $n$  tel que  $\mathcal{F}/\ker(\ell^n)$  soit sans torsion.

## 2.9

La catégorie abélienne des  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux sur  $X$  est le quotient de celle des  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceaux par la sous-catégorie de  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceaux de torsion. En termes équivalents, ses objets sont les  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceaux et, notant  $\mathcal{F} \otimes \mathbb{Q}_\ell$  le  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux  $\mathcal{F}$ , vu comme objet de la catégorie des  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux, on a

$$\mathrm{hom}(\mathcal{F} \otimes \mathbb{Q}_\ell, \mathcal{G} \otimes \mathbb{Q}_\ell) = \mathrm{hom}(\mathcal{F}, \mathcal{G}) \otimes_{\mathbb{Z}_\ell} \mathbb{Q}_\ell.$$

La fibre d'un  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceau  $\mathcal{F} \otimes \mathbb{Q}_\ell$  en un point géométrique  $x$  de  $X$  est le  $\mathbb{Q}_\ell$ -espace vectoriel de dimension finie  $\mathcal{F}_x \otimes_{\mathbb{Z}_\ell} \mathbb{Q}_\ell$ .

## 2.10

Soient  $X$  un schéma séparé de type fini sur un corps algébriquement clos  $k$  et  $\mathcal{F}$  un  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceau constructible sur  $X$ . Soit  $\mathcal{F}'$  un  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau constructible tel que  $\mathcal{F} \sim \mathcal{F}' \otimes_{\mathbb{Z}_\ell} \mathbb{Q}_\ell$ . Nous verrons en (4.11) que

$$\left( \varprojlim H_c^q(X, \mathcal{F}' \otimes \mathbb{Z}/\ell^n) \right) \otimes_{\mathbb{Z}_\ell} \mathbb{Q}_\ell$$

est un  $\mathbb{Q}_\ell$ -espace vectoriel de dimension finie. Il ne dépend que de  $\mathcal{F}'$ , et se note  $H_c^q(X, \mathcal{F})$ . La preuve n'utilise pas que  $\ell$  soit premier à la caractéristique, mais seul ce cas nous intéresse.

## 2.11

Dans cet exposé, tous les calculs importants se feront au niveau des  $\mathbb{Z}/\ell^n$ -faisceaux, le passage aux  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux ne se faisant qu'en tout dernier lieu. En pratique, il est toutefois souvent commode de travailler systématiquement avec des  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux. Dans les exposés V et VI de [Gro66], Jouanolou donne le formalisme qui rend cela possible. Un des résultats essentiels (VI 2.2) est que si  $f : X \rightarrow Y$  est un morphisme séparé de type fini de schémas noethériens, et  $\mathcal{F}$  un  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau sur  $Y$ , alors, pour chaque  $q$ , le pro-faisceau " $\varprojlim R^q f_! (\mathcal{F} \otimes \mathbb{Z}/\ell^n)$ " est un  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau sur  $Y$ . Il démontre même une propriété de régularité plus forte (à la Artin-Rees) pour le système projectif des  $R^q f_! (\mathcal{F} \otimes \mathbb{Z}/\ell^n)$ .

Jouanolou se place même dans un cadre plus général, englobant le cas très utile des  $E_\lambda$ -faisceau, pour  $E_\lambda$  une extension finie de  $\mathbb{Q}_\ell$ . Ils sont définis comme l'ont été les  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux, avec  $\mathbb{Q}_\ell$  remplacé par  $E_\lambda$ ,  $\mathbb{Z}_\ell$  par l'anneau  $\mathcal{O}_\lambda$  de la valuation  $\lambda$  et  $\mathbb{Z}/\ell^n$  par  $\mathcal{O}_\lambda/\pi^n$ , pour  $\pi$  une uniformisante. Il reviendrait au même de définir un  $E_\lambda$ -faisceau comme un  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceau  $\mathcal{F}$ , muni d'une homomorphisme  $E_\lambda \rightarrow \mathrm{End}(\mathcal{F})$ .

## 3 Formule des traces et fonctions $L$

On utilise les notations du §1, et  $\ell$  est un nombre premier  $\neq p$ .

Soient  $X_0$  un schéma séparé de type fini sur  $\mathbb{F}_q$  ( $q = p^f$ ) et  $\mathcal{F}_0$  un  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceau constructible sur  $X_0$ . L'interprétation cohomologique de Grothendieck des fonctions  $L$  est le théorème suivant :

**Théorème 3.1.**  $L(X_0, \mathcal{F}_0) = \prod_i \det(1 - F^* t^f, H_c^i(X, \mathcal{F}))^{(-1)^{i+1}}$ .

Il est obtenu comme conséquence de la formule des traces :

**Théorème 3.2.** Pour tout entier  $n$ ,  $\sum_{x \in X^{F^n}} \mathrm{Tr}(F^{n*}, \mathcal{F}_x) = \sum_i (-1)^i \mathrm{Tr}(F^{n*}, H_c^i(X, \mathcal{F}))$ .

Rappelons brièvement la méthode classique pour déduire (3.1) de (3.2). Posons  $T = t^f$  ; les deux membres sont des séries formelles en  $T$ , de terme constant 1. Puisque  $\mathbb{Q}_\ell$  est de caractéristique 0, il suffit de prouver que les dérivées logarithmiques  $T \frac{d}{dT} \log$  des deux membres sont égales.

Pour calculer ces dérivées logarithmiques, nous utiliserons la formule

$$T \frac{d}{dT} \log \det(1 - fT)^{-1} = \sum_{n>0} \mathrm{Tr}(f^n) T^n,$$

dont la démonstration (dans un cadre un peu plus général) est rappelée ci-dessous. Au premier nombre, on trouva

$$\begin{aligned} T \frac{d}{dT} \log L(X_0, \mathcal{F}_0) &= \sum_{x \in |X_0|} \sum_n [k(x) : \mathbb{F}_q] \operatorname{Tr}(F_x^n, \mathcal{F}) T^{n \cdot [k(x) : \mathbb{F}_q]} \\ &= \sum_{n > 0} T^n \sum_{x \in X^{F^n}} \operatorname{Tr}(F^{n*}, \mathcal{F}_x) \end{aligned}$$

et su second membre

$$\sum_{n > 0} T^n \sum (-1)^i \operatorname{Tr}(F^{n*}, H_c^i(X, \mathcal{F})) ;$$

on compare terme à terme.

**Proposition 3.3.** *Soient  $A$  un anneau commutatif,  $M$  un  $A$ -module projectif de type fini et  $f$  un endomorphisme de  $M$ . Pour tout série formelle inversible  $Q$ , on pose  $\frac{d}{dT} \log Q = Q^{-1} \frac{d}{dT} Q$ . On a*

$$T \frac{d}{dT} \log \det(1 - fT)^{-1} = \sum_{n > 0} \operatorname{Tr}(f^n) T^n. \quad (3.3.1)$$

Soit  $M'$  un  $A$ -module tel que  $M \oplus M'$  soit libre de rang fini. Remplacer  $(M, f)$  par  $(M \oplus M', f \oplus 0)$  ne change pas les deux membres de (3.3), et nous ramène au cas où  $M$  est libre. Pour  $M = A^d$ , (3.3.1) est une identité algébrique portant sur les coefficients  $f_i^j$  de  $f$ . Par le principe de prolongement des identités algébriques, il suffit de la vérifier pour  $A$  un corps algébriquement clos de caractéristique 0. Les deux membres étant additifs en  $M$  dans une extension  $0 \rightarrow M' \rightarrow M \rightarrow M'' \rightarrow 0$ , il suffit même de ne traiter que le cas où  $M$  est de rang 1. Si  $f$  est la multiplication par  $a$ , (3.3.1) se réduit alors à la formule

$$T \frac{d}{dT} \log ((1 - aT)^{-1}) = \sum_{n > 0} a^n T^n.$$

**Corollaire 3.4.** *Soient  $n$  un entier, et  $f^{(n)}$  l'endomorphisme  $(x_1, \dots, x_n) \mapsto (f(x_n), x_1, \dots, x_{n-1})$  de  $M^n$ . On a*

$$\det(1 - fT^n) = \det(1 - f^{(n)}T). \quad (3.4.1)$$

Procédant comme en (3.3), on se ramène à supposer que  $A$  est de caractéristique 0. Il suffit alors de vérifier que les dérivées logarithmiques  $-T \frac{d}{dT} \log$  des deux membres sont égales.

$$\begin{aligned} -T \frac{d}{dT} \log \det(1 - fT^n) &= -nT^n \frac{d}{dT^n} \log \det(1 - fT^n) = n \sum_{m > 0} \operatorname{Tr}(f^m) T^{nm}, \\ -T \frac{d}{dT} \log \det(1 - f^{(n)}T) &= \sum_{m > 0} \operatorname{Tr}(f^{(n)m}) T^m, \end{aligned}$$

et on observe que

$$\begin{aligned} \operatorname{Tr}(f^{(n)m}) &= 0 \quad \text{si } n \nmid m \\ \operatorname{Tr}(f^{(n)nm}) &= n \operatorname{Tr}(f^m). \end{aligned}$$

### 3.5 Remarque

Pour  $A = \mathbb{Q}_\ell$ , (3.4.1) est le cas particulier  $X_0 = \operatorname{Spec}(\mathbb{F}_{q^n})$  de (3.1). Utilisant cette identité, il est facile de vérifier directement que le second membre de (3.1) est indépendant de  $q$ , et du morphisme structural  $X_0 \rightarrow \operatorname{Spec}(\mathbb{F}_q)$ .

### 3.6 Remarque

Si  $j : X_0 \hookrightarrow \bar{X}_0$  est une compactification de  $X_0$ , on a  $L(X_0, \mathcal{F}_0) = L(\bar{X}_0, j_! \mathcal{F}_0)$  et  $H_c^i(X, \mathcal{F}) = H^i(\bar{X}, j_! \mathcal{F})$ . Ceci ramène (3.1) au cas propre, et explique l'usage de la cohomologie à supports propres. Pour  $X$  propre, (3.2) a la forme d'une formule des traces de Lefschetz. On notera que les termes locaux  $\text{Tr}(F^{n*}, \mathcal{F}_x)$  ( $x \in X^{F^n}$ ) ne dépendent que de la fibre de  $\mathcal{F}$  en  $x$ , et ne sont pas affectés de multiplicité. Pour  $X$  et  $\mathcal{F}$  lisses, cela correspond au fait que le graphe de  $F$  est transverse à la diagonale (puisque  $dF = 0$ ).

### 3.7 Remarque

Si on admet le formalisme de  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux (cf. 2.11 ; il faut disposer de la suite spectrale de Leray et du théorème de changement de base pour les images directes supérieures  $R^q f_!$ ), il est facile de ramener la preuve de (3.1, 3.2), au cas où  $X_0$  est une courbe lisse et où  $\mathcal{F}_0$  est lisse. Ceci est clairement expliqué dans [Gro95, §5] (pour 3.1 ; 3.2 se traite de même).

### 3.8

On dispose de deux méthodes pour prouver (3.2).

**Lefschetz-Verdier** Si  $X_0$  est propre (cf. 3.6), la formule des traces générale de Lefschetz-Verdier permet d'exprimer le second membre de (3.2) comme une somme de termes locaux, un pour chaque point de  $X^{F^n}$ . Dans la version originale de [Gro66], cette formule n'était prouvée que modulo la résolution des singularités. Le lecteur trouvera une preuve inconditionnelle dans la version définitive. Dans le cas des courbes, cas auquel on peut se réduire (3.7), les ingrédients de la démonstration étaient d'ailleurs tous disponibles.

Pour déduire (3.2) de la formule de Lefschetz-Verdier, il faut pouvoir en calculer les termes locaux. Pour une courbe et l'endomorphisme de Frobenius, cela avait été fait par Artin et Verdier [Ver67].

**Nielson-Wecken** Une méthode inspirée des travaux de Nielsen et Wecken permet de ramener (3.2), à un cas particulier prouvé par Weil ; c'est ce qui sera expliqué dans les paragraphes suivants.

## 4 Réduction à des théorèmes en $\mathbb{Z}/\ell^n$ -cohomologie

Nous prouverons (3.2) par passage à la limite à partir d'un théorème analogue en  $\mathbb{Z}/\ell^n$ -cohomologie. L'énoncé présente la difficulté suivante. Soient  $X_0$  un schéma séparé de type fini sur  $\mathbb{F}_q$ , et  $\mathcal{F}_0$  un faisceau plat et constructible de  $\mathbb{Z}/\ell^n$ -modules. Ses fibres sont des  $\mathbb{Z}/\ell^n$ -modules libres de type fini, et le membre de gauche de (3.2) a donc un sens (c'est un élément de  $\mathbb{Z}/\ell^n$ ). Par contre, les  $H_c^i(X, \mathcal{F})$  ne seront en général pas libres, de sorte que le membre de droite n'est pas défini. Obvier à cette difficulté est l'un des usages essentiels faits par Grothendieck de la théorie des catégories dérivées.

### 4.1

Pour la définition de la catégorie dérivée  $D(\mathcal{A})$  d'une catégorie abélienne  $\mathcal{A}$ , et celle des sous-catégories  $D^+(\mathcal{A})$ ,  $D^-(\mathcal{A})$ ,  $D^b(\mathcal{A})$ , je renvoie au texte de Verdier dans ce volume. Pour  $\Lambda$  un anneau, on écrit  $D(\Lambda)$  au lieu de  $D(\text{catégorie des } \Lambda\text{-modules à gauche})$  ; pour  $X$  un site, on écrit  $D(X, \Lambda)$  au lieu de  $D(\text{catégorie des faisceaux de } \Lambda\text{-modules à gauche})$ . De même pour  $D^-$ , etc. . .

Le signe  $R$  (resp.  $L$ ) indique un foncteur dérivé droit (resp. gauche). Par exemple,  $\overset{L}{\otimes}$  indique le foncteur dérivé du produit tensoriel : pour  $K$  dans  $D^-(\Lambda^\circ)$  et  $L$  dans  $D^-(\Lambda)$  ( $\Lambda^\circ$  anneau opposé à  $\Lambda$ ),  $K \overset{L}{\otimes} L$  se calcule comme suit : on prend des quasi-isomorphismes  $K' \rightarrow K$ ,  $L' \rightarrow L$ , avec  $K'$  et  $L'$  bornés supérieurement et l'un d'eux à composantes plates, et le simple complexe  $s(K' \otimes_\Lambda L')$  associé au complexe double  $K' \otimes_\Lambda L'$ .

## 4.2

Même pour traiter le seul cas de la  $\mathbb{Z}/\ell^n$ -cohomologie, nous aurons besoin de la théorie des traces d'endomorphismes de modules sur des anneaux non nécessairement commutatifs (des algèbres de groupes finis  $\mathbb{Z}/\ell^n[G]$ ). Ces traces ont été introduites par Stallings et Hattori [Bas76].

Soit  $\Lambda$  un anneau (à unité, mais non nécessairement commutatif). On désigne par  $\Lambda^\natural$  le quotient du groupe additif de  $\Lambda$  par le sous-groupe engendré par les commutateurs  $ab - ba$ . Si  $f$  est un endomorphisme du  $\Lambda$ -module à gauche libre  $\Lambda^n$ , de matrice  $f_i^j$ , on note  $\text{Tr}(f)$  l'image de  $\sum f_i^i$  dans  $\Lambda^\natural$ . Si  $f$  et  $g$  sont deux homomorphismes  $f : \Lambda^n \hookrightarrow \Lambda^m : g$ , on vérifie aussitôt que  $\text{Tr}(fg) = \text{Tr}(gf)$ .

Soit  $f$  un endomorphisme d'un  $\Lambda$ -module projectif de type fini  $P$ . Écrivons  $P$  comme facteur direct d'un module libre  $\Lambda^n$  : cela signifie choisir un module  $P'$ , et un isomorphisme  $\alpha : P \oplus P' \xrightarrow{\sim} \Lambda^n$ , soit encore choisir un homomorphisme  $a : P \rightarrow \Lambda^n$ , et une rétraction  $b : \Lambda^n \rightarrow P$  (prendre  $P' = \ker(b)$ ). Soit  $f' = \alpha(f \oplus 0)\alpha^{-1} = afb$ . On pose  $\text{Tr}(f) = \text{Tr}(f')$ . Cet élément de  $\Lambda^\natural$  ne dépend que de  $f$  : si un autre choix  $c : P \hookrightarrow \Lambda^m : d$  est fait, on a  $a = a(dc)(ba)$ , d'où

$$\text{Tr}(afb) = \text{Tr}(adcba) = \text{Tr}(cba) = \text{Tr}(cfd).$$

Si  $f$  est un endomorphisme d'un  $\Lambda$ -module projectif de type fini  $\mathbb{Z}/2$ -gradué, de composantes  $f_i^j : P^j \rightarrow P^i$ , on pose

$$\text{Tr}(f) = \text{Tr}(f_0^0) - \text{Tr}(f_1^1).$$

S'il y a risque d'ambiguïté, on écrira plutôt  $\text{Tr}(f; P)$ . Si les homomorphismes  $f : P \hookrightarrow Q : g$  sont homogènes, on vérifie aussitôt par réduction au cas libre que

$$\text{Tr}(fg) = \text{Tr}((-1)^{\deg f \deg g} gf). \quad (4.2.1)$$

Si  $f$  est un endomorphisme d'un  $\Lambda$ -module  $\mathbb{Z}/2$ -gradué filtré  $(P, F)$ , de filtration finie, compatible à la graduation, et que les  $\text{gr}_F^i(P)$  sont projectifs de type fini, alors  $P$  est projectif de type fini, et

$$\text{Tr}(f; P) = \sum \text{Tr}(f; \text{gr}_F^i(P)) \quad (4.2.2)$$

(scinder la filtration pour se ramener au cas d'une somme directe).

## 4.3

Un module  $\mathbb{Z}$ -gradué sera considéré comme  $\mathbb{Z}/2$ -gradué par la parité du degré. En particulier, si  $f$  est un endomorphisme d'un complexe borné de  $\Lambda$ -modules projectifs de type fini, on pose

$$\text{Tr}(f) = \sum (-1)^i \text{Tr}(f^i). \quad (4.3.1)$$

D'après (4.2.1), si  $f$  est homotope à zéro,  $\text{Tr}(f) = 0$  :

$$f = dH + hD \Rightarrow \text{Tr}(f) = 0. \quad (4.3.2)$$

Soit  $\mathbf{K}_{\text{parf}}(\Lambda)$  la catégorie d'objets les complexes bornés de  $\Lambda$ -modules projectifs de type fini, et de flèches les morphismes de complexes pris à homotopie près. Le foncteur  $\mathbf{K}_{\text{parf}}(\Lambda) \rightarrow \mathbf{D}(\Lambda)$  est pleinement fidèle. On note  $\mathbf{D}_{\text{parf}}(\Lambda)$  son image essentielle. Les formules (4.3.1) (4.3.2) permettent de définir  $\text{Tr}(f)$  pour  $f$  un endomorphisme de  $K \in \text{Ob } \mathbf{D}_{\text{parf}}(\Lambda)$  (et cette trace ne dépend que de la classe d'isomorphie de  $(K, f)$ ).

## 4.4

Rappelons que la catégorie dérivée filtrée  $\text{DF}(\mathcal{A})$  d'une catégorie abélienne  $\mathcal{A}$  est la catégorie déduite de celle des complexes d'objets filtrés de filtration finie de  $\mathcal{A}$  en inversant les quasi-isomorphismes filtrés (= morphismes de complexes filtrés induisant un quasi-isomorphisme sur le gradué associé). On dispose de foncteurs “complexe sous-jacent” :  $\text{DF}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathbf{D}(\mathcal{A}) : (K, F) \mapsto K$  et “ $p$ -ième composante du gradué” :  $\text{DF}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathbf{D}(\mathcal{A}) : (K, F) \mapsto \text{gr}_F^p(K)$ .

Soit  $\mathbf{KF}_{\text{parf}}(\Lambda)$  la catégorie d'objets les complexes bornés filtrés de filtration finie  $(K, F)$  avec des  $\text{gr}_F^p(K^q)$  projectifs de type fini, et de flèches les morphismes de complexes respectant la filtration, pris à une homotopie respectant la filtration près. Le foncteur  $\mathbf{KF}_{\text{parf}}(\Lambda) \rightarrow \mathbf{DF}(\Lambda)$  est pleinement fidèle ; son image essentielle  $\mathbf{DF}_{\text{parf}}(\Lambda)$  est presque tous nuls ; si  $(K, F)$  est dans  $\mathbf{D}_{\text{parf}}(\Lambda)$ , alors  $K$  est dans  $\mathbf{D}_{\text{parf}}(\Lambda)$ .

D'après (4.2.2), si  $f$  est un endomorphisme de  $(K, F) \in \text{Ob } \mathbf{DF}_{\text{parf}}(\Lambda)$ , on a

$$\text{Tr}(f, K) = \sum_p \text{Tr}(f, \text{gr}_F^p(K)). \quad (4.4.1)$$

## 4.5

Soient  $\Lambda$  un anneau, et  $K \in \text{Ob } \mathbf{D}^-(\Lambda)$ . On dit que  $K$  est de tor-dimension  $\leq r$  si pour tout  $\Lambda$ -module à droite  $N$ , les hypertors  $H^i(N \otimes_{\Lambda}^{\mathbf{L}} K)$  sont nuls pour  $i < -r$ . Il est dit de tor-dimension finie si cette condition est vérifiée pour un  $r$ .

On emploie la même terminologie pour un complexe de faisceaux  $K \in \text{Ob } \mathbf{D}^-(X, \Lambda)$ .

**Lemme 4.5.1.** *Soient  $\Lambda$  un anneau noethérien à gauche, et  $K \in \text{Ob } \mathbf{D}^-(\Lambda)$ . Pour que  $K$  soit dans  $\mathbf{DF}_{\text{parf}}(\Lambda)$ , il faut et il suffit qu'il soit de tor-dimension finie et que les  $H^i(K)$  soient de type fini.*

Quitte à remplacer  $K$  par un complexe isomorphe (dans  $\mathbf{D}^-(\Lambda)$ ), on peut supposer  $K$  borné supérieurement et à composantes libres de type fini (cf. 4.7, ci-dessous). Si  $K$  est de tor-dimension  $\leq r$ , les  $H^i(K)$  sont nuls pour  $i < -r$ ,  $K^{-r}/\text{im}(d)$  admet la résolution libre

$$(\cdots \rightarrow K^{-r-1} \rightarrow K^{-r} \rightarrow K^{-r}/\text{im}(d),$$

et pour tout  $\Lambda$ -module à droite  $N$ ,  $H^{-r-k}(N \otimes_{\Lambda}^{\mathbf{L}} K) = H^{-r-k}(N \otimes_{\Lambda} K) = \text{Tor}_k(N, K^{-r}/\text{im } d)$  pour  $k \geq 1$ .

Par hypothèse, ces groupes sont nuls ; le module  $K^{-r}/\text{im } d$  est donc plat de présentation finie, i.e. projectif de type fini. Le quotient

$$0 \rightarrow K^{-r}/\text{im}(d) \rightarrow K^{-r+1} \rightarrow K^{-r+2} \rightarrow \cdots$$

de  $K$  est quasi-isomorphe à  $K$ , et ceci montre que  $K \in \text{Ob } \mathbf{DF}_{\text{parf}}(\Lambda)$ .

**Proposition-définition 4.6.** *Soient  $X$  un schéma noethérien, et  $\Lambda$  un anneau noethérien à gauche. On note  $\mathbf{D}_{\text{ctf}}^b(X, \Lambda)$  la sous-catégorie de  $\mathbf{D}^-(X, \Lambda)$  formée des complexes  $\mathcal{K}$  vérifiant les conditions équivalentes suivantes :*

- i)  $\mathcal{K}$  est isomorphe (dans  $\mathbf{D}^-(X, \Lambda)$ ) à un complexe borné de faisceaux de  $\Lambda$ -modules plats et constructibles.
- ii)  $\mathcal{K}$  est de tor-dimension finie et les faisceaux  $H^i(\mathcal{K})$  sont constructibles.

Même argument qu'en (4.5), à partir du lemme suivant.

**Lemme 4.7.** *Si un complexe  $\mathcal{K}$  de faisceaux de  $\Lambda$ -modules est tel que les  $H^i(\mathcal{K})$  soient constructibles, et nuls pour  $i$  grand, il existe un quasi-isomorphisme  $\mathcal{K}' \rightarrow \mathcal{K}$ , avec  $\mathcal{K}'$  borné supérieurement à composantes constructibles et plates.*

On construit  $\mathcal{K}'$  en se propageant de droite à gauche. Pour un  $m$  tel que les  $H^i(\mathcal{K})$  ( $i \geq m$ ) soient nuls, on prend  $\mathcal{K}'^i = 0$  pour  $i \geq m$ . Supposons ensuite déjà construits les  $\mathcal{K}'^i$  pour  $i > n$  :

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & \longrightarrow & \mathcal{K}^{n-1} & \longrightarrow & \mathcal{K}^n & \longrightarrow & \mathcal{K}^{n+1} \longrightarrow \cdots \\ & & & & & & \uparrow \\ & & & & & & \mathcal{K}'^{n+1} \longrightarrow \cdots, \end{array}$$

avec  $H^i(\mathcal{K}') \xrightarrow{\sim} H^i(\mathcal{K})$  pour  $i > n+1$ , et  $\ker(d) \rightarrow H^{n+1}(\mathcal{K})$  surjectif en degré  $n+1$ . Définissons des faisceaux  $\mathcal{A}$  et  $\mathcal{B}$  par le diagramme cartésien

$$\begin{array}{ccccc} \mathcal{K}^n & \longrightarrow & \mathcal{K}^n/\text{im}(d) & \longrightarrow & \ker(d) \\ \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ \mathcal{A} & \xrightarrow{u} & \mathcal{B} & \longrightarrow & \ker(d). \end{array}$$



Alors,  $\mathcal{B}$  est constructible,  $u$  est surjectif, et pour avancer d'un pas, il suffit de construire  $K^n$  plat et constructible et  $v : \mathcal{K}^n \rightarrow \mathcal{A}$  tel que  $u \circ v$  soit surjectif. Que ce soit possible est garanti par le lemme suivant.

**Lemme 4.8.** *Soit  $v : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  un épimorphisme de faisceaux de  $\Lambda$ -modules, avec  $\mathcal{B}$  constructible. Il existe alors  $u : \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{A}$  avec  $\mathcal{K}$  plat et constructible et  $vu$  un épimorphisme.*

Le faisceau  $\mathcal{A}$  est quotient d'une somme de faisceaux de la forme  $\varphi_! \Lambda$ , pour  $\varphi : U \rightarrow X$  étale. Puisque  $\mathcal{B}$  est noethérien ([AGV72, IX.2.10]), une somme finie de ceux-ci s'envoie déjà sur  $\mathcal{B}$ , d'où le lemme.

**Théorème 4.9.** *Soit  $f : X \rightarrow Y$  un morphisme séparé de type fini de schémas noethériens. Si  $\mathcal{K} \in \text{Ob } D_{\text{ctf}}^b(X, \Lambda)$ , alors  $Rf_! \mathcal{K} \in \text{Ob } D_{\text{ctf}}^b(Y, \Lambda)$ .*

Rappelons que si  $j : X \hookrightarrow \bar{X} \xrightarrow{\bar{f}} Y$  est une compactification relative de  $X/Y$ , on a par définition  $Rf_! = Rf_* \circ j_!$ , où  $Rf_*$  est le foncteur dérivé du foncteur  $f_*$ . Cette formule ramène la preuve de (4.9) au cas où  $f$  est propre. Pour  $f$  propre,  $f_*$  est de dimension cohomologique finie ; ceci permet de définir  $Rf_*$  sur la catégorie dérivée tout entière, et aussi comme un foncteur

$$Rf_* : D^-(X, \Lambda) \rightarrow D^-(Y, \Lambda).$$

Par composition, on définit de même en général

$$Rf_! : D^-(X, \Lambda) \rightarrow D^-(Y, \Lambda).$$

Pour tout  $\Lambda$ -module à droite  $N$ , on a (preuve donnée ci-dessous)

$$N \otimes^L Rf_! \mathcal{K} \xrightarrow{\sim} Rf_!(N \otimes^L \mathcal{K}). \quad (4.9.1)$$

Déduisons (4.9) de (4.9.1).

a) La suite spectrale

$$E_2^{pq} = R^p f_! H^q(\mathcal{K}) \rightarrow H^{p+q} Rf_! \mathcal{K}.$$

et le théorème de finitude pour  $Rf_!$ , montrent que  $Rf_! \mathcal{K} \in \text{Ob } D^b(X, \Lambda)$  et est à cohomologie constructible. Reste à prouver la tor-dimension finie (4.6).

b) Si  $\mathcal{K}$  est de tor-dimension  $\leq -r$ , il en est de même pour  $Rf_! \mathcal{K}$  : on a  $H^i(N \otimes^L Rf_! \mathcal{K}) = H^i(Rf_!(N \otimes^L \mathcal{K}))$ , et, dans la suite spectrale ci-dessus pour  $N \otimes^L \mathcal{K}$ , les  $E_2^{pq}$  sont nuls pour  $q < r - s$  fortiori pour  $p + q < r$ . Prouvons (4.9.1), en restant au niveau des complexes.

a) Utilisant la formule de définition  $Rf_! = Rf_* \circ j_!$ , on se ramène à supposer  $f$  propre.

b) Représentons  $\mathcal{K}$  par un complexe borné supérieurement à composantes acyclique pour  $f_* : R^p f_* \mathcal{K}^q = 0$  pour  $p > 0$ . On a alors  $Rf_* K \sim f_* \mathcal{K}$ . Il n'est possible de travailler ainsi avec des complexes bornés supérieurement que parce que  $f_*$  est de dimension cohomologique finie.

c) Si  $L$  un  $\Lambda$ -module à droite libre, on a  $R^p f_*(L \otimes \mathcal{K}^q) = L \otimes R^p f_* \mathcal{K}^q$  : c'est trivial pour  $\Lambda$  libre de type fini, et le cas général s'en déduit par passage à la limite. Le faisceau  $L \otimes \mathcal{K}^q$  est acyclique pour  $f_*$ , et  $f_*(L \otimes \mathcal{K}^q) = L \otimes f_* \mathcal{K}^q$ .

d) Soit  $N_\bullet$  une résolution libre de  $N$ . On a  $N \otimes^L \mathcal{K} \sim s(N_\bullet \otimes \mathcal{K})$  (complexe simple associé au complexe double  $N_\bullet \otimes \mathcal{K}$ ). D'après c),

$$Rf_*(N \otimes^L \mathcal{K}) \sim Rf_*(s(N_\bullet \otimes \mathcal{K})) \sim f_*(s(N_\bullet \otimes \mathcal{K})) \sim s(N_\bullet \otimes f_* \mathcal{K}) \sim N \otimes^L Rf_* \mathcal{K},$$

soit la formule annoncée.

Lorsque  $Y$  est le spectre d'un corps séparablement clos, le foncteur  $Rf_!$  s'identifie à un foncteur noté  $R\Gamma_c : D_{\text{ctf}}^b(X, \Lambda) \rightarrow D_{\text{parf}}(\Lambda)$ .

**Théorème 4.10.** *Avec les notations du §1, soient  $X_0$  un schéma séparé de type fini sur  $\mathbb{F}_q$ , et  $\Lambda$  un anneau noethérien de torsion, tué par un entier premier à  $p$ . Soit  $\mathcal{K}_0 \in \text{Ob } D_{\text{ctf}}^b(X_0, \Lambda)$ . Avec la définition (4.3) de traces, on a pour tout  $N$*

$$\sum_{x \in X^{F^n}} \text{Tr}(F^{n*}, \mathcal{K}_x) = \text{Tr}(F^{n*}, R\Gamma_c(X, \mathcal{K})).$$

Dans la fin de ce §, nous allons déduire 3.2 de 4.10, et prouver 2.10.

### 4.11 Preuve de 2.10

Soit  $X$  un schéma séparé de type fini sur un corps algébriquement clos  $k$ , et soit  $\mathcal{G}$  un  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceau sur  $X$ . D'après 2.8 on peut l'écrire sous la forme  $\mathcal{G} = \mathcal{F} \otimes \mathbb{Q}_\ell$ , avec  $\mathcal{F}$  un  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau sans torsion. Posons

$$K_n = R\Gamma_c(X, \mathcal{F} \otimes \mathbb{Z}/\ell^{n+1}) \in D(\mathbb{Z}/\ell^{n+1}).$$

D'après 4.9, on a  $K_n \in \text{Ob } D_{\text{parf}}(\mathbb{Z}/\ell^{n+1})$ , et il résulte de (4.9.1) que la flèche naturelle

$$K_n \xrightarrow{\mathbb{L}}_{\mathbb{Z}/\ell^{n+1}} \mathbb{Z}/\ell^n \longrightarrow K_{n+1}, \quad (4.11.1)$$

est un isomorphisme. Le problème de la définition de cette flèche est discuté en 4.12.

On peut maintenant invoquer [Gro66, XI.3.3] (p. 31, 1-2 à la fin ; ce passage est indépendant du reste de [Gro66]) pour réaliser chaque  $K_n$  par un complexe borné de  $\mathbb{Z}/\ell^{n+1}$ -modules libres de type fini, et les flèches (4.11.1) par des *isomorphismes de complexes*

$$K_n \otimes \mathbb{Z}/\ell^n \xrightarrow{\sim} K_{n-1}.$$

Soit  $K$  le complexe  $\varprojlim K_n$ . C'est un complexe borné de  $\mathbb{Z}_\ell$ -modules libres, et  $K_n \simeq K \otimes_{\mathbb{Z}_\ell} \mathbb{Z}/\ell^{n+1}$ . On a

$$H^i(K) = \varprojlim H^i(K_n),$$

(tout système projectif de groupes finis vérifie en effet la condition de Mittag-Leffler), et  $H^i(K)$  est un  $\mathbb{Z}_\ell$ -module de type fini. On a

$$H_c^i(X, \mathcal{G}) = \left( \varprojlim H^i(K_n) \right) \otimes_{\mathbb{Z}_\ell} \mathbb{Q}_\ell :$$

c'est un  $\mathbb{Q}_\ell$ -espace vectoriel de dimension finie.

### 4.12 La flèche (4.11.1)

Pour *définir* la flèche (4.11.1), on ne peut pas procéder comme en 4.9, i.e. résoudre  $\mathbb{Z}/\ell^n$  par un complexe de  $\mathbb{Z}/\ell^{n+1}$ -modules libres, puisqu'on veut construire un isomorphisme dans  $D_{\text{parf}}(\mathbb{Z}/\ell^n)$ . La flèche voulue est un cas particulier de la flèche d'extension des scalaires suivante.

(\*) Soit  $\Lambda \rightarrow \Lambda'$  un homomorphisme d'anneaux noethériens de torsion. Pour  $X$  un schéma séparé de type fini sur  $k$  algébriquement clos, et  $\mathcal{K} \in \text{Ob } D_{\text{ctf}}(X, \Lambda)$ , on a un isomorphisme

$$R\Gamma_c(X, \mathcal{K}) \xrightarrow{\mathbb{L}}_{\Lambda} \Lambda' \xrightarrow{\sim} R\Gamma_c(X, \mathcal{K} \otimes_{\Lambda} \Lambda').$$

Des flèches plus générales sont construits dans [AGV72, XVII 4.2.12]. La méthode est la suivante :

- La définition de  $R\Gamma_c$  est la formule  $j_!(\mathcal{K} \otimes_{\Lambda} \Lambda') = (j_!\mathcal{K}) \otimes_{\Lambda} \Lambda'$  pour une immersion ouverte nous ramènent au cas où  $X$  est propre.
- Pour  $X$  propre, il s'agit de remplacer  $\mathcal{K}$  par un complexe borné à composantes acycliques pour le foncteur  $\Gamma$ , et de fibre en tout point géométrique (ou seulement un tout point fermé) homotope à un complexe de  $\Lambda$ -modules plats. Pour un tel complexe, on a  $\Gamma(X, \mathcal{K}) \sim R\Gamma(X, \mathcal{K})$  et  $K \otimes_{\Lambda} \Lambda' \sim \mathcal{K} \otimes_{\Lambda} \Lambda'$  ; la flèche (4.11.1) est définie comme la composition

$$R\Gamma(X, \mathcal{K}) \xrightarrow{\mathbb{L}}_{\Lambda} \Lambda' \rightarrow \Gamma(X, \mathcal{K}) \otimes_{\Lambda} \Lambda' \rightarrow \Gamma(X, \mathcal{K} \otimes_{\Lambda} \Lambda') \xleftarrow{\sim} R\Gamma(X, \mathcal{K} \otimes_{\Lambda} \Lambda').$$

- Il reste à montrer qu'il est possible de remplacer  $\mathcal{K}$  par un complexe du type voulu [AGV72, XVII.4.2.10]. On remplace d'abord  $\mathcal{K}$  par un complexe borné à composantes plates (4.6), puis on en prend une résolution flasque canonique tronquée (ceci ne modifie pas le type d'homotopie des complexes fibres, et on tronque assez loin pour que vérifiée la condition d'acyclicité pour  $\Gamma$  (i.e. au-delà de la dimension cohomologique de  $\Gamma$ )).

### 4.13 Prouve de (3.2)

Pour simplifier les notations, nous ne traiterons que la cas  $n = 1$  de (3.2). Le cas général s'en déduit en remplaçant ci-dessous  $F$  par  $F^n$ .

Soient donc  $X_0$  séparé de type fini sur  $\mathbb{F}_q$ , et  $\mathcal{G}_0$  un  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceau sur  $X_0$ . On a  $\mathcal{G}_0 = \mathcal{F}_0 \otimes \mathbb{Q}_\ell$ , pour  $\mathbb{Z}_\ell$ -faisceau sans torsion convenable  $\mathcal{F}_0$ . Soit  $K_n = R\Gamma_c(X, \mathcal{F} \otimes \mathbb{Z}/\ell^n)$ . Les morphismes de Frobenius induisent des morphismes

$$F^* : K_n \rightarrow K_n \quad (\text{dans } D_{\text{parf}}(\mathbb{Z}/\ell^{n+1})),$$

qui se déduisent les uns des autres via les isomorphismes (4.11.1).

Réalisons comme en (4.11) les  $K_n$  et les isomorphismes (4.11.1) au niveau des complexes. Le passage déjà cité de [Gro66, XV.3.3] permet de réaliser les morphismes  $F^*$  par des endomorphismes de complexes, encore notés  $F^*$ , qui se réduisent les uns sur les autres. On note encore  $F^*$  leur limite projective, et les endomorphismes qui s'en déduisent. Puisque  $H_c^i(X, \mathcal{G}) = H^i(K) \otimes \mathbb{Q}_\ell = H^i(K \otimes \mathbb{Q}_\ell)$ , on a (avec la convention de signe de (?1))

$$\text{Tr}(F^*, H_c^\bullet(X, \mathcal{G})) = \text{Tr}(F^*, K^\bullet \otimes \mathbb{Q}_\ell) = \varprojlim_n \text{Tr}(F^*, K_n^\bullet) = \varprojlim_n \text{Tr}(F^*, R\Gamma_c(X, \mathcal{F} \otimes \mathbb{Z}/\ell^{n+1})).$$

Appliquons (4.10) à  $\mathcal{F}_0 \otimes \mathbb{Z}/\ell^{n+1}$  (vu comme complexe réduit de degré 0), pour  $\Lambda = \mathbb{Z}/\ell^{n+1}$ . On trouve que

$$\begin{aligned} \text{Tr}(F^*, R\Gamma_c(X, \mathcal{F} \otimes \mathbb{Z}/\ell^{n+1})) &= \sum_{x \in X^F} \text{Tr}(F^*, \mathcal{F}_x \otimes \mathbb{Z}/\ell^{n+1}) \\ &= \sum_{x \in X^F} \text{Tr}(F^*, \mathcal{G}_x) \pmod{\ell^{n+1}}, \end{aligned}$$

et (3.2), en résulte par passage à limite.

## 5 La méthode de Nielsen-Wecken

Dans ce chapitre, nous prouvons deux cas particuliers de (4.10). Le cas général sera considéré au chapitre suivant.

**Lemme 5.1.** *La théorème (4.10) est vrai pour  $X_0$  de dimension 0.*

En dimension 0, la formule (4.10) vaut pour toute correspondance, et non seulement pour les itérés d'un Frobenius. Elle est un cas particulier de l'énoncé suivant (appliqué à  $X(\mathbb{F})$ ,  $K$  et aux  $F^{*n}$ ).

(\*) Soit  $X$  un ensemble fini,  $F : X \rightarrow X$ ,  $\mathcal{K} \in \text{Ob } D_{\text{parf}}(X, \Lambda)$  et  $F^* : F^* \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{K}$ . On a

$$\sum_{x \in X^F} \text{Tr}(F^*, \mathcal{K}_x) = \text{Tr}(F^*, \Gamma(X, K)).$$

On a  $\Gamma(X, \mathcal{K}) = \bigoplus_{x \in X} \mathcal{K}_x$ , et la formule résulte de ce que pour tout morphisme  $u : \bigoplus_{x \in X} \mathcal{K}_x \rightarrow \bigoplus_{x \in X} \mathcal{K}_x$ , de matrice  $u_x^y$ , on a  $\text{Tr}(u) = \sum_{x \in X} \text{Tr}(u_x^x)$ .

**Lemme 5.2.** *Soient  $\Lambda$  un anneau noethérien de torsion, tué par une puissance du nombre premier  $\ell \neq p$ ,  $X_0$  une courbe projective, lisse et connexe sur  $\mathbb{F}_q$ ,  $j : U_0 \hookrightarrow X_0$  un ouvert dense de  $X_0$  et  $\mathcal{G}_0$  un faisceau localement constant de  $\Lambda$ -modules projectifs sur  $U_0$ . On a*

$$\sum_{x \in U^F} \text{Tr}(F^*, \mathcal{G}_x) = \text{Tr}(F^*, R\Gamma_c(U, \mathcal{G})).$$

Plus précisément, nous déduirons (5.2) du

**Théorème 5.3.** *Soient  $X$  une courbe projective non singulière sur un corps algébriquement clos  $k$ ,  $f$  un endomorphisme à points fixes isolés de  $X$  et  $v(f)$  le nombre de points fixes de  $f$ , chacun étant compté avec sa multiplicité :  $v(f)$  est la nombre d'intersection du graphe de  $f$  avec la diagonale de  $X \times X$ . Alors, pour  $\ell$  premier à l'exposant caractéristique de  $k$ , on a*

$$v(f) = \sum (-1)^i \text{Tr}(f^*, H^i(X, \mathbb{Q}_\ell)).$$

Ce théorème est dû à Weil ([Wei48], n° 43, 66 et 68) et la démonstration de Weil est reproduite dans Lang [Lan83] (VI §3 combiné avec VII §2 th.3). On peut aussi le déduire du formalisme de la classe cohomologie associée à un cycle (La classe de cohomologie associée à un cycle, 3.7).

**Corollaire 5.4.** *Soit  $j : U \hookrightarrow X$  un ouvert dense de  $X$ , tel que  $f^{-1}(U) = U$ . Si les points fixes de  $f$  dans  $X \setminus U$  sont de multiplicité un, alors le nombre  $v_U(f)$  de points fixes de  $f$  dans  $U$  (chacun compté avec sa multiplicité) est*

$$v_U(f) = \sum (-1)^i \operatorname{Tr} (f^*, H_c^i(U, \mathbb{Q}_\ell)) .$$

Soit  $F$  l'ensemble fini  $X \setminus U$ . La suite exacte de cohomologie définie par la suite exacte court  $0 \rightarrow j_! \mathbb{Q}_\ell \rightarrow \mathbb{Q}_\ell \rightarrow \mathbb{Q}_{\ell F} \rightarrow 0$  :

$$\xrightarrow{\partial} H_c^i(U, \mathbb{Q}_\ell) \longrightarrow H^i(X, \mathbb{Q}_\ell) \longrightarrow H^i(F, \mathbb{Q}_\ell) \xrightarrow{\partial}$$

fournit, avec la convention de signe de (3.1).

$$\operatorname{Tr} (f^*, H_c^\bullet(U, \mathbb{Q}_\ell)) = \operatorname{Tr} (f^*, H^\bullet(X, \mathbb{Q}_\ell)) - \operatorname{Tr} (f^*, H^\bullet(F, \mathbb{Q}_\ell)) = v(f) - \operatorname{Tr} (f^*, \mathbb{Q}_\ell^F).$$

La trace de  $f^*$  sur  $\mathbb{Q}_\ell^F$  est le nombre  $v_F(f)$  de points fixes de  $f$  dans  $F$ ; l'hypothèse de multiplicité un assure donc que

$$\operatorname{Tr} (f^*, H_c^\bullet(U, \mathbb{Q}_\ell)) = v_F(f) - v_U(f),$$

comme promis.

La preuve de (5.2) utilise quelques lemmes que nous allons développer maintenant sur un cas particulier des traces non commutative (4.2). *Pour abréger, nous dirons projectif pour projectif de type fini.*

## 5.5

Soient  $\Lambda$  un anneau, et  $H$  un groupe fini. L'application  $\sum a_h \cdot a \mapsto$  classe de  $a_e$ , de l'algèbre de groupe  $\Lambda[H]$  dans  $\Lambda^\natural$ , s'annule sur les commutateurs  $ab - ba$  de  $\Lambda[H]$ . Elle se factorise donc par

$$\varepsilon : \Lambda[H]^\natural \rightarrow \Lambda^\natural.$$

Si  $F$  est un endomorphisme d'un  $\Lambda[H]$ -module projectif  $P$ , on pose

$$\operatorname{Tr}_\Lambda^H(F) = \varepsilon \operatorname{Tr}_{\Lambda[H]}(F)$$

où au second membre figure la trace (4.2). Pour éviter des ambiguïtés, on écrira parfois cette trace  $\operatorname{Tr}_\Lambda^H(F, P)$ .

**Proposition 5.6.**  $\operatorname{Tr}_\Lambda(F) = |H| \operatorname{Tr}_\Lambda^H(F)$ .

Les propriétés formelles des traces nous ramènent à ne traiter que le cas où  $P = \Lambda[H]$ . L'endomorphisme  $F$  est alors la multiplication à droite par un élément  $\sum a_h \cdot h$  de  $\Lambda[H]$ , et  $\operatorname{Tr}_\Lambda(F) = |H| a_e$ ,  $\operatorname{Tr}_\Lambda^H(F) = a_e$ .

## 5.7

Soient  $A$  un anneau commutatif et  $\Lambda$  un  $A$ -algèbre. La multiplication par un élément de  $A$  passe au quotient pour définir une structure de  $A$ -module sur  $A^\natural$ . Si  $H$  est un groupe fini,  $P$  un  $A[H]$ -module projectif et  $M$  un  $\Lambda[H]$ -module, projectif en tant que  $\Lambda$ -module, on sait que le  $\Lambda$ -module  $P \otimes_A H$ , muni de l'action diagonale de  $H$ , est un  $\Lambda[H]$ -module projectif. En effet :

- a) Il suffit de le vérifier par  $P = A[H]$ .
- b) Le  $\Lambda$ -module  $P \otimes_A M$ , muni de l'action de  $H$  définie par son action sur le premier facteur, est clairement un  $\Lambda[H]$ -module projectif; notons le  $(P \otimes_A M)'$ .
- c) L'application  $h \otimes m \mapsto h \otimes h^{-1}m$  induit un isomorphisme

$$A[H] \otimes_A M \xrightarrow{\sim} (A[H] \otimes_A M)'. \quad (5.7.1)$$

**Proposition 5.8.** *Avec les notations précédentes, si  $u$  est un endomorphisme de  $F$  et  $v$  un endomorphisme de  $M$ , on a*

$$\mathrm{Tr}_\Lambda^H(u \otimes v) = \mathrm{Tr}_\Lambda^H(u) \mathrm{Tr}_\Lambda(v).$$

On se ramène à supposer que  $P = A[H]$ ; l'endomorphisme  $u$  est alors la multiplication à droite  $m_x$  par un élément  $x = \sum a_h h$  de  $A[H]$ . L'isomorphisme (5.7.1) transforme  $u \otimes v$  en  $\sum a_h m_h \otimes h^{-1}v$ , de trace  $a_e \cdot \mathrm{Tr}_\Lambda(v)$ .

## 5.9

Soient  $G$  un groupe extension de  $\mathbb{Z}$  par un groupe fini  $H$

$$1 \rightarrow H \rightarrow G \rightarrow \mathbb{Z} \rightarrow 1,$$

et  $G^+$  l'image inverse de  $\mathbb{N}$ . Soient  $\Lambda$  un anneau, et  $P$  un  $\Lambda[G^+]$ -module, projectif en tant que  $\Lambda[H]$ -module. Si  $g \in G^+$ , on note  $Z_g$  le centralisateur de  $g$  dans  $H$ ; la multiplication par  $g$  est un endomorphisme de  $P$ , vu comme  $\Lambda[Z_g]$ -module.  $P$  étant  $\Lambda[Z_g]$ -projectif, une trace  $\mathrm{Tr}_\Lambda^{Z_g}(g)$  est définie. D'après 5.6, on a

$$\mathrm{Tr}_\Lambda(g) = |Z_g| \cdot \mathrm{Tr}_\Lambda^{Z_g}(g). \quad (5.9.1)$$

Supposons que  $\Lambda$  soit une algèbre sur un anneau commutatif  $A$ . Pour  $P$  un  $A[G^+]$ -module, projectif en tant que  $A[H]$ -module et  $M$  un  $\Lambda[G^+]$ -module, projectif en tant que  $\Lambda$ -module, le  $\Lambda[G^+]$ -module  $P \otimes_A M$  (action diagonale de  $G^+$ ) est projectif en tant que  $\Lambda[H]$ -module et d'après 5.8, pour tout  $g \in G^+$ , on a

$$\mathrm{Tr}_\Lambda^{Z_g}(g, P \otimes_A M) = \mathrm{Tr}_\Lambda^{Z_g}(g, P) \cdot \mathrm{Tr}_\Lambda(g, M). \quad (5.9.2)$$

## 5.10

Soient  $P$  un  $\Lambda[G^+]$ -module projectif en tant que  $\Lambda[H]$ -module, et  $P_H$  les coinvariants de  $H$  dans  $P$ . C'est un  $\Lambda$ -module projectif. L'action de  $g \in G^+$  passe au quotient, et définit un endomorphisme de  $P_H$  qui ne dépend que de l'image de  $g$  dans  $\mathbb{N}$ . Nous notons  $F$  l'action des éléments  $g \in G^+$  d'image 1.

**Proposition 5.11.**  $\mathrm{Tr}_\Lambda(F, P_H) = \sum'_{g \mapsto 1} \mathrm{Tr}_\Lambda^{Z_g}(g, P)$ , où  $\sum'_{g \mapsto 1}$  désigne une somme étendue aux classes de  $H$ -conjugaison d'éléments de  $G^+$  d'image 1 dans  $\mathbb{N}$ .

Après multiplication par  $|H|$ , cette formule peut se vérifier comme suit :

$$|H| \cdot \mathrm{Tr}_\Lambda(F, P_H) = \mathrm{Tr}_\Lambda \left( \sum_{g \mapsto 1} g, P \right) = \sum'_{g \mapsto 1} \frac{|H|}{|Z_g|} \mathrm{Tr}_\Lambda(g, P) = \sum'_{g \mapsto 1} |H| \cdot \mathrm{Tr}_\Lambda^{Z_g}(g, P).$$

Choisissons un élément  $g \in G^+$  d'image 1 dans  $\mathbb{N}$ , et soit  $\sigma$  l'automorphisme  $\Lambda[H]$  induit par l'automorphisme  $\mathrm{ad} g$  de  $H$ . Il revient au même de se donner un  $\Lambda[G^+]$ -module, ou un  $\Lambda[H]$ -module muni d'un endomorphisme  $\sigma$ -linéaire  $\gamma$  : on fait agir  $g^n h$  par  $\gamma^n h$ . Dans ce langage, la formule 5.11 prend la forme : pour  $P$  un  $\Lambda[H]$ -module projectif et pour  $\gamma$  un endomorphisme  $\sigma$ -linéaire de  $P$ , on a

$$\mathrm{Tr}_\Lambda(\gamma, P_H) = \sum_h \mathrm{Tr}_\Lambda^{Z_g}(h\gamma, P),$$

où  $\sum'$  est une somme sur les classes de  $\mathrm{ad} g$ -conjugaison dans  $H$  (orbites de  $H$  agissant sur lui-même par les  $x \mapsto hx \mathrm{ad} g(h)^{-1}$ ).

Sous cette forme, les propriétés des traces nous ramènent aussitôt au cas où  $P = \Lambda[H]$ . L'endomorphisme  $Y$  a alors la forme  $x \mapsto \sigma(x)a$ , avec  $a = \sum a_h h$  dans  $\Lambda[H]$ . Il suffit de traiter le cas universel où les  $a_h$  sont des indéterminées. Dans ce cas,  $\Lambda = \mathbb{Z}\langle a_h \rangle_{h \in H}$  (polynômes non commutatifs) et  $\Lambda^\natural$  est sans torsion : on obtient 5.11 par l'argument du début et division par  $|H|$ . On peut aussi calculer directement.

### 5.11.1 Remarque

Tout ce qui a été dit ci-dessus s'applique aussi bien aux modules  $\mathbb{Z}/2$ -gradués, ou aux complexes de modules (cf. 4.2, 4.3).

## 5.12

Reprenons les notations de 5.2, et soit  $A = \mathbb{Z}/\ell^n$ ,  $n$  étant assez grand pour que  $\Lambda$  soit une  $A$ -algèbre. Soit  $f : V_0 \rightarrow U_0$  un revêtement fini étale et connexe de  $U_0$ , galoisien de groupe de Galois  $H$ , et tel que le faisceau  $f^*\mathcal{G}_0$  soit constant. On note  $M$  le valeur constants  $H^0(V_0, f^*\mathcal{G}_0)$ , c'est un  $\Lambda[H]$ -module, projectif en tant que  $\Lambda$ -module.

Le faisceau  $f_*A$  sur  $U_0$ , muni de l'action naturelle de  $H$ , est un faisceau localement libre (de rang un) de  $A[H]$ -modules. Le complexe  $R\Gamma_c(U, f_*A)$  est donc objet de  $D_{\text{parf}}(A[H])$ . Il est muni d'un endomorphisme de Frobenius  $F^*$ .

Pour l'action naturelle de  $H$  sur  $f_*f^*\mathcal{G}_0$ , le morphisme trace  $f_*f^*\mathcal{G}_0 \rightarrow \mathcal{G}_0$  se factorise par un isomorphisme

$$(f_*f^*\mathcal{G}_0)_H \rightarrow \mathcal{G}_0.$$

Par ailleurs, on a  $f_*f^*\mathcal{G}_0 = f_*A \otimes_A M$  (avec action diagonale de  $H$ ). L'isomorphisme

$$\mathcal{G}_0 \xleftarrow{\sim} (f_*A \otimes_A M)_H = (f_*A \otimes_A M) \otimes_{\Lambda[H]} \Lambda$$

se dérive (4.12) et un isomorphisme

$$R\Gamma_c(U, \mathcal{G}) \sim (R\Gamma_c(U, f_*A) \otimes_A M) \otimes_{\Lambda[H]} \Lambda.$$

L'endomorphisme  $F^*$  du membre de gauche se déduit de l'endomorphisme  $F^*$  de  $R\Gamma_c(U, f_*A)$ . Le complexe de  $\Lambda[H]$ -modules  $R\Gamma_c(U, f_*A)$ , muni de  $F^*$ , peut être vu comme un complexe de  $\Lambda[G^+]$ -modules, pour  $G^+ = H \times \mathbb{N}$ . Les formules 5.10 et (5.9.2), amplifiées par 5.11.1, fournissent donc

$$\text{Tr}(F^*, R\Gamma_c(U, \mathcal{G})) = \sum_h^I \text{Tr}_A^{Z_g}(hF^*, R\Gamma_c(U, f_*A)) \cdot \text{Tr}_\Lambda(h, M)$$

où  $\sum'$  est une somme sur les classes de conjugaison dans  $H$ . De plus,

$$|Z_h| \cdot \text{Tr}_A^{Z_h}(hF^*, R\Gamma_c(U, f_*A)) = \text{Tr}_A((Fh^{-1})^*, R\Gamma_c(V, A)).$$

Cette formule reste vraie pour  $A = \mathbb{Z}/\ell^m$ , avec  $m$  de plus en plus grand. Passant à limite, on trouve que  $\text{Tr}_A^{Z_g}(hF^*, R\Gamma_c(U, f_*A))$  vaut

$$\frac{1}{|Z_h|} \sum (-1)^i \text{Tr}((Fh^{-1})^*, H_c^i(V, \mathbb{Q}_\ell))$$

(un élément de  $\mathbb{Z}_\ell$ ), et

$$\text{Tr}(F^*, R\Gamma_c(U, \mathcal{G})) = \sum_h^I \frac{1}{|Z_h|} \text{Tr}((Fh^{-1})^*, H_c^i(V, \mathbb{Q}_\ell)) \cdot \text{Tr}_\Lambda(h, M). \quad (5.12.1)$$

## 5.13

Il reste maintenant à appliquer 5.4 (noter que si  $\bar{V}$  est la complétion projective non singulière de  $V$ , les points fixes de  $Fh^{-1}$  sont tous de multiplicité un). On peut le faire sans aucun calcul :

A. Si  $U^F = \emptyset$ ,  $\text{Tr}(F^*, R\Gamma_c(U, \mathcal{G})) = 0$ .

En effet,  $Fh^{-1}$  n'a pas de point fixe sur  $V$ , 5.4 montre que  $\sum (-1)^i \text{Tr}((Fh^{-1})^*, H_c^i(V, \mathbb{Q}_\ell)) = 0$  et on applique (5.12.1).

B. Dans le cas général, soit  $j : U' = U \setminus U^F \hookrightarrow U$ . La filtration  $j_!j^*\mathcal{G}_0 \subset \mathcal{G}_0$  de  $\mathcal{G}_0$  induit une filtration de  $R\Gamma_c(U, \mathcal{G})$  de quotients successifs  $R\Gamma_c(U', \mathcal{G})$  et  $R\Gamma_c(U^F, \mathcal{G})$ . D'après (4.4.1) et 5.1, on a

$$\text{Tr}(F^*, R\Gamma_c(U, \mathcal{G})) = \text{Tr}(F^*, R\Gamma_c(U', \mathcal{G})) + \sum_{x \in U^F} \text{Tr}(F^*, \mathcal{G}_x),$$

et, puisque  $U'^F = \emptyset$ , le premier terme au second membre est 0.

## 6 Fin de la preuve de 4.10

Prouvons 4.10, sous les hypothèses additionnelles que l'anneau  $\Lambda$  est annulé par une puissance d'un nombre premier  $\ell \neq p$ , et que  $n = 1$ . Le cas général en résultera : décomposer  $\Lambda$  en ses composantes  $\ell$ -primaires ( $\ell$  parcourant les nombre premiers), et remplacer  $\mathbb{F}_q$  par  $\mathbb{F}_{q^n}$ ,  $X_0$  par  $X_0 \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}_{q^n}$ .

Pour  $X_0$  séparé de type fini sur  $\mathbb{F}_q$ , et  $\mathcal{K}_0 \in \text{Ob } \mathbf{D}_{\text{ctf}}(X_0, \Lambda)$ , posons

$$T'(X_0, \mathcal{K}_0) = \sum_{x \in X^F} \text{Tr}(F^*, \mathcal{K}_x)$$

et

$$T''(X_0, \mathcal{K}_0) = \text{Tr}(F^*, \mathbf{R}\Gamma_c(X, \mathcal{K})).$$

Il faut prouver l'identité

$$(1; X_0, \mathcal{K}_0) \quad T'(X_0, \mathcal{K}_0) = T''(X_0, \mathcal{K}_0).$$

On commence par observer que  $T'$  et  $T''$  (notés génériquement  $T$ ) obéissent à un même formalisme :

(A) Si  $j : U_0 \hookrightarrow X_0$  est un ouvert de  $X_0$ , de fermé complémentaire  $Y_0$ , on a

$$T(X_0, \mathcal{K}_0) = T(U_0, \mathcal{K}_0|U_0) + T(Y_0, \mathcal{K}_0|Y_0).$$

C'est clair pour  $T'$ . Pour  $T''$ , on observe que la filtration  $0 \subset j_!j^*\mathcal{K}_0 \subset \mathcal{K}_0$  de  $\mathcal{K}_0$  induit une filtration de  $\mathbf{R}\Gamma_c(X, \mathcal{K})$ , de quotients successifs  $\mathbf{R}\Gamma_c(U, \mathcal{K})$  et  $\mathbf{R}\Gamma_c(Y, \mathcal{K})$ , et on invoque (4.4.1) (plus exactement énoncé :  $\mathcal{K}_0$ , muni de la filtrations dite, définit un objet de  $\mathbf{DF}(X, \Lambda)$  ; par application de  $\mathbf{R}\Gamma_c$ , on a déduit un objet de  $\mathbf{DF}_{\text{parf}}(\Lambda)$ , auquel  $\mathbf{R}\Gamma_c(X, \mathcal{K})$  est sous-jacent, et de gradué comme dit).

(B) Si  $\mathcal{K}_0$  est un complexe borné à composantes constructibles et plates,

$$T(X_0, \mathcal{K}_0) = \sum (-1)^i T(X_0, \mathcal{K}^i).$$

C'est clair pour  $T'$  ; pour  $T''$ , on applique l'argument ci-dessus à la filtration bête de  $\mathcal{K}_0$ , pour obtenir

$$T''(X_0, \mathcal{K}_0) = \sum T''(X_0, \mathcal{K}_0^i[-i]) = \sum (-1)^i T''(X_0, \mathcal{K}_0^i).$$

(C) Pour  $f : X_0 \rightarrow Y_0$  un morphisme, on a

$$T''(X_0, \mathcal{K}_0) = T''(Y_0, \mathbf{R}f_!\mathcal{K}_0)$$

et la même identité vaut pour  $T'$  si les fibres de  $f$  aux points rationnels de  $Y_0$  vérifiant  $(1; f^{-1}(y), \mathcal{K}_0|f^{-1}(y))$  : on utilise que

$$T'(X_0, \mathcal{K}_0) = \sum_{y \in Y^F} T'(f^{-1}(y), \mathcal{K}_0|f^{-1}(y))$$

et

$$\mathbf{R}\Gamma_c(Y, \mathbf{R}f_!\mathcal{K}) = \mathbf{R}\Gamma_c(X, \mathcal{K}).$$

Utilisant ce formalisme, et 4.7, on ramène la preuve de 4.10 aux deux particuliers 5.1 et 5.2.

# Chapitre 3

## Fonctions $L$ modulo $\ell^n$ et modulo $p$

Dans cet exposé, je prouve une formule analogue au théorème du rapport sur la formule des traces (ce volume ; cité “Rapport” par la suite) pour un anneau de coefficients  $A$  qui soit de torsion premier à  $p$ , ou un corps de caractéristique  $p$ . Un usage essentiel sera fait de [AGV72, XVII 5.5].

### 1 Tenseurs symétriques

#### 1.1

Soit  $A$  un anneau commutatif. Pour une liste de propriétés des foncteurs  $\Gamma^n : (A\text{-modules}) \rightarrow (A\text{-modules})$ , je renvoie à [AGV72, XVII 5.5.1 et 2]. Rappelons seulement que pour  $M$  plat (en fait, seul le cas où  $M$  est projectif de type fini nous intéresse), on a

$$\Gamma^n M = (M^{\otimes n})^{S_n} \quad (\text{tenseurs symétriques de degré } n).$$

#### 1.2

Soient  $X$  un  $S$ -schéma,  $X^n/S$  la puissance fibrée  $n$ -ième de  $X$  et  $\pi$  la projection de  $X^n/S$  sur  $(X^n/S)/S_n = \text{Sym}_S^n(X)$  (supposé exister). Si  $\mathcal{G}$  est un faisceau de  $A$ -modules sur  $X$ , le produit tensoriel externe de  $n$  copies de  $\mathcal{G}$  ;  $\mathcal{G}^{\boxtimes n}$ , est un faisceau  $S_n$ -équivariant sur  $X^n/S$ . Nous aurons à faire usage du foncteur  $\Gamma^n$  *externe* de [AGV72, XVII 5.5.7 à 9]. Rappelons seulement que pour  $\mathcal{G}$  un faisceau de  $A$ -modules plats (en fait, seul le cas constructible et plat nous intéresse), on a

$$\Gamma_{\text{ext}}^n(\mathcal{G}) = \left( \pi_* \mathcal{G}^{\boxtimes n} \right)^{S_n}.$$

**Lemme 1.3.** *Pour  $S = \text{Spec}(k)$ , avec  $k$  algébriquement clos,  $X$  une somme finie de copies de  $S$ , et  $\mathcal{G}$  un faisceau plat de  $A$ -modules sur  $X$ , on a*

$$\Gamma(\text{Sym}_S^n(X), \Gamma_{\text{ext}}(\mathcal{G})) = \Gamma^n \Gamma(X, \mathcal{G})$$

En effet,

$$\begin{aligned} \Gamma(\text{Sym}_S^n(X), \Gamma_{\text{ext}}^n(\mathcal{G})) &= \Gamma\left(\text{Sym}_S^n(X), \pi_* \mathcal{G}^{\boxtimes n}\right)^{S_n} \\ &= \Gamma\left(X^n/S, \mathcal{G}^{\boxtimes n}\right)^{S_n} = (\Gamma(X, \mathcal{G})^{\otimes n})^{S_n} = \Gamma^n \Gamma(X, \mathcal{G}). \end{aligned}$$

#### 1.4

Nous aurons à utiliser les dérivés des foncteurs non additifs  $\Gamma^n$  et  $\Gamma_{\text{ext}}^n$ .



La théorie de tela foncteurs dérivés est due à Dold et Puppe [DP61]. Pour des rappels plus complets que ceux donnés ci-dessous, je renvoie à [AGV72, XVII 5.5.3].

Soit  $\mathcal{A}$  une catégorie abélienne (voire une catégorie additive où tout endomorphisme idempotent soit la projection sur un facteur direct). Notons  $N$  le foncteur de normalisation :  $N : (\text{complexes cosimpliciaux d'objets de } \mathcal{A}) \rightarrow (\text{complexes différentiables d'objets de } \mathcal{A}, \text{ avec } K^i \text{ pour } i < 0)$ . C'est une équivalence de catégories. Ainsi que son inverse, elle transforme homotopes en morphismes homotopes. Si  $\Gamma$  est un foncteur  $\mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ , et si  $K$  est un complexe d'objets de  $\mathcal{A}$ , à degrés positifs ( $K^i = 0$  pour  $i < 0$ ), on pose  $TK = NTN^{-1}K$ .

## 1.5 Exemple

Si  $K$  est réduit à  $M$  en degré 0,  $TK$  st réduit à  $TM$  en degré 0.

## 1.6

Si  $K$  est un complexe borné, à degrés positifs, de  $A$ -module projectifs de type fini, le complexe de  $A$ -modules  $\Gamma^n K$  a les mêmes propriétés.

Notons  $D_{\text{parf}}^{\geq 0}(A)$  la sous-catégorie de  $D_{\text{parf}}(A)$  (Rapport, 4.3) formée des complexes de tor-dimension  $\leq 0$ . On voit que  $\Gamma^n$  induit un foncteur

$$L\Gamma^n : D_{\text{parf}}^{\geq 0}(A) \rightarrow D_{\text{parf}}^{\geq 0}(A).$$

Pour la définition analogue, mais plus compliquée, de  $L\Gamma_{\text{ext}}^n$ , je renvoie à [AGV72, XVII 5.5.14].

## 1.7

Soient  $K$  un complexe borné de  $A$ -modules projectifs de type fini, et  $u$  un endomorphisme de  $K$ . On note  $\det(1 - ut, K)$  la série formelle de terme constant 1

$$\det(1 - ut, K) = \prod_i \det(1 - ut, K^i)^{(-1)^i}.$$

On laisse au lecteur la vérification des propriétés suivantes.

### 1.7.1

Soit  $F$  une filtration finie stable par  $u$ , telle que les  $\text{gr}_F^p(K^q)$  soient projectifs de type fini. Alors

$$\det(1 - ut, K) = \prod_p \det(1 - ut, \text{gr}_F^p(K)).$$

### 1.7.2

Si on translate  $K$  de  $q$  crans vers la gauche, on a

$$\det(1 - ut, K[q]) = \det(1 - ut, K)^{(-1)^q}.$$

**Proposition 1.8.** *Soit  $u$  un endomorphisme d'un complexe borné, à degrés positifs, de  $A$ -modules projectifs de type fini. On a*

$$\det(1 - ut, K)^{-1} = \sum_n \text{Tr}(u, \Gamma^n K) t^n. \quad (1.8.1)$$

Notons  $D(u, K)$  le second membre de (1.8.1).

**Lemme 1.9.** *Soit  $u$  un endomorphisme d'une suite exacte courte de complexes bornés à degrés  $\geq 0$  de  $A$ -modules projectifs de type fini*

$$0 \rightarrow K' \rightarrow K \rightarrow K'' \rightarrow 0.$$

*On a  $D(u, K) = D(u, K') \cdot D(u, K'')$ .*

Si  $0 \rightarrow M' \rightarrow M \rightarrow M'' \rightarrow 0$  est une suite exacte courte scindable de  $A$ -modules,  $\Gamma^n M$  a une filtration naturelle, de quotients successifs les  $\Gamma^i M' \otimes \Gamma^j M''$  ( $i + j = n$ ). Dès lors,  $\Gamma^n K$  admet une filtration naturelle, de quotients successifs les complexes  $N(N^{-1}\Gamma^i K' \otimes N^{-1}\Gamma^j K'')$  ( $i + j = n$ ), canoniquement homotopes aux complexes simples  $s(\Gamma^i K' \otimes \Gamma^j K'')$  déduit des complexes doubles  $\Gamma^i K' \otimes \Gamma^j K''$ , et

$$\mathrm{Tr}(u, \Gamma^n K) = \sum_{i+j=n} \mathrm{Tr}(u, \Gamma^i K') \cdot \mathrm{Tr}(u, \Gamma^j K''),$$

d'où le lemme. De 1.9, on tire par récurrence.

**Lemme 1.10.** *Soient  $F$  une filtration finie stable par  $u$  de  $K$ , telle que les  $\mathrm{gr}_F^p(K^q)$  soient projectifs de type fini. Alors,*

$$D(u, K) = \prod_p D(u, \mathrm{gr}_F^p(K)).$$

**Lemme 1.11.** *Soient  $u$  un endomorphisme d'un  $A$ -module projectif de type fini  $M$ , et  $M[-q]$  le complexe réduit à  $M$  en degré  $q$ . On a*

$$D(u, M[-q]) = \left( \sum \mathrm{Tr}(u, \Gamma^n M) t^n \right)^{(-1)^q} \quad (q \geq 0.)$$

D'après 1.5, c'est vrai pour  $q = 0$ . Précédons par récurrence, il reste à montrer que

$$D(u, M[-q]) \cdot D(u, M[-(q+1)]) = 1.$$

Cette formule résulte de 1.9, appliqué au complexe  $K$  réduit à  $M$  en degrés  $q$  et  $q+1$  (avec  $d = \mathrm{id}$ ), et à sa filtration bête :

$$(\cdots 0 \rightarrow M \cdots) \rightarrow (\cdots M \rightarrow M) \rightarrow (\cdots M \rightarrow 0 \rightarrow 0 \cdots).$$

En effet,  $K$  est homotope à 0. Dans la catégorie dérivée, on a donc  $\Gamma^n(K) = \Gamma^n(0)$  ; 0 pour  $n > 0$  et  $A$  pour  $n = 0$ , et  $D(u, K) = 1$ .

## 1.12

Prouvons 1.8. D'après 1.10 appliqué à la filtration "bête" de  $K$  par les sous-complexes

$$0 \rightarrow \cdots \rightarrow 0 \rightarrow K^q \rightarrow K^{q+1} \rightarrow \cdots,$$

on a

$$D(u, K) = \prod_q D(u, K^q[-q]) \stackrel{(1.10)}{=} \prod_q \left( \sum \mathrm{Tr}(u, \Gamma^n(K^q)) t^n \right)^{(-1)^q}.$$

Il reste à prouver que pour  $u$  un endomorphisme d'un module projectif de type fini  $M$ , on a

$$\det(1 - ut, M)^{-1} = \sum \mathrm{Tr}(u, \Gamma^n M) t^n. \quad (1.12.1)$$

Si  $u = 0$ , les deux membres valent 1. Ajoutant à  $M$  un module  $N$  sur lequel  $u = 0$ , et appliquant 1.9, on se ramène à supposer que  $M$  est libre. Prenons-en une base. Il s'agit alors de prouver des identités algébriques entre les coordonnées de  $u$ . Le principe de prolongement des identités algébriques nous ramène à supposer que  $A$  est un corps algébriquement clos. Le module  $M$  admet alors une filtration stable par  $u$  à quotients successifs de rang 1, et 1.10 nous ramène au cas où  $M$  est de rang 1. La formule (1.12.1) se ramène alors à l'identité

$$\frac{1}{1 - at} = \sum a^n t^n.$$

**Corollaire 1.13.** *Soient  $u$  et  $u'$  des endomorphismes de complexes bornés  $K$  et  $K'$  de  $A$ -modules projectifs de type fini. Si, dans la catégorie dérivée,  $K$ , muni de  $u$ , est isomorphe à  $K'$ , muni de  $u'$ , alors*

$$\det(1 - ut, K) = \det(1 - u't, K').$$

Appliquant 1.7.2, on se ramène à supposer que  $K$  et  $K'$  sont à degrés positifs. On observe alors que le second membre de 1.8 possède la propriété d'invariance voulue.

### 1.14

Ce corollaire permet de définir  $\det(1 - ut, K)$  pour  $u$  un endomorphisme de  $K \in \text{Ob } \mathbf{D}_{\text{parf}}(A)$ . Cette construction est ad hoc ; en fait, pour  $v$  un automorphisme de  $L \in \text{Ob } \mathbf{D}_{\text{parf}}(\Lambda)$ , on peut définir  $\det(v) \in \Lambda^\times$ , et  $\det(1 - ut, K)$  s'obtient pour  $v = 1 - ut$ ,  $\Lambda = A[[t]]$  et  $L = K \otimes_A \Lambda$ .

## 2 Le Théorème

### 2.1

Reprenons les notations de (Rapport, §1). Pour  $A$  un anneau noethérien commutatif de torsion,  $X_0$  un schéma séparé de type fini sur  $\mathbb{F}_q$  et  $\mathcal{K}_0 \in \text{Ob } \mathbf{D}_{\text{ctf}}(X_0; A)$ , on pose

$$L(X_0, \mathcal{K}_0) = \prod_{x \in |X_0|} \det \left( 1 - F_x^* t^{\deg(x)}, \mathcal{K} \right)^{-1}$$

(1.7, 1.13 et Rapport, 1.5, 1.6).

**Théorème 2.2.** *Dans chacun des deux cas suivants*

- a)  *$A$  est de torsion première à  $p$  ;*
- b)  *$A$  est réduit et de caractéristique  $p$*

on a

$$L(X_0, \mathcal{K}_0) = \det \left( 1 - F^* t^f, \mathbf{R}\Gamma_c(X, \mathcal{K}) \right)^{-1}. \quad (2.2.1)$$

### 2.3 Remarque

Dans le cas a), la méthode de Rapport, §3 permet de déduire de la formule des traces (Rapport 4.10) que les dérivées logarithmiques des deux membres de (2.2.1) sont égales. L'anneau  $A$  étant de torsion, cela ne suffit pas pour prouver 2.2.

### 2.4 Remarque

Si  $A$  est un corps, on a

$$L(X_0, \mathcal{K}_0) = \prod_i L(X_0, \underline{\mathbf{H}}^i(\mathcal{K}_0))^{(-1)^i}$$

et la suite spectrale  $E_2^{pq} = \mathbf{H}_c^p(X, \underline{\mathbf{H}}^q(\mathcal{K})) \Rightarrow \mathbf{H}_c^{p+q}(X, \mathcal{K})$  montre que

$$\begin{aligned} \det(1 - F^* t, \mathbf{R}\Gamma_c(X, \mathcal{K})) &= \prod_n \det(1 - F^* t^f, \mathbf{H}_c^n(X, \mathcal{K}))^{(-1)^n} \\ &= \prod_{p,q} \det(1 - F^* t, \mathbf{H}_c^p(X, \underline{\mathbf{H}}^q(\mathcal{K})))^{(-1)^{p+1}}. \end{aligned}$$

Ceci ramène 2.2 (pour  $A$  un corps) au cas particulier suivant.

#### 2.4.1

Si  $\mathcal{G}_0$  est un faisceau constructible de  $A$ -espaces vectoriels, on a

$$L(X_0, \mathcal{G}_0) = \prod_n \det(1 - F^* t^f, \mathbf{H}_c^n(X, \mathcal{G}))^{(-1)^{n+1}}.$$

### 2.5 Remarque

Il est facile de réduire le cas b) à celui où  $A$  est un corps (voire même un corps fini) de caractéristique  $p$ , cf. 4.2.

## 2.6 Remarque

Le cas particulier de b) où  $A = \mathbb{Z}/p$ , et où  $X$  est réduit su faisceau constant  $\mathbb{Z}/p$  est degré 0 ;

$$Z(X_0, t) = \prod_{x \in |X_0|} \left(1 - t^{\deg(x)}\right)^{-1} \equiv \prod_n \det \left(1 - F^* t^f, H_c^n(X, \mathbb{Z}/p)\right)^{(-1)^{n+1}} \pmod{p}$$

avait été prouvé par N. Katz [DGK73, XXII 3.1]. Sa méthode, toute différente de celle suivie ici, part de la théorie  $p$ -adique de Dwork de  $Z(X_0, t)$ .

## 2.7 Remarque

Contrairement à ce que j'avais imprudemment affirmé à des amis, on ne peut pas dans b) omettre l'hypothèse “ $A$  réduit.” Pour un contre exemple, cf. 4.5.

## 2.8 Plan de la preuve de 2.2

Une translation sur les degrés 1.7.2 nous ramène à supposer que  $\mathcal{K}_0$  est un complexe borné, à degré positifs, de faisceaux de  $A$ -modules constructibles et plats. On a alors  $R\Gamma_c(X, \mathcal{K}) \in \text{Ob } D_{\text{parf}}^{\geq 0}(A)$  (Rapport, preuve 4.9, b). Nous allons utiliser 1.8 pour développer les deux membres de (2.2.1) en série de puissances de  $T = t^f$ . L'égalité des coefficients de  $T^n$  de déduira de [AGV72, XVII 5.5.21] et d'une formule des traces sur  $\text{Sym}^n(X)$  ; dans le cas a), le formule (Rapport, 4.10), et dans le cas b) une formule qui sera prouvée dans le chapitre suivant. Il y a lieu de se ramener au préalable au cas où les puissances symétriques de  $X_0$  existent (par exemple au cas où  $X$  est affine) à l'aide des propriétés de multiplicativité en  $X_0$  des deux membres de (2.2.1) : pour  $U_0$  un ouvert de  $X_0$ , de fermé complémentaire  $Y_0$ , on a  $L(X_0, \mathcal{K}_0) = L(U_0, \mathcal{K}_0) \cdot L(Y_0, \mathcal{K}_0)$  et la formule analogue pour le membre de droite résulte de 1.7.1 par la méthode de (Rapport §6A).

## 2.9 Le cas où $X_0$ est fini

La multiplicativité en  $X_0$  des deux membres de (2.2.1) ramène ce cas à celui où  $X_0 = \text{Spec}(\mathbb{F}_{q^k})$ . Revenant aux définitions, on voit que (2.2.1) équivaut alors à Rapport 3.4.

## 2.10 Le premier membre

D'après 1.8, on a

$$L(X_0, \mathcal{K}_0) = \prod_{x \in |X_0|} \sum_n \text{Tr}(F_x^*, \Gamma^n \mathcal{K}) t^{n \deg(x)}.$$

Le coefficient de  $T^n$  est donc la somme, étendue à celles des combinaisons linéaires formelles  $\sum_{x \in |X_0|} n_x \cdot x$  ( $n_x \geq 0$ , les  $n_x$  presque tous nuls) d'éléments de  $|X_0|$  telles que  $\sum n_x [k(x) : \mathbb{F}_q] = n$ , des produits

$$\prod_x \text{Tr}(F_x^*, \Gamma^{n_x} \mathcal{K}). \quad (2.10.1)$$

Pour  $x \in |X_0|$ , notons  $(x)$  le 0-cycle des  $[k(x) : \mathbb{F}_q]$  points de  $X$  au-dessus de  $x$  (une orbite de  $F$ ). L'application  $\sum n_x \cdot \mapsto \sum n_x \cdot (x)$  identifie les combinaisons linéaires formelles comme ci-dessus, avec  $\sum n_x [k(x) : \mathbb{F}_q] = n$ , aux 0-cycles effectifs de degré  $n$  de  $X$  fixes sous  $F$ , soit encore aux points fixes de  $F$  dans  $\text{Sym}^n(X)$ . Le coefficient de  $T^n$  dans  $L(X_0, \mathcal{K}_0)$  apparait ainsi comme une somme de produits (2.10.1), indenée par  $\text{Sym}^n(X)^F$ . Plus précisément,

**Lemme 2.11.**  $L(X_0, \mathcal{K}_0) = \sum_n \sum_{x \in \text{Sym}^n(X)^F} \text{Tr}(F_x^*, L\Gamma_{\text{ext}}^n \mathcal{K}) T^n.$

Pour  $Y_0$  un sous-schéma fini de plus en plus grand de  $X_0$ , on a

$$L(X_0, \mathcal{K}_0) = \lim L(Y_0, \mathcal{K}_0),$$

i.e., pour tout  $m$ , il existe un sous-schéma fini  $Z_0 \subset X_0$  tel que si  $Y_0 \supset Z_0$ ,  $L(X_0, \mathcal{K}_0)$  et  $L(Y_0, \mathcal{K}_0|Y_0)$  soient congrus mod  $T^m$ . Il suffit que  $Z_0$  contienne les points fermés de degré  $\leq m$ . Le même fait valant pour le membre de droite, il suffit de prouver 2.11 pour  $X_0$  fini. On a alors

$$\begin{aligned} L(X_0, \mathcal{K}_0) &=_{2.9} \det(1 - F^*T, \Gamma(X, \mathcal{K}))^{-1} \\ &=_{1.8} \sum_n \text{Tr}(F^*, \Gamma^n \Gamma(X, \mathcal{K})) T^n \\ &=_{1.3} \sum_n \text{Tr}(F^*, \Gamma(\text{Sym}^n(X), \Gamma_{\text{ext}}^n(\mathcal{K}))) T^n \\ &= \sum_n \sum_{x \in \text{Sym}^n(X)^F} \text{Tr}(F_x^*, \Gamma_{\text{ext}}^n(\mathcal{K})) T^n \end{aligned}$$

(par la formule des traces dans le cas trivial d'un ensemble fini).

## 2.12 Le second membre

D'après 1.8 et [AGV72, XVII 5.5.12], on a

$$\begin{aligned} \det(1 - F^*T, R\Gamma_c(X, \mathcal{K}))^{-1} &= \sum_n \text{Tr}(F^*, L\Gamma^n R\Gamma_c(X, \mathcal{K})) T^n \\ &= \sum_n \text{Tr}(F^*, R\Gamma_c(\text{Sym}^n(X), \Gamma_{\text{ext}}^n(\mathcal{K}))) T^n. \end{aligned}$$

## 2.13

Le théorème équivaut donc aux formules des traces

$$\text{Tr}(F^*, R\Gamma_c(\text{Sym}^n(X, \Gamma_{\text{ext}}^n(\mathcal{K}))) = \sum_{x \in \text{Sym}^n(X)^F} \text{Tr}(F_x^*, \Gamma_{\text{ext}}^n(\mathcal{K})).$$

Dans le cas a), elles résultent de Rapport 4.10. La formule analogue dans le cas b) sera prouvée au §4.

# 3 Théorie d'Artin-Scheier

## 3.1

Dans ce qui suit, un faisceau cohérent sur un schéma  $S$  sera toujours regardé comme un faisceau sur  $S_{\text{ét}}$ . Soit  $S$  un schéma de caractéristique  $p > 0$ . Si  $G$  un faisceau localement constant de  $\mathbb{Z}/p$ -vectoriels de rang fini,  $\mathcal{G} = G \otimes_{\mathbb{Z}/p} \mathcal{O}$  est un faisceau cohérent localement libre sur  $S$ . On notera  $\Phi$  tant l'endomorphisme  $f \mapsto f^p$  de  $\mathcal{O}$  que son produit tensoriel avec l'identité de  $G$  :  $\phi : \mathcal{G} \rightarrow \mathcal{G}$ . La théorie d'Artin-Scheier [AGV72, IX 3.5] affirme que la suite

$$0 \longrightarrow \mathbb{Z}/p \longrightarrow \mathcal{O} \xrightarrow{\Phi-1} \mathcal{O} \longrightarrow 0$$

est exacte. Par tensorisation avec  $G$ , on trouve une suite exacte

$$0 \longrightarrow G \longrightarrow \mathcal{G} \xrightarrow{\Phi-1} \mathcal{G} \longrightarrow 0$$

## 3.2

Supposons que  $S$  soit un ouvert dans un schéma noethérien  $\bar{S}$ . Soient  $j : S \hookrightarrow \bar{S}$  le morphisme d'inclusion, et  $I$  un faisceau d'idéaux qui définit le fermé complémentaire  $\bar{S} \setminus S$ . Notons encore  $\Phi$  le prolongement par fonctorialité de  $\Phi$  à  $j_*\mathcal{G}$ .

**Lemme 3.3.** *Il existe des prolongements cohérents  $\bar{\mathcal{G}} \subset j_*\mathcal{G}$  de  $\mathcal{G}$  tels que*

$$\Phi(\bar{\mathcal{G}}) \subset I \cdot \bar{\mathcal{G}}. \quad (3.3.1)$$

*Si  $\bar{\mathcal{G}}$  est un tel prolongement, la suite*

$$0 \longrightarrow j_!G \longrightarrow \bar{\mathcal{G}} \xrightarrow{\Phi-1} \bar{\mathcal{G}} \longrightarrow 0 \quad (3.3.2)$$

*est exacte.*

- a) *Existence* : Soit  $\mathcal{G}' \subset j_*\mathcal{G}$  un prolongement cohérent de  $\mathcal{G}$  à  $\bar{S}$ . Pour tout  $n$ , on a  $\Phi(I^n\mathcal{G}') \subset I^{p^n}\Phi(\mathcal{G}')$ . Soit  $n$  assez grand pour que  $I^{n(p-1)-1}\Phi(\mathcal{G}') \subset \mathcal{G}'$ , et posons  $\bar{\mathcal{G}} = I^n\mathcal{G}'$ . On a  $\Phi(\bar{\mathcal{G}}) \subset I^{pn}\Phi(\mathcal{G}') = I \cdot I^n \cdot I^{n(p-1)-1}\Phi(\mathcal{G}') \subset I \cdot I^n\mathcal{G}' = I\bar{\mathcal{G}}$ .
- b) *Noyau de  $\Phi - 1$*  : Sur  $S$ , l'assertion résulte de 3.1 ; il reste à vérifier qu'une section de  $x$  de  $\ker(\Phi - 1)$ , sur  $U$  étale sur  $\bar{S}$ , s'annule dans un voisinage de l'image réciproque de  $\bar{S} \setminus S$ . Puisque  $x = \Phi(x)$ , on a en effet par (3.3.1)  $x \in I\bar{\mathcal{G}}$  ; de plus,  $x \in I^n\bar{\mathcal{G}} \Rightarrow x = \Phi(x) \in \Phi(I^n\bar{\mathcal{G}}) \subset I^{np}\bar{\mathcal{G}}$ , et  $x$  est dans tous les  $I^n\bar{\mathcal{G}}$ , donc nul au voisinage de  $\bar{S} \setminus S$ .
- c) *Surjectivité de  $\Phi - 1$*  : On peut supposer  $\bar{S}$  affine, en écrire  $\mathcal{G}$  comme quotient de  $\mathcal{O}^n$  ;  $\Phi$  se relève alors en une application  $p$ -linéaire  $\tilde{\Phi} : \mathcal{O}^n \rightarrow \mathcal{O}^n$ , et il suffit de vérifier la surjectivité de  $\tilde{\Phi} - 1$  :

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{O}^n & \xrightarrow{\tilde{\Phi}-1} & \mathcal{O}^n \\ \downarrow & & \downarrow \\ \mathcal{G} & \xrightarrow{\Phi-1} & \mathcal{G} \end{array}$$

Le faisceau  $\mathcal{O}^n$  est le faisceau des sections locales du schéma en groupes  $\mathbb{G}_a^n$ , et  $\tilde{\Phi} - 1$  est induit par un homomorphisme  $\mathbb{G}_a^n$  dans  $\mathbb{G}_a^n$ . Cet homomorphisme est étale. Pour vérifier qu'il est surjectif, il suffit de le voir après tout changement de base  $\text{Spec}(k) \rightarrow \bar{S}$  ( $k$  algébriquement clos) et sur  $k$  algébriquement clos, tout homomorphisme étale entre groupes connexes de même dimension est surjectif. Enfin, un morphisme étale et surjectif de  $\bar{S}$ -schémas induit un épimorphisme entre les faisceaux correspondant sur  $\bar{S}_{\text{ét}}$ .

### 3.4 Frobenius et Frobenius

Le morphisme de Frobenius absolu  $F_{\text{abs}} : S \rightarrow S$  est l'identité sur l'espace topologique sous-jacent à  $S$ , et  $f \mapsto f^p$  sur le faisceau structural. Pour  $U/S$  étale, on a un isomorphisme canonique  $F_{\text{abs}}^*U = U$  : le diagramme

$$\begin{array}{ccc} U & \xrightarrow{F_{\text{abs}}} & S \\ \downarrow & & \downarrow \\ S & \xrightarrow{F_{\text{abs}}} & S \end{array}$$

est cartésien. L'endomorphisme de site annelé  $(\bar{S}_{\text{ét}}, \mathcal{O}) \rightarrow (\bar{S}_{\text{ét}}, \mathcal{O})$  défini par  $F_{\text{abs}}$  peut donc être décrit comme suit :

$F_{\text{abs}}^*$  est l'identité sur  $S_{\text{ét}}$  ; l'homomorphisme  $F_{\text{abs}}^*\mathcal{O} = \mathcal{O} \rightarrow \mathcal{O}$  est  $\Phi$ .

Avec cette description, pour tout faisceau étale  $\mathcal{G}$  sur  $S$ , la correspondance de Frobenius  $F_{\text{abs}}^*\mathcal{G} \rightarrow \mathcal{G}$  est l'identité.

Se donner un morphisme  $p$ -linéaire de faisceaux quasi-cohérents  $u : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$  sur  $S$  revient à se donner un morphisme linéaire  $u' : F_{\text{abs}}^*\mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ . En particulier, avec les notations de 3.5, l'homomorphisme  $\Phi : \mathcal{G} \rightarrow \mathcal{G}$  correspond à  $\Phi' : F_{\text{abs}}^*\mathcal{G} \rightarrow \mathcal{G}$ .

**Lemme 3.5.** *Avec les notations de 3.4, le diagramme*

$$\begin{array}{ccc} F_{\text{abs}}^*G & \longrightarrow & G \\ \downarrow & & \downarrow \\ F_{\text{abs}}^*\mathcal{G} & \xrightarrow{\Phi'} & \mathcal{G} \end{array}$$

est commutatif.

Il suffit de le vérifier localement. On peut donc supposer  $G$  constant, auquel cas le lemme est évident. La même théorie vaut pour les puissances de  $F_{\text{abs}}$ .

### 3.6

Supposons maintenant que  $\bar{S}$  soit un schéma sur  $\mathbb{F}_q$  ( $q = p^f$ ) et conformément aux conventions de Rapport §1, écrivons  $S_0, \bar{S}_0, G_0, \mathcal{G}_0, \bar{\mathcal{G}}_0$  au lieu de  $S, \dots$ . Le lemme 3.5, pour  $F_{\text{abs}}^F : S_0 \rightarrow S_0$ , donne un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc} F^*G_0 & \longrightarrow & G_0 \\ \downarrow & & \downarrow \\ F^*\mathcal{G}_0 & \xrightarrow{(\Phi^f)'} & \mathcal{G}_0 \end{array} \quad , \text{ puis } \quad \begin{array}{ccc} F^*(j_!G_0) & \longrightarrow & j_!G_0 \\ \downarrow & & \downarrow \\ F^*\bar{\mathcal{G}}_0 & \xrightarrow{(\Phi^f)'} & \bar{\mathcal{G}}_0 \end{array}$$

puis, par extension des scalaires de  $\mathbb{F}_q$  à  $\mathbb{F}$  et passage à la cohomologie

$$\begin{array}{ccc} F^*(j_!G) & \xrightarrow{F^*} & j_!G \\ \downarrow & & \downarrow \\ F^*\bar{\mathcal{G}} & \longrightarrow & \bar{\mathcal{G}} \end{array} \quad \text{et} \quad \begin{array}{ccc} H^\bullet(\bar{S}, j_!G) & \xrightarrow{F^*} & H^\bullet(\bar{S}, j_!G) \\ \downarrow & & \downarrow \\ H^\bullet(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}}) & \longrightarrow & H^\bullet(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}}) \end{array}$$

où la seconde ligne est obtenue par extension des scalaires de  $\mathbb{F}_q$  à  $\mathbb{F}$  de l'endomorphisme  $\mathbb{F}_q$ -linéaire  $\Phi^f$  de  $H^\bullet(\bar{S}_0, \bar{\mathcal{G}}_0)$ .

La théorie d'Artin-Scheier fournit une suite exacte longue

$$\dots \longrightarrow H^i(\bar{S}, j_!G) \longrightarrow H^i(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}}) \xrightarrow{\Phi-1} H^i(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}}) \longrightarrow \dots$$

où  $\Phi$  est l'extension  $p$ -linéaire à  $H^\bullet(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}}) = H^\bullet(\bar{S}_0, \bar{\mathcal{G}}_0) \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}$  de l'endomorphisme  $p$ -linéaire  $\Phi$  de  $H^\bullet(\bar{S}_0, \bar{\mathcal{G}}_0)$ .

### 3.7

Si  $\bar{S}_0$  est propre sur  $\mathbb{F}_q$ , les  $H^i(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}})$  sont de dimension finie et  $\Phi - 1$  est surjectif (cf. 3.6b). On a donc

$$H_c^i(S, G) = \ker(\Phi - 1 : H^i(\bar{S}, \bar{G}) \rightarrow H^i(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}})),$$

et  $F^*$  est induit par l'extension  $\mathbb{F}$ -linéaire à  $H^i(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}}) = H^i(\bar{S}_0, \bar{\mathcal{G}}_0) \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}$  de l'endomorphisme  $\mathbb{F}_q$ -linéaire  $\Phi^f$  de  $H^i(\bar{S}_0, \bar{\mathcal{G}}_0)$ .

Appliquant le lemme 3.8 ci-dessous, on en déduit l'identité

$$\text{Tr}(F^*, H_c^i(S, G)) = \text{Tr}(\Phi^f, H^i(\bar{S}_0, \bar{\mathcal{G}}_0)). \quad (3.7.1)$$

**Lemme 3.8.** Soit  $\Phi$  un endomorphisme  $p$ -linéaire d'un espace vectoriel  $V$  sur  $\mathbb{F}_q$  :  $\phi(\lambda x) = \lambda^p \phi(x)$ . On pose  $F = \Phi^f$  ( $F$  est linéaire) et on note encore  $\Phi$  et  $F$  les extensions respectivement  $p$ -linéaire de  $\Phi$  et  $F$  à  $V \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}$ . Alors,  $F$  stabilise  $\ker(\Phi - 1) \subset V \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}$  et

$$\text{Tr}(F, \ker(\Phi - 1)) = \text{Tr}(F, V) = \text{Tr}(F, V \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}).$$

Sur  $V \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}$ , on a  $F\Phi = \Phi F$  : l'endomorphisme  $p$ -linéaire  $F\Phi - \Phi F$  s'annule sur  $V$ , donc partout. Écrivons  $V = V' + V''$ , avec  $F$  inversible sur  $V'$  et nilpotent sur  $V''$ . La théorie des endomorphismes  $p$ -linéaires assure que

$$\ker(\Phi - 1) \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F} \xrightarrow{\sim} V' \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}.$$

Puisque  $\text{Tr}(F, V'') = 0$ , on a donc

$$\begin{aligned} \text{Tr}(F, \ker(\Phi - 1)) &= \text{Tr}(F, \ker(\Phi - 1) \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}) = \text{Tr}(F, V' \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}) \\ &= \text{Tr}(F, V \otimes_{\mathbb{F}_q} \mathbb{F}) = \text{Tr}(F, V). \end{aligned}$$

## 4 Formule des traces modulo $p$

**Théorème 4.1.** *Soient  $X_0$  un schéma séparé de type fini sur  $\mathbb{F}_q$ ,  $A$  un anneau noethérien commutatif réduit et de caractéristique  $p$ , et  $\mathcal{K}_0 \in \text{Ob } \mathbf{D}_{\text{ctf}}(X_0, A)$ . On a*

$$\sum_{x \in X^F} \text{Tr}(F_x^*, \mathcal{K}_x) = \text{Tr}(F^*, \text{R}\Gamma_c(X, \mathcal{K})). \quad (4.1.1)$$

### 4.2 Réduction au cas où $A$ est un corps fini

Un argument standard de passage à la limite nous ramène au cas où  $A$  est de type fini sur  $\mathbb{Z}/p$ . Pour chaque idéal maximal  $\mathfrak{m}$  de  $A$ , l'image de chaque membre de (4.1.1) dans  $A/\mathfrak{m}$  est donnée par la même formule, avec  $\mathcal{K}_0$  remplacé par  $\mathcal{K}_0 \otimes_A A/\mathfrak{m} \in \text{Ob } \mathbf{D}_{\text{ctf}}(X_0, A/\mathfrak{m})$  (pour le second membre, cf. Rapport 4.12). Les  $A/\mathfrak{m}$  étant finis, et l'intersection des idéaux maximaux de  $A$  étant réduit à 0, on obtient la réduction annoncée.

### 4.3 Réduction au cas où $A = \mathbb{Z}/p$

Supposons que  $A$  soit un corps fini, et notons  $T'_A(\mathcal{K}_0)$  et  $T''_A(\mathcal{K}_0)$  les deux membres de (4.1.1). Si, par restriction des scalaires, on regarde  $\mathcal{K}_0$  comme un complexe de faisceaux de  $\mathbb{Z}/p$ -modules, on a

$$T'_{\mathbb{Z}/p}(\mathcal{K}_0) = \text{Tr}_{A/(\mathbb{Z}/p)} T'_A(\mathcal{K}_0)$$

et de même pour  $T''$ . Si (4.1.1) vaut pour  $A = \mathbb{Z}/p$ , on a donc

$$\text{Tr}_{A/(\mathbb{Z}/p)} T'_A(\mathcal{K}_0) = \text{Tr}_{A/(\mathbb{Z}/p)} T''_A(\mathcal{K}_0). \quad (4.3.1)$$

J'affirme que, pour tout  $\lambda \in A$ , on a même

$$\text{Tr}_{A/(\mathbb{Z}/p)} (\lambda \cdot T'_A(\mathcal{K}_0)) = \text{Tr}_{A/(\mathbb{Z}/p)} (\lambda \cdot T''_A(\mathcal{K}_0)), \quad (4.3.2)$$

et donc  $T'_A(\mathcal{K}_0) = T''_A(\mathcal{K}_0)$ . C'est clair pour  $\lambda = 0$ . Pour  $\lambda$  inversible, notons  $A(\lambda)$  l'image réciproque sur  $X$  du faisceau de  $A$ -modules libre de rang un sur  $\text{Spec}(\mathbb{F}_q)$  pour lequel  $F^* = \lambda$ . La formule (4.3.2) n'est autre que (4.3.1) pour  $A(\lambda) \otimes_A \mathcal{K}_0$ .

**Théorème 4.4.** *Soient  $\bar{S}_0$  une courbe projective et lisse,  $j : S_0 \hookrightarrow \bar{S}_0$  un ouvert dense de  $\bar{S}_0$ , et  $G_0$  un faisceau localement constant de  $\mathbb{Z}/p$ -espaces vectoriels de rang fini sur  $S_0$ . On a*

$$\sum_{x \in S^F} \text{Tr}(F_x^*, G_x) = \sum_i (-1)^i \text{Tr}(F^*, H_c^i(S, G)). \quad (4.4.1)$$

*Démonstration.* Appliquons 3.3 à  $(S_0, \bar{S}_0, G_0)$ . Le prolongement cohérent  $\bar{\mathcal{G}}_0$  de  $\mathcal{G}_0$  dont 3.3 garantit l'existence est localement libre car il est sans torsion (on  $\bar{\mathcal{G}}_0 \subset j_* \mathcal{G}_0$ ) et que  $\bar{S}_0$  est régulier de dimension un. L'endomorphisme  $q$ -linéaire  $\Phi^f$  de  $\bar{\mathcal{G}}_0$  peut s'interpréter comme un morphisme

$$u : F^* \bar{\mathcal{G}}_0 \rightarrow \bar{\mathcal{G}}_0.$$

Il se factorise par  $I\bar{G}$ , pour  $I$  définissant le fermé  $\bar{S} \setminus S$ . Soit  $v : j_! G_0 \rightarrow \bar{\mathcal{G}}_0$  l'unique prolongement de l'application naturelle  $G_0 \rightarrow \mathcal{G}_0 = G_0 \otimes_{\mathbb{Z}/p} \mathcal{O}$ . Le diagramme

$$\begin{array}{ccc} F^* j_! G_0 & \xrightarrow{F^*} & j_! G_0 \\ \downarrow F^* v & & \downarrow v \\ F^* \bar{\mathcal{G}}_0 & \xrightarrow{u} & \bar{\mathcal{G}}_0 \end{array} \quad (4.4.2)$$

Enfin, notons  $uF^*$  l'application composée

$$H^\bullet(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}}) \xrightarrow{F^*} H^\bullet(\bar{S}, F^* \bar{\mathcal{G}}) \xrightarrow{u} H^\bullet(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}}),$$



on par (3.7.1)

$$\mathrm{Tr}(F^*, H_c^i(S, G)) = \mathrm{Tr}(uF^*, H^i(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}})). \quad (4.4.3)$$

Pour chaque point fermé  $i_x : x \hookrightarrow \bar{S}$  de  $\bar{S}$ , posons  $\bar{\mathcal{G}}_x = i_x^* \bar{\mathcal{G}}$ . La formule des traces de Lefschetz en cohomologie cohérente (“Woodshole fixed point formula”), appliqué à  $F$  et  $u$ , dit que

$$\sum_i (-1)^i \mathrm{Tr}(u^* F^*, H^i(\bar{S}, \bar{\mathcal{G}})) = \sum_{x \in \bar{S}^F} \frac{\mathrm{Tr}(u_x, \bar{\mathcal{G}}_x)}{\det(1 - dF_x)}. \quad (4.4.4)$$

Au second membre

- a) puisque  $dF = 0$ , les dénominateurs valent 1 ;
- b) pour  $x \in \bar{S}^F \setminus S^F$ , l'endomorphisme  $u_x$  de  $\bar{\mathcal{G}}_x$  est nul, donc aussi  $\mathrm{Tr}(u_x, \bar{\mathcal{G}}_x)$  ;
- c) pour  $x \in S^F$ , (4.4.4) fournit une contribution

$$\mathrm{Tr}(u_x, \bar{\mathcal{G}}_x) = \mathrm{Tr}(F_x^*, G_x).$$

L'identité (4.4.1) résulte donc de (4.4.3) et (4.4.4). □

## 4.5 Un contre-exemple

On montre par un exemple qu'on ne peut pas, dans 4.1, omettre l'hypothèse que  $A$  soit réduit.

Soit  $Y_0$  la courbe elliptique sur  $\mathbb{F}_2$  pour laquelle les valeurs propres de Frobenius sont  $\pm\sqrt{-2}$ . Elle a 3 points rationnels, et est supersingulière. L'involution  $\sigma : x \mapsto -x$  n'a donc qu'un seul point fixe, le point 0. Le quotient de  $Y_0$  par  $\sigma$  est une droite projective ; celui de  $Y_0 \setminus 0$  par  $\sigma$  est donc une droite affine  $\mathbb{F}_0^1$ , et  $Y_0 \setminus 0$  est un revêtement double non ramifié de  $\mathbb{F}_0^1$  :

$$\pi : Y_0 \setminus 0 \rightarrow \mathbb{A}_0^1, \quad \pi = \pi\sigma.$$

Le faisceau  $\pi_* \mathbb{Z}/2$  est un module libre de rang un sur l'algèbre  $A$  du groupe à deux éléments  $\{1, \sigma\}$  sur  $\mathbb{Z}/2$ . Cette algèbre est isomorphe à celle des nombres sur  $\mathbb{Z}/2$ .

Le faisceau de  $A$ -modules  $\pi_* \mathbb{Z}/2$  est notre exemple :

- a) On a  $H_c^\bullet(\mathbb{A}^1, \pi_* \mathbb{Z}/2) = H_c^\bullet(Y \setminus 0, \mathbb{Z}/2)$ . Puisque  $Y_0$  est supersingulière, on a  $H^i(Y, \mathbb{Z}/2) = 0$  pour  $i > 0$ , et la suite exacte longue

$$\cdots \rightarrow H_c^i(Y \setminus 0, \mathbb{Z}/2) \rightarrow H^i(Y, \mathbb{Z}/2) \rightarrow H^i(\{0\}, \mathbb{Z}/2) \rightarrow \cdots$$

montre que  $H_c^\bullet(Y \setminus 0, \mathbb{Z}/2) = 0$ . On a donc  $H_c^\bullet(\mathbb{A}^1, \pi_* \mathbb{Z}/2) = 0$  et

$$\mathrm{Tr}_A(F^*, \mathrm{R}\Gamma_c(\mathbb{A}^1, \pi_* \mathbb{Z}/2)) = 0.$$

- b) Puisque  $Y_0 \setminus 0$  a deux points rationnels, en l'un des points rationnels de  $\mathbb{A}_1^0$ , la substitution de Frobenius est l'identité, et en l'autre, c'est  $\sigma$ . On a donc

$$\sum_{x \in \mathbb{A}^1 F} \mathrm{Tr}(F^*, \pi_* \mathbb{Z}/2) = 1 + \sigma,$$

et  $1 + \sigma \neq 0$ .

L'équation du revêtement  $\pi$  est  $y^2 - y = x^3$ .

# Chapitre 4

## La classe de cohomologie associée à un cycle

Cet exposé est inspiré de notes de Grothendieck, qui formaient un état 0 de [Gro66, IV]. On y définit la classe de cohomologie d'un cycle  $X$  dans un schéma séparé lisse de type fini sur un corps et on prouve que l'intersection correspond au cup-produit.

Le Chapitre 1 contient quelques sorites généraux. Au Chapitre 2, on définit la classe d'un cycle, dans plusieurs situations plus générales que celle dite plus haut. La principale compatibilité non considérée est celle entre image directe d'un cycle et morphisme trace en cohomologie. Au Chapitre 3, on déduit de ce formalisme la formule des traces de Lefschetz pour un endomorphisme à points fixes isolés d'un schéma propre et lisse sur  $k$  algébriquement clos – et pour un endomorphisme de Frobenius d'une courbe.

Nous faisons les conditions suivantes :

- 1) “schéma” signifie schéma noethérien séparé (ceci est largement un hypothèse de commodité).
- 2) Dans le Chapitre 2, on fixe un entier  $n$ , et  $n$  est inversible sur tous les schémas considérés.
- 3) Dans le Chapitre 3, on fixe un nombre premier  $\ell$ , et  $\ell$  est inversible sur tout les schémas considérés. La cohomologie utilisée est toujours la cohomologie  $\ell$ -adique :

$$H^\bullet(X) = \mathbb{Q}_\ell \otimes_{\mathbb{Z}_\ell} \varprojlim H^\bullet(X, \mathbb{Z}/\ell^n).$$

Classes de cohomologie de cycles, morphismes traces, ... sont définis par passage à limite à partir du cas de coefficients finis  $\mathbb{Z}/\ell^n$  (cf. [Gro66, VI]).

### 1 Cohomologie à support et cup-produits

Ce paragraphe contient des rappels de topologie générale, que le lecteur est invité à ne consulter qu'au fur et à mesure des besoins.

#### 1.1 $H^1$ et toiseurs

##### 1.1.1

Soit  $\mathcal{F}$  un faisceau abélien sur un site  $X$ . On sait que  $H^1(X, \mathcal{F})$  classe les  $\mathcal{F}$ -torseurs sur  $X$ . Nous normaliserons (=choisirons le signe) de l'isomorphisme (ensemble des classes d'isomorphisme de  $F$ -torseurs)  $\rightarrow H^1(X, \mathcal{F})$  de telle sorte que pour toute suite exacte  $0 \rightarrow \mathcal{F} \xrightarrow{\alpha} \mathcal{G} \xrightarrow{\beta} \mathcal{H} \rightarrow 0$  et tout  $h \in H^0(X, \mathcal{H})$ , le  $\mathcal{F}$ -torseur  $\beta^{-1}(h) \subset \mathcal{G}$ , sur lequel  $F$  agit par  $(f, x) \mapsto \alpha(f) + x$ , soit de classe  $\partial h$ .

**1.1.2**

Soit  $\mathcal{P}$  un  $\mathcal{F}$ -torseur. Si  $(U_i)$  est un recouvrement ouvert de  $X$ , et  $p_i$  un section de  $\mathcal{P}$  sur  $U_i$ , on associe à  $\mathcal{P}$  le cocycle de Čech

$$p_{ij} = p_j - p_i \quad (p_{ij} \in H^0(U_i \times U_j, \mathcal{F})).$$

Si, selon la règle usuelle, on définit l'application  $\check{H}^\bullet(X, \mathcal{F}) \rightarrow H^\bullet(X, \mathcal{F})$  de telle sorte que ce soit un morphisme de  $\delta$ -foncteurs, l'image de  $(p_{ij}) \in \check{H}^1(X, \mathcal{F})$  dans  $H^1(X, \mathcal{F})$  est la classe de  $\mathcal{P}$ , telle que normalisée par 1.1.1.

**1.1.3**

La définition de  $H^\bullet(X, \mathcal{F})$  est la suivante : pour  $\mathcal{F}^\bullet$  une résolution à composantes acycliques de  $\mathcal{F}$ ,  $H^i(X, \mathcal{F}) = H^i \Gamma(X, \mathcal{F}^\bullet)$ . La structure de  $\delta$ -foncteur s'obtient en associant à une suite exacte courte de faisceaux une suite exacte courte de résolutions qui reste exacte après application du foncteur  $\Gamma$ . Si  $\mathcal{F}^\bullet$  est une résolution de  $\mathcal{F}$ , l'homomorphisme de connection  $\partial$  associé à

$$0 \longrightarrow \mathcal{F} \longrightarrow \mathcal{F}^0 \xrightarrow{d} \ker(d) \longrightarrow 0$$

induit l'opposé de l'isomorphisme de définition  $H^1(X, \mathcal{F}) = \Gamma(X, \ker(d)) / d\Gamma(X, \mathcal{F}^0)$ .

**1.1.4**

Soit  $U$  une partie ouverte de  $X$  (un sous-faisceau du faisceau final) et soit  $D$  le “fermé complémentaire.” On sait que  $H_D^1(X, \mathcal{F})$  classe les  $\mathcal{F}$ -torseurs sur  $X$ , trivialisés sur  $U$ . Pour toute suite exacte courte  $0 \rightarrow \mathcal{F} \xrightarrow{\alpha} \mathcal{G} \xrightarrow{\beta} \mathcal{H} \rightarrow 0$ , et toute section à support dans  $D$   $h \in H_D^0(X, \mathcal{H})$ , le toseur  $\beta^{-1}(h)$ , trivialisé sur  $U$  par la section 0, a pour classe  $\partial h$ .

La suite exacte longue de cohomologie à support

$$\dots \xrightarrow{\partial} H_D^i(X, \mathcal{F}) \longrightarrow H^i(X, \mathcal{F}) \longrightarrow H^i(U, \mathcal{F}) \xrightarrow{\partial} \dots$$

est définie à partir de la suite de foncteurs

$$0 \longrightarrow \Gamma_D \longrightarrow \Gamma \longrightarrow \Gamma(U, -) \longrightarrow 0$$

(exacte sur les faisceaux injectifs). Pour toute section  $f \in H^0(U, \mathcal{F})$ ,  $\partial f \in H_D^1(X, \mathcal{F})$  est la classe du toseur trivial  $\mathcal{F}$ , trivialisé sur  $U$  par la section  $f$ .

**1.1.5**

Soit  $j : U \hookrightarrow X$ . Si  $\mathcal{F}$  s'injecte dans  $j_* j^* \mathcal{F}$ , la suite exacte

$$0 \longrightarrow \mathcal{F} \longrightarrow j_* j^* \mathcal{F} \longrightarrow j_* j^* \mathcal{F} / \mathcal{F} \longrightarrow 0$$

fournit  $\partial : H^0(j_* j^* \mathcal{F} / \mathcal{F}) = H_D^0(j_* j^* \mathcal{F} / \mathcal{F}) \rightarrow H_D^1(X, \mathcal{F})$ . L'application composée

$$H^0(U, \mathcal{F}) = H^0(X, j_* j^* \mathcal{F}) \longrightarrow H^0(X, j_* j^* \mathcal{F} / \mathcal{F}) \xrightarrow{\partial} H_D^1(X, \mathcal{F})$$

est l'opposée de l'application considérée en 1.1.4.

**1.1.6**

On rappelle que si  $\mathcal{L}$  est un faisceau inversible sur un schéma  $X$ , le  $\mathbb{G}_m$ -torseur correspondant est le faisceau  $\text{Isom}(\mathcal{O}, \mathcal{L})$ , sur lequel  $\mathbb{G}_m$  agit par  $(\lambda, f) \mapsto f \circ (\lambda \cdot) = \lambda f$ . On rappelle aussi que si  $D$  est un diviseur de Cartier sur  $X$ , et  $j : U \hookrightarrow X$  l'inclusion d'ouvert complémentaire, le faisceau inversible  $\mathcal{O}(D)$  est le sous-faisceau de  $j_* \mathcal{O}_U$  formé des sections locales  $s$  telles que  $sf$  soit dans  $\mathcal{O}_X$ , pour  $f$  une équation locale de  $D$ .

## 1.2 Cup-produits

Dans ce numéro, nous développons quelques remarques sur les cup-produits en cohomologie à support qui nous réserverons, dans [Dualité], pour relier dualité de Poincaré des courbes et autodualité de la jacobienne.

### 1.2.1

Soient  $X$  un site,  $Y$  une partie fermée de  $X$ , et  $\mathcal{F}, \mathcal{G}$  deux faisceaux abéliens sur  $X$ . Par exemple :  $X$  un schéma,  $Y$  un sous-schéma fermé et  $\mathcal{F}, \mathcal{G}$  des faisceaux sur  $X_{\text{ét}}$ . Définissons un produit

$$\Gamma_Y(X, \mathcal{F}) \otimes \Gamma(Y, \mathcal{G}) \rightarrow \Gamma_Y(X, \mathcal{F} \otimes \mathcal{G}). \quad (1.2.1.1)$$

Le produit d'une section  $s$ , à support dans  $Y$ , de  $\mathcal{F}$  par une section  $t$  de  $\mathcal{G}$  sur  $Y$  s'obtient comme suit : localement sur  $X$ ,  $t$  est la restriction à  $Y$  d'une section  $t'$  de  $\mathcal{G}$  sur  $X$ , et on forme le produit  $s \otimes t'$ . Il est à support dans  $Y$ , et ne dépend pas du choix de  $t'$ , ce qui légitime et permet de globaliser la définition.

Soit  $i : Y \hookrightarrow X$  le morphisme d'inclusion. L'analogue local de (1.2.1.1) est le produit.

$$i^! \mathcal{F} \otimes i^* \mathcal{G} \rightarrow i^! (\mathcal{F} \otimes \mathcal{G}), \quad (1.2.1.2)$$

dont (1.2.1.1) se déduit par application de  $\Gamma(Y, -)$ .

### 1.2.2

Dérivons ces flèches. Soient  $\mathcal{K}, \mathcal{L}$  et  $\mathcal{M}$  dans la catégorie dérivée, et une application bilinéaire  $\mathcal{K} \otimes^{\mathbb{L}} \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{M}$ . Par dérivation de (1.2.1.1), on en déduit

$$\mathrm{R}\Gamma_Y(X, \mathcal{K}) \otimes^{\mathbb{L}} \mathrm{R}\Gamma(Y, \mathcal{L}) \rightarrow \mathrm{R}\Gamma_Y(X, \mathcal{M}) \quad (1.2.2.1)$$

induisant

$$\mathrm{H}_Y^i(X, \mathcal{K}) \otimes \mathrm{H}^j(Y, \mathcal{L}) \rightarrow \mathrm{H}_Y^{i+j}(X, \mathcal{M}) \quad (1.2.2.2)$$

(le cup-produit). La flèche locale (1.2.1.2) fournit

$$\mathrm{R}i^! \mathcal{K} \otimes^{\mathbb{L}} i^* \mathcal{L} \rightarrow \mathrm{R}i^! \mathcal{M}, \quad (1.2.2.3)$$

dont (1.2.2.1) se déduit par application de  $\mathrm{R}\Gamma(Y, -)$ .

### 1.2.3

Ci-dessus, j'ai passé sous silence les conflits qu'entraîne l'usage dans une même formule de dérivations à droite ( $\mathrm{R}\Gamma$ ) et à gauche ( $\otimes^{\mathbb{L}}$ ).

- a) Au numéro suivant, les dérivés droits considérés seront tous de dimension cohomologique finie. Ceci permet de travailler systématiquement dans les catégories dérivées  $\mathrm{D}^-$ . Pour disposer de complexes à la fois plats et flasques, on utilise les résolutions flasques canoniques comme en [AGV72, XVII].
- b) Pour une théorie plus générale, il cesse d'être d'interpréter les applications bilinéaires de  $\mathcal{K}$  et  $\mathcal{L}$  dans  $\mathcal{M}$  comme des morphismes de  $\mathcal{K} \otimes^{\mathbb{L}} \mathcal{L}$  dans  $\mathcal{M}$ . Par exemple,  $\mathrm{R}\Gamma_Y(X, \mathcal{K}) \otimes^{\mathbb{L}} \mathrm{R}\Gamma(Y, \mathcal{L})$  n'est pas défini si des deux facteurs sont dans  $\mathrm{D}^+$ . Une solution est de travailler dans  $\mathrm{D}^+$ , de définir

$$\mathrm{Bil}(\mathcal{K}, \mathcal{L}; \mathcal{M}) = \varinjlim \mathrm{hom}(\mathcal{K}' \otimes \mathcal{L}', \mathcal{M}'),$$

où la limite est prise sur les quasi-isomorphismes  $\mathcal{K}' \xrightarrow{\sim} \mathcal{K}, \mathcal{L}' \xrightarrow{\sim} \mathcal{L}, \mathcal{M} \xrightarrow{\sim} \mathcal{M}'$  ( $\mathcal{K}', \mathcal{L}', \mathcal{M}'$  bornés inférieurement) et où  $\mathrm{hom}$  est pour "morphisme de complexes, à homotopie près," et d'utiliser systématiquement de telles applications bilinéaires, sans jamais mentionner de  $\otimes$ .

### 1.2.4 Deuxième thème

Soit  $U$  un ouvert de  $X$  et  $j : U \hookrightarrow X$  le morphisme d'inclusion. Pour  $\mathcal{K}$  dans la catégorie dérivée, sur  $U$ , on pose  $R\Gamma_!(U, \mathcal{K}) = R\Gamma(X, j_! \mathcal{K})$ . Pour  $\mathcal{K}, \mathcal{L}$  et  $\mathcal{M}$  sur  $U$ , et une application bilinéaire  $\mathcal{K} \otimes^L \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{M}$ , on veut définir

$$R\Gamma(U, \mathcal{K}) \otimes^L R\Gamma_!(U, \mathcal{L}) \rightarrow R\Gamma_!(U, \mathcal{M}). \quad (1.2.4.1)$$

Au niveau des faisceaux, et de leurs sections globales, un tel produit se déduit de l'isomorphisme  $j_* \mathcal{F} \otimes j_! \mathcal{G} \xleftarrow{\sim} j_!(\mathcal{F} \otimes \mathcal{G})$ , mais il faut prendre garde au fait que  $R\Gamma_!$  n'est en général pas le dérivé du foncteur  $\Gamma(X, j_! -)$ .

On commence par définir

$$Rj_* \mathcal{K} \otimes^L j_! \mathcal{L} \xleftarrow{\sim} j_!(\mathcal{K} \otimes^L \mathcal{L}) \longrightarrow j_! \mathcal{M}.$$

Appliquant  $R\Gamma(X, -)$ , on trouve

$$R\Gamma(U, \mathcal{K}) \otimes^L R\Gamma_!(U, \mathcal{L}) = R\Gamma(X, Rj_* \mathcal{K}) \otimes^L R\Gamma(X, j_! \mathcal{L}) \longrightarrow R\Gamma(X, j_! \mathcal{M}).$$

Ici encore, le conflit entre la gauche et la droite se résoudra au numéro suivant en travaillant dans  $D^-$ .

### 1.2.5 Coda

Soient  $j : U \hookrightarrow X$  une partie ouverte et  $i : Y \hookrightarrow U$  une partie fermée de  $U$ . Soit  $\bar{Y}$  une fermé de  $X$  tel que  $\bar{Y} \cap U = Y$ , (par exemple, le complément de  $U \setminus Y$ ). Soit  $\mathcal{K}$  sur  $U$ . On pose  $R\Gamma_{Y!}(U, \mathcal{K}) = R\Gamma_!(Y, Ri^! \mathcal{K})$  où  $R\Gamma_!$  est relatif à l'inclusion de  $Y$  dans  $\bar{Y}$ . Pour tout ouvert  $V$  de  $U$ , contenant  $Y$ ,  $R\Gamma_{Y!}(U, \mathcal{K})$  s'envoie dans  $R\Gamma_!(V, \mathcal{K})$  : si on note encore  $i$  l'inclusion de  $\bar{Y}$  dans  $X$ ,  $j$  celle de  $Y$  dans  $\bar{Y}$  et  $k$  celle de  $V$  dans  $X$ , on a  $Ri^! \mathcal{K} = j^* Ri^! k_!(k^* \mathcal{K})$ , d'où un morphisme  $j_! Ri^! \mathcal{K} \rightarrow Ri^! k_!(k^* \mathcal{K})$ . Lui appliquant  $R\Gamma(\bar{Y}, -)$ , on trouve  $R\Gamma_{Y!}(U, \mathcal{K}) \rightarrow R\Gamma_{\bar{Y}}(k_! k^* \mathcal{K}) \rightarrow R\Gamma(k_! k^* \mathcal{K}) = R\Gamma_!(V, \mathcal{K})$ .

Pour  $\mathcal{K}, \mathcal{L}, \mathcal{M}$  sur  $U$ , et une application bilinéaire  $\mathcal{K} \otimes^L \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{M}$ , on veut définir

$$H^n(U, \mathcal{K}) \otimes H_!^m(Y, \mathcal{L}) \rightarrow H_{Y!}^{n+m}(U, \mathcal{M}) \quad (1.2.5.1)$$

(ce dernier groupe lui-même s'envoyant dans  $H_!^{n+m}(V, \mathcal{M})$ ). Dans la catégorie dérivée, il s'agit de définir

$$R\Gamma_Y(U, \mathcal{K}) \otimes^L R\Gamma_!(Y, \mathcal{L}) \rightarrow R\Gamma_{Y!}(U, \mathcal{M}). \quad (1.2.5.2)$$

On identifie  $R\Gamma_Y$  à  $R\Gamma(Y, Ri^! \mathcal{K})$ . Le produit cherché est alors du type (1.2.4.1) relatif au produit locale (1.2.2.3) sur  $Y : Ri^! \mathcal{K} \otimes^L \mathcal{L} \rightarrow Ri^! \mathcal{M}$ .

### 1.2.6

Ci-dessus, on a déroulé le sorite absolu. On a un sorite relatif parallèle, avec  $\Gamma$  remplacé par  $f_*$  par  $f$  un morphisme  $X \rightarrow S$ .

## 1.3 La règle de Koszul

Soient  $A$  un anneau commutatif, et  $(V_i)_{i \in I}$  une famille finie de  $A$ -modules gradués (ou  $\mathbb{Z}/2$ -gradués). Rappelons la définition du produit tensoriel gradué  $\bigotimes_{i \in I} V_i$ , au sens de la règle de Koszul (cf. [AGV72, XVII 1.1]). Pour chaque ordre total  $a$  sur  $I$ , on va définir un module  $V(a)$ . On va aussi définir un système transitif d'isomorphismes  $\varphi_{ab} : V(b) \xrightarrow{\sim} V(a)$  et le produit tensoriel gradué des  $V_i$  sera la "valeur commune"  $\varprojlim V(a)$  de ce système de modules. On prend

- a)  $V(a) = \bigotimes_{i \in I} |V_i|$  (produit-tensoriel ordinaire des modules non gradués sous-jacents aux  $V_i$ ).
- b) si les  $x_i \in V_i$  sont homogènes, on prend  $\varphi_{ab}(\otimes x_i) = (-1)^N \otimes x_i$ , où  $N$  est la somme des  $\deg(x_i) \deg(x_j)$  étendue aux couples  $(i, j)$  tels que  $i <_a j$  et  $i >_b j$ .

**Exemple 1**

Prenons  $I = \{1, 2\}$  et soient  $a$  l'ordre où  $1 < 2$ ,  $b$  l'ordre où  $1 > 2$ . Soient  $v_i \in V_i$ , homogènes, et notons  $v_1 \otimes v_2$  (resp.  $v_2 \otimes v_1$ ) l'image dans le produit tensoriel gradué du produit des  $v_i$  dans  $V(a)$  (resp.  $V(b)$ ). On a

$$v_1 \otimes v_2 = (-1)^{\deg(v_1) \deg(v_2)} v_2 \otimes v_1$$

(règle de Koszul).

**Exemple 2**

Si les  $V_i$  sont tous de degré 1, on a, reliant le module sous-jacent au produit tensoriel gradué, et le produit tensoriel ordinaire des modules  $|V_i|$  sous-jacents aux  $V_i$ , un isomorphisme canonique

$$\left| \bigotimes V_i \right| \simeq \bigotimes |V_i| \otimes_{\mathbb{Z}} \bigwedge^{|I|} \mathbb{Z}^I.$$

**Exemple 3**

Pour  $A$  un corps, et  $X_i$  une famille finie d'espaces, la formule de Künneth s'écrit  $H^\bullet(\prod X_i, A) = \bigotimes H^\bullet(X_i, A)$ .

Soit  $V^\vee$  le dual gradué de  $V$ . L'application canonique

$$V^\vee \otimes V = V \otimes V^\vee \rightarrow A \quad (1.3.1)$$

est  $v' \otimes v \rightarrow v'(v)$ .

On suppose maintenant que  $A$  est un corps, et on ne considère que des espaces vectoriels de dimension finie. L'isomorphisme canonique

$$W \otimes V^\vee \rightarrow \text{hom}(V, W) \quad (1.3.2)$$

est  $w \otimes v' \mapsto (v \mapsto w \cdot v'(v))$ . Via cet isomorphisme, la composition  $\text{hom}(Y, Z) \otimes \text{hom}(X, Y) \rightarrow \text{hom}(X, Z)$  s'identifie au morphisme induit par (1.3.1) :  $Z \otimes Y^\vee \otimes Y \otimes X^\vee \rightarrow Z \otimes X^\vee$ .

La trace de  $f : V \rightarrow V^\vee$  (nulle pour  $f$  homogène de degré  $\neq 0$ ) est l'image de  $f$  par

$$\text{Tr} : \text{hom}(V, V) \xleftarrow{(1.3.2)} V \otimes V^\vee = V^\vee \otimes V \xrightarrow{(1.3.1)} A. \quad (1.3.4)$$

On vérifie aisément que, pour  $f$  de degré 0,

$$\text{Tr}(f, V) = \sum (-1)^i \text{Tr}(f, V^i). \quad (1.3.5)$$

Si on exprime que les deux morphismes composés de morphismes (1.3.1)  $V^\vee \otimes V \otimes W^\vee \otimes W \rightarrow k$  commutent, on trouve que, pour  $f : V \rightarrow W$  et  $g : W \rightarrow V$  homogènes, on a

$$\text{Tr}(fg) = (-1)^{\deg(f) \deg(g)} \text{Tr}(gf). \quad (1.3.6)$$

## 2 La classe de cohomologie associée à un cycle

### 2.1 La classe d'un diviseur

#### 2.1.1

Soit  $D$  un diviseur de Cartier dans un schéma  $X$ . Hors de  $D$ , le faisceau inversible  $\mathcal{O}(D)$  est trivialisé par la section 1. La classe  $\text{cl}(D)$  de  $D$ , dans  $H_D^1(X, \mathbb{G}_m)$ , est la classe du  $\mathbb{G}_m$ -torseur trivialisé sur  $X \setminus D$  correspondant (1.1.6 et 1.1.4).

Soit  $\partial : H^i(X \setminus D, \mathbb{G}_m) \rightarrow H_D^i(X, \mathbb{G}_m)$  le morphisme 1.1.4. Si  $D$  admet une équation globale  $f$ , la multiplication par  $f$  est un isomorphisme de  $\mathcal{O}(D)$ , trivialisé par 1 sur  $X \setminus D$ , avec  $\mathcal{O}$ , trivialisé par  $f$  sur  $X \setminus D$ . D'après 1.1.4, on a donc

$$\text{cl}(D) = \partial f. \quad (2.1.1)$$

Pour tout morphisme  $u : X' \rightarrow X$  tel que  $u^*D$  soit encore un diviseur de Cartier (i.e.,  $u^{-1}D$  disjoint de  $\text{Ass}(X')$ ), on a  $\text{cl}(u^*D) = u^* \text{cl}(D)$ . Si on voulait une telle fonctorialité pour tout morphisme  $u$ , il faudrait considérer non pas des diviseurs de Cartier, mais plus généralement des faisceaux inversibles munis d'une section.

Rappelons que l'entier  $n$  est dorénavant supposé inversible sur les schémas considérés. Soit  $\partial : H_D^i(X, \mathbb{G}_m) \rightarrow H_D^{i+1}(X, \mu_n)$  le cobord pour la suite exacte de Kummer  $0 \rightarrow \mu_n \rightarrow \mathbb{G}_m \rightarrow \mathbb{G}_m \rightarrow 0$ .

**Définition 2.1.2.** La classe  $\text{cl}_n(D)$  de  $D$  dans  $H_D^2(X, \mu_n)$  est  $\partial \text{cl}(D)$ .

Quand il n'y aura pas de risque de confusion, on omettra la mention de  $n$ .

### 2.1.3

Le diagramme

$$\begin{array}{ccc} H^0(X \setminus D, \mathbb{G}_m) & \xrightarrow{\partial} & H_D^1(X, \mathbb{G}_m) \\ \downarrow \partial & & \downarrow \partial \\ H^1(X \setminus D, \mu_n) & \xrightarrow{\partial} & H_D^2(X, \mu_n) \end{array}$$

est anticommutatif. Si  $D$  admet une équation globale  $f$ ,  $\text{cl}_n(D)$  est donc l'opposé de l'image par  $\partial$  de la classe dans  $H^1(X \setminus D, \mu_n)$  de  $\mu_n$ -torseur des racines  $n$ -ièmes de  $f$ .

**Proposition 2.1.4.** Soit  $i$  l'inclusion de  $D$  dans  $X$ . Si  $D$  et  $X$  sont réguliers, les faisceaux de cohomologie à support  $R^p i^! \mu_n$  sont nuls pour  $p = 0, 2$ , et  $R^2 i^! \mu_n = \mathbb{Z}/n$ , engendré par  $\text{cl}_n(D)$ .

Il suffit de prouver que, pour  $X$  strictement locale et  $D$  défini par un paramètre régulier, on a  $H_D^p(X, d\mu_n) = 0$  pour  $p = 0, 1$  et  $H^2(X, \mu_n) = \mathbb{Z}/n$  engendré par  $\text{cl}(D)$ . Notant par  $\sim$  la cohomologie réduite, on a  $\tilde{H}^{p-1}(X \setminus D, \mu_n) \xrightarrow{\sim} H_D^p(X, \mu_n)$ . L'assertion pour  $p = 0, 1$  exprime que  $D$  ne disconnecte pas  $X$ , et pour  $p = 2$  résulte, via 2.1.3, du lemme d'Abhyankar.

Ceci est un analogue partiel du théorème relatif (Cohomologie étale, 5.3.4). Grothendieck conjecture que les  $R^p i^! \mu_n$  sont nuls pour  $p \neq 2$ , du moins pour  $X$  excellent (conjecture de pureté), mais ceci n'est connu qu'en caractéristique 0 ([AGV72, XIX]).

**Théorème 2.1.5** (Compatibilité fondamentale). Soient  $X$  une courbe lisse sur un corps algébriquement clos  $k$ ,  $P$  un point fermé de  $X$  et  $\text{Tr}$  le composé  $H_P^2(X, \mu_n) \rightarrow H_c^2(X, \mu_n) \xrightarrow{\text{Tr}} \mathbb{Z}/n$ . On a

$$\text{Tr} \text{cl}(P) = 1.$$

Soit  $\bar{X}$  la courbe projective et lisse complétant  $X$ . La formule exprime que le faisceau inversible  $\mathcal{O}(P)$  sur  $\bar{X}$  est de degré 1.

## 2.2 Méthode cohomologique

### 2.2.1

Soit  $X$  un schéma (noethérien). Rappelons qu'un sous-schéma  $Y$  de  $X$  est dit d'intersection complète locale, de codimension  $c$ , si, localement (sur  $Y$ ), il est défini par une suite régulière de  $c$  équations dans  $X$ . Pour  $X$  le spectre d'un anneau local  $A$  d'idéal maximal  $\mathfrak{m}$  et  $Y$  d'idéal  $\mathfrak{a}$ , cela signifie que  $\exp^i(A/\mathfrak{a}, A) = 0$  pour  $i < \dim(\mathfrak{a}/\mathfrak{m}\mathfrak{a}) = c$ , et toute suite d'éléments de  $\mathfrak{a}$ , d'image dans  $\mathfrak{a}/\mathfrak{m}\mathfrak{a}$  une base de  $\mathfrak{a}/\mathfrak{m}\mathfrak{a}$ , est une suite régulière d'équations pour  $Y$ .

### 2.2.2

Soit  $i : Y \hookrightarrow X$  d'intersection complète locale, de codimension  $c$ . On se propose de définir une classe fondamentale locale  $\text{cl}(Y)$  qui soit une section globale du faisceau de cohomologie à support  $R^{2c} i^! \mathbb{Z}/n(c)$  (rappelons que  $\mathbb{Z}/n(c) = \mu_n^{\otimes c}$ ).

Localement,  $Y$  est l'intersection d'une suite de  $c$  diviseurs  $D_i$ , et on définit  $\text{cl}(Y)$  comme le cup-produit des  $\text{cl}(D_i)$ . Chaque  $\text{cl}(D_i)$  est à support dans  $D_i$ , leur produit est à support dans  $Y$ . Que, localement, ce produit ne dépende pas du choix des  $D_i$ , résulte de 2.2.3 ci-dessous et des propriétés d'invariance suivantes :

- a) compatibilité à la localisation ;
- b) indépendance de l'ordre des  $D_i$  (les  $\text{cl}(D_i)$  sont de degré 2, pair, donc le cup-produit est commutatif) ;
- c) le produit ne dépend que du "drapeau"  $D_1 \supset D_1 \cap D_2 \supset \cdots \supset Y$ .

Pour prouver c), on note l'existence d'un produit (variante de 1.2.1)

$$H_{D_1}^\bullet(X) \otimes H_{D_1 \cap D_2}^\bullet(D_1) \otimes \cdots \otimes H_Y^\bullet(D_1 \cap \cdots \cap D_{c-1}) \rightarrow H_Y^\bullet(X) ;$$

le produit des  $\text{cl}(D_i)$  est encore le produit des  $(\text{cl}(D_i) \text{ restreint à } D_1 \cap \cdots \cap D_{i-1}) = (\text{cl}(D_1 \cap \cdots \cap D_i) \text{ dans } D_1 \cap \cdots \cap D_{i-1})$ .

**Lemme 2.2.3.** *Soient  $A$  un anneau local d'idéal maximal  $\mathfrak{m}$  et  $u = (u_1, \dots, u_c)$ ,  $v = (v_1, \dots, v_c)$  deux suites régulières engendrant le même idéal  $\mathfrak{a}$ . Il existe alors une suite  $w_i$  ( $1 \leq i \leq N$ ) de telles suites, les reliant, telle que  $w_{i+1}$  se déduise de  $w_i$  par une permutation, ou en ne changeant que le dernier élément.*

Puisqu'on dispose des permutations, il reviendrait au même de se permettre de changer un seul élément, plutôt que le dernier. Par 2.2.1, on se ramène alors à vérifier que, dans l'espace vectoriel  $\mathfrak{a}/\mathfrak{m}\mathfrak{a}$ , on peut passer d'une base à une autre par une suite de permutations et de changements de base ne modifiant qu'un seul vecteur. Le groupe linéaire est en effet engendré par les matrices diagonales, élémentaires et de permutation.

## 2.2.4

Les mêmes méthodes permettent de définir une classe fondamentale locale pour tout  $Y \subset X$  localement définissable par  $c$  équations (la où moins d'équations suffisent, la classe est nulle).

## 2.2.5

On peut passer d'une telle classe fondamentale locale, dans  $H^0(Y, R^{2c}i^!\mathbb{Z}/n(c))$ , à une classe fondamentale globale, dans  $H_Y^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c))$ , lorsqu'on dispose de résultats de semi-pureté :

**Proposition 2.2.6.** (i) *Si  $R^pi^!\mathbb{Z}/n = 0$  pour  $p < 2c$ , alors*

$$H_Y^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c)) \xrightarrow{\sim} H^0(Y, R^{2c}i^!\mathbb{Z}/n(c)) .$$

(ii) *Soit  $Z$  une partie fermée de  $Y$ , de complément  $V$  dans  $Y$ , et  $k$  l'inclusion de  $Z$  dans  $X$ . Si  $R^pi^!\mathbb{Z}/n = 0$  pour  $p \leq 2c$ , alors*

$$H_Y^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c)) \hookrightarrow H_V^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c)) .$$

*Si  $R^pi^!\mathbb{Z}/n = 0$  pour  $p \leq 2c + 1$ , cette flèche est une isomorphisme.*

L'hypothèse  $R^pi^!\mathbb{Z}/n = 0$  équivaut à  $R^pi^!\mathbb{Z}/n(c) = 0$ . Ceci dit, (i) se lit sur la suite spectrale  $H^p(Y, R^qi^!) \Rightarrow H_Y^{p+q}(X, -)$ . Si  $k_1$  l'inclusion de  $Z$  dans  $Y$ , on a  $k = ik_1$ , d'où  $Rk^!\mathbb{Z}/n = Rk_1^!Ri^!$ , et la suite exacte longue de cohomologie pour  $Z \subset Y$  fournit une suite exacte longue

$$\cdots \longrightarrow H^i(Z, Rk^!\mathbb{Z}/n(c)) \longrightarrow H_Y^i(X, \mathbb{Z}/n(c)) \longrightarrow H_V^i(X, \mathbb{Z}/n(c)) \longrightarrow \cdots$$

dont (ii) résulte.

## 2.2.7 Amplification

La proposition 2.2.6 reste valable pour  $i$  un quelconque morphisme séparé de type fini, et  $2c$  un entier (positif ou négatif) quelconque, pour autant qu'on y remplace  $H_Y^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c))$  par  $H^{2c}(Y, Ri^!\mathbb{Z}/n(c))$ , et de même pour  $H_V$ .

Les résultats de semi-pureté suivants résultent de [GR05, 1.8, 1.10, 1.15]. Nous rappellerons leur preuve.



**Théorème 2.2.8.** *Soit un morphisme de  $S$ -schémas de type fini*

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{i} & X \\ & \searrow f & \downarrow g \\ & & S \end{array}$$

On suppose  $X$  lisse, purement de dimension relative  $N$  et que  $Y$  est fibre par fibre de dimension  $\leq d$ . Soit  $c = N - d$ .

- (i) On a  $R^p i^! \mathbb{Z}/n = 0$  pour  $p < 2c$ ; de même pour  $\mathbb{Z}/n$  remplacé par un faisceau  $g^* \mathcal{F}$ .
- (ii) Si, au dessus d'un ouvert dense  $U$  de  $S$ ,  $Y$  est fibre par fibre de dimension  $< d$ , on a  $R^p i^! \mathbb{Z}/n = 0$  pour  $p \leq 2c$ . Si de plus le complément  $Z$  de  $U$  ne disconnecte pas localement  $S$ , on a  $R^p i^! \mathbb{Z}/n = 0$  pour  $p \leq 2c + 1$ .

Puisque  $Rg^! \mathcal{F} = g^* \mathcal{F}(N)[2N]$ , la formule de transitivité  $Ri^! Rg^! = Rf^!$  montre que  $R^{2c+q} i^! (g^* \mathcal{F}) = 0 \Leftrightarrow R^{-2d+q} f^! (\mathcal{F})$ . Ceci nous ramène à étudier  $f$ , i.e. à supposer que  $X = S$ . L'assertion (i) est alors [AGV72, XVIII 3.17].

Soit  $Y'$  l'image inverse de  $Z$  dans  $Y$  :

$$\begin{array}{ccc} Y' & \xrightarrow{v} & Y \\ \downarrow f & & \downarrow f \\ Z & \xrightarrow{u} & S \end{array}$$

D'après (i), les  $R^p f^! \mathbb{Z}/n$  sont à support dans  $Y'$  pour  $p \leq -2d + 1$ ; et la suite spectrale  $R^a v^! R^b f^! \Rightarrow R^{a+b} (fv)^!$  montre qu'ils coïncident avec les  $R^p (fv)^! \mathbb{Z}/n = R^p (uf)^! \mathbb{Z}/n$ . Appliquant (i) à  $Y'/Z$  et à la suite spectrale  $R^a f^! R^b u^! \Rightarrow R^{a+b} (uf)^!$ , on trouve que (ii) résulte de la nullité de  $R^b u^! \mathbb{Z}/n$  pour  $b = 0$ , ou  $b = 0$  et 1 selon le cas.

### 2.2.9

Grothendieck conjecture l'analogie absolu suivant de 2.2.8 (conjecture de semi-pureté – une conséquence de la conjecture de pureté) : pour  $Y$  de codimension  $\geq c$  dans  $X$  régulier, on a  $H_Y^i(X, \mathbb{Z}/n) = 0$  pour  $i < 2c$ , tout au moins si  $X$  est excellent.

### 2.2.10

On est maintenant à pied d'œuvre pour définir la classe d'un cycle  $Y$  de codimension  $c$  dans  $X$  lisse sur un corps  $k$ . On écrit  $Y = \sum d_i Y_i$ , où les  $Y_i$  sont réduits irréductibles. Un ouvert  $U_i$  de  $Y_i$ , de complémentaire de codimension  $> c$ , est alors d'intersection complète locale dans  $X$ . Ceci permet de définir la classe fondamentale locale de  $U_i$ . D'après 2.2.6 et 2.2.8, celle-ci provient d'une unique classe fondamentale  $\text{cl}(Y_i) \in H_{Y_i}^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c))$ , et on pose

$$\text{cl}(Y) = \sum d_i \text{cl}(Y_i) \in H_{|Y|}^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c)).$$

### 2.2.11

En géométrie analytique complexe, une construction de Baum, Fulton et Mac Pherson [BFM75] permet de définir sans restriction la classe de cohomologie d'une intersection complète locale  $Y \subset X$ . Supposons  $Y$  purement de codimension  $c$ , et soit  $\mathcal{N}$  le fibré vectoriel sur  $Y$  fibré normal de  $Y$  dans  $X$ . Ses sections locales sont celles de  $(\mathcal{I}/\mathcal{I}^2)^\vee$ , d'où  $\mathcal{I}$  est le faisceau d'idéaux de  $Y$ . Rappelons que le faisceau des fonctions  $C^\infty$  sur  $X$  est défini localement, en terme de plongements locaux de  $X$  dans  $\mathbb{C}^n$ , comme la restriction à  $X$  du quotient du faisceau des fonctions  $C^\infty$  sur  $\mathbb{C}^n$  par l'idéal engendré par les parties réelles et imaginaires des équations qui définissent  $X$ . Le fibré  $\mathcal{N}$  se prolonge en un fibré vectoriel complexe  $C^\infty N$  sur un voisinage  $U$  de  $Y$  dans  $X$ , et pour  $U$  assez petit, il existe des sections  $f$  de  $N$ , de lieu des zéros  $Y$ , et telles que, sur  $Y$ ,  $df : \mathcal{N} \rightarrow N$  soit l'identité. Deux choix de  $N$  et  $f$  sont homotopes sur  $Y$  assez petit.

La classe de cohomologie  $\text{cl}(U)$  de la section 0 de  $N$  (notée  $z : U \rightarrow N$ ) est définie :  $U$  est d'intersection complète locale dans  $N$ , et  $R^i z^! \mathbb{Z} = 0$  pour  $i \neq 2c$ ,  $R^{2c} z^! \mathbb{Z} = \mathbb{Z}$ . On dispose de  $f^* : H_U^\bullet(N, \mathbb{Z}) \rightarrow H_Y^\bullet(X, \mathbb{Z})$  et on pose

$$\text{cl}(Y) = f^* \text{cl}(U).$$

La même construction marche dès qu'on a sur un sous-espace analytique  $Y$  de  $X$  la structure normale suivante : un faisceau localement libre  $\mathcal{C}$  de rang  $c$  sur  $Y_{\text{red}}$ , et un épimorphisme  $\mathcal{C} \rightarrow \mathcal{I}/\mathcal{I} \cdot \mathcal{I}_{\text{red}}$ .

## 2.3 Méthode homologique

### 2.3.1

Soit  $f : Y \rightarrow X$  un morphisme plat de type fini, à fibres de dimension  $\leq d$ . Dans [AGV72, XVIII 2.9], nous avons défini un morphisme trace

$$\text{Tr}_f : R^{2d} f_! \mathbb{Z}/n(d) \rightarrow \mathbb{Z}/n. \quad (2.3.1.1)$$

On a  $R^i f_! \mathbb{Z}/n(d) = 0$  pour  $i > 2d$ , et  $R^i f^! \mathbb{Z}/n = 0$  pour  $i < -2d$ . Ceci, et l'adjonction entre  $Rf_!$  et  $Rf^!$ , fournissent des isomorphismes

$$\begin{aligned} \text{hom}(R^{2d} f_! \mathbb{Z}/n(d), \mathbb{Z}/n) &= \text{hom}(Rf_! \mathbb{Z}/n(d), \mathbb{Z}/n[-2d]) \\ &= \text{hom}(\mathbb{Z}/n, Rf^! \mathbb{Z}/n(-d)[-2d]) \\ &= H^0(Y, R^{-2d} f^! \mathbb{Z}/n). \end{aligned} \quad (2.1.3.2)$$

Au moins sur  $S$  un point, l'image de  $\text{Tr}_f$  dans les deux derniers groupes mérite le nom de classe fondamentale de  $Y$  (en homologie).

On note encore  $\text{Tr}_f$  l'image de  $\text{Tr}_f$  dans le second groupe, et les morphismes qui s'en déduisent par fonctorialité. Par exemple, pour  $Y/S$  propre, le morphisme

$$H^i(Y, \mathbb{Z}/n(d)) = H^i(S, Rf_! \mathbb{Z}/n(d)) \longrightarrow H^{i-2d}(S, \mathbb{Z}/n). \quad (2.3.1.3)$$

Supposons  $Y$  contenu dans  $X$  lisse sur  $S$ , purement de dimension relative  $N$ , et posons  $c = N - d$ .

$$\begin{array}{ccc} Y & \xhookrightarrow{i} & X \\ & \searrow f & \downarrow \\ & & S \end{array}$$

On a  $Rf^! = Ri^! Rg^!$ , et  $Rg^! \mathbb{Z}/n = \mathbb{Z}/n(-N)[-2N]$ . La classe fondamentale de  $Y$  s'identifie à un élément de  $H^0(Y, Ri^! \mathbb{Z}/n(c)[2c]) = H_Y^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c))$ , la classe  $\text{cl}(Y)$  de  $Y$  dans  $X$ . Nous verrons plus loin qu'elle ne dépend que de  $Y \subset X$ , non de la projection de  $X$  sur  $S$ , et que pour  $Y$  d'intersection complète locale, elle induit la classe locale du numéro précédent.

Explicitons l'isomorphisme

$$H_Y^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c)) \xrightarrow{\sim} \text{hom}(R^{2d} f_! \mathbb{Z}/n(d), \mathbb{Z}/n)$$

qui transforme  $\text{cl}(Y)$  en  $\text{Tr}_f$  : via les isomorphismes

$$\begin{aligned} H_Y^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c)) &= H_Y^{2c}(Ri^! \mathbb{Z}/n(c)) \\ &= \text{hom}_Y(\mathbb{Z}/n(d)[2d], Ri^! \mathbb{Z}/n(N)[2N]) \\ &= \text{hom}_X(\mathbb{Z}/n(d)[2d]_Y, \mathbb{Z}/n(N)[2n]), \end{aligned}$$

c'est la ligne supérieure de

$$\begin{array}{ccccc} H_Y^{2c} & \longrightarrow & \text{hom}(Rf_! \mathbb{Z}/n(d)[2d], Rf_! Ri^! \mathbb{Z}/n(N)[2n]) & \xrightarrow{(1)} & \text{hom}(Rf_! \mathbb{Z}/n(d)[2d], \mathbb{Z}/n) \\ & \searrow (3) & \downarrow \text{Tr}_i & (2) & \parallel \\ & & \text{hom}(Rg_! \mathbb{Z}/n(d)[2d]_Y, Rg_! \mathbb{Z}/n(N)[2N]) & \xrightarrow{\text{Tr}_g} & \text{hom}(Rg_! \mathbb{Z}/n(d)[2d]_Y, \mathbb{Z}/n), \end{array}$$

où (1) est la flèche d'adjonction  $Rf_!Rf^! \rightarrow \text{id}$ . La commutativité (2) exprime que l'isomorphisme  $Rf^! = Ri^!Rg^!$  est défini par adjonction. Enfin, la flèche déduite de (3)

$$H_Y^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c)) \otimes R^{2d}f_!\mathbb{Z}/n(d) \rightarrow R^{2N}g_!\mathbb{Z}/n(N)$$

s'interprète comme un cup-produit (cf. 1.2).

**Définition 2.3.2.** La classe  $\text{cl}(Y) \in H_Y^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c))$  a pour propriété caractéristique que, pour tout section locale  $u$  de  $R^{2d}f_!\mathbb{Z}/n(d)$ , on a

$$\text{Tr}_f(u) = \text{Tr}_g(\text{cl}(Y) \smile u).$$

Du fait que  $\text{cl}(Y)$  ait déjà une image  $\text{Tr}_f$  dans  $\text{hom}(Rf_!\mathbb{Z}/n(d)[2d], \mathbb{Z}/n)$ , le formule 2.3.2 vaut pour les flèches déduites de  $\text{Tr}_f$  par fonctorialité. Par exemple, pour  $X$  sur  $S$  propre et  $u \in H^\bullet(Y, \mathbb{Z}/n)$ , la formule vaut dans  $H^\bullet(S, \mathbb{Z}/n(-d))$ . Pour  $v \in H^\bullet(X, \mathbb{Z}/n)$ , elle donne

$$\text{Tr}_f(i^*v) = \text{Tr}_g(\text{cl}(Y) \smile v),$$

où le cup-produit peut se calculer dans  $H^\bullet(X, \mathbb{Z}/n)$ .

### 2.3.3

Nous allons définir les morphisme trace, et donc la classe  $\text{cl}(Y)$ , sous des hypothèses plus générales. Soit donc un diagramme

$$\begin{array}{ccc} Y & \hookrightarrow & X \\ & \searrow f & \downarrow g \\ & & S \end{array}$$

avec  $g$  lisse, purement de dimension relative  $N$  et  $Y$  fermé dans  $X$ , fibre par fibre de dimension  $\leq d$ . On munit de plus  $Y$  d'un "poids"  $\mathcal{K}$  du type suivant :  $\mathcal{K} \in D_{\text{parf}, X}^b$  est un complexe borné de faisceaux de  $\mathcal{O}$ -modules sur  $X$ , de Tor-dimension finie sur  $S$  (ou sur  $X$ , cela revient au même) et dont les faisceaux de cohomologie soient cohérents et à support dans  $Y$ . On se propose de définir un morphisme  $\text{Tr}_{f, \mathcal{K}} : R^{2d}f_!\mathbb{Z}/n(d) \rightarrow \mathbb{Z}/n$ . Pour  $Y$  plat sur  $S$  et  $\mathcal{K} = \mathcal{O}_Y$ , ce sera le morphisme trace précédent. En général, il ne dépend que des longueurs de  $\mathcal{K}$  aux points génériques  $y$  des composantes irréductibles de  $Y$  ( $\text{lg}_y(\mathcal{K}) = \sum (-1)^i \text{lg } H^i(\mathcal{K})_y$ ). Enfin, on notera  $\text{cl}(Y, \mathcal{K})$  la classe à support dans  $Y$  telle que

$$\text{Tr}_g(\text{cl}(Y, \mathcal{K}) \smile u) = \text{Tr}_{f, \mathcal{K}}(u). \quad (2.3.3.1)$$

### 2.3.4

La construction de  $\text{Tr}_{f, \mathcal{K}}$  est parallèle à celle de [AGV72, XVIII.2] ; nous n'en indiquerons que les grandes lignes.

**A**  $d = 0$  ( $f$  quasi-fini). Soit  $x$  un point géométrique de  $Y$ .  $s$  son image dans  $S$ ,  $\mathcal{K}_{(x)}$  l'image réciproque de  $\mathcal{K}$  sur le localisé stricte de  $X$  en  $x$ ,  $\mathcal{K}_{(x)s} = \mathcal{K}_{(x)} \otimes_{\mathcal{O}_{S,s}^h} k(s)$  son image réciproque sur la fibre géométrique en  $s$ , et  $n(x) = \sum (-1)^i \dim_{k(s)} H^i(\mathcal{K}_{(x)s})$ . La fonction  $x \mapsto n(x)$  est une pondération de  $f$ , et on prend le morphisme trace correspondant [AGV72, XVII.6.2.5]. La pondération  $n(x)$ , et  $\text{Tr}_{f, \mathcal{K}}$  sont de formation compatible à tout changement de base.

**B** Cas général. Si  $u : Z \rightarrow \mathbb{A}_S^d$  est tel que  $ui$  soit quasi-fini, on pose  $\text{Tr}_{f, \mathcal{K}} = \text{Tr}_{\mathbb{A}_S^d} \circ \text{Tr}_{ui, \mathcal{K}}$ . Ce morphisme trace est clairement compatible à tout changement de base  $S'/S$ . Pour prouver qu'il ne dépend pas de  $u$ , on peut donc supposer que  $S$  est le spectre d'un corps algébriquement clos  $k$ . Soient dans ce cas  $Y_i$  les composantes irréductibles de  $Y$ , et  $\text{lg}_i$  la longueur de  $\mathcal{K}$  au point générique de  $Y_i$ . Si  $\alpha_i$  est l'inclusion de  $(Y_i)_{\text{red}}$  dans  $Y$ , on a

$$\text{Tr}_{f, \mathcal{K}} = \sum \text{lg}_i \text{Tr}_{Y_i, \text{red}/S} \alpha_i^* \quad (2.3.4)$$

(cette formule résulte de la formule analogue et facile pour  $\text{Tr}_{ui}$ ).

Ceci définit  $\text{Tr}_{f, \mathcal{K}}$  localement sur  $Y$  ; on procède ensuite comme en [AGV72, XVIII.2.9].

**Lemme 2.3.5.** *Si  $g = g'g'' : X \xrightarrow{g''} S' \xrightarrow{g'} S$ , avec  $g'$  et  $g''$  lisse et purement de dimension relative  $N'$  et  $N''$ , et que  $Y$  est encore, sur  $S'$ , fibre par fibre de codimension  $\geq c$ , alors la classe  $\text{cl}(Y, \mathcal{K})$  est la même, calculée en terme de  $g$  ou de  $g''$ .*

Soient  $f' = g''i$  et  $d' = d - N'$ . La formule  $\text{Tr}_g = \text{Tr}_{g'} \text{Tr}_{g''}$  ([AGV72, XVIII.2.9] Var 3) assure la commutativité de

$$\begin{array}{ccc} \text{H}_X^{2c}(Z, \mathbb{Z}/n(c)) & & \\ \downarrow & & \\ \text{hom}_{S'}(Rf_! \mathbb{Z}/n(d')[2d'], Rg'_! \mathbb{Z}/n(N'')[2N'']) & \longrightarrow & \text{hom}_{S'}(R^{2d'} f'_! \mathbb{Z}/n, \mathbb{Z}/n) \\ \downarrow Rg'_!(N') & & \downarrow \text{Tr}_{g'} \circ R^{2N'} g'_! \\ \text{hom}_S(Rf_! \mathbb{Z}/n(d)[2d], Rg'_! \mathbb{Z}/n(N)[2N]) & \longrightarrow & \text{hom}_S(R^{2d} f_! \mathbb{Z}/n, \mathbb{Z}/n) \end{array}$$

tandis que la formule analogue et facile à vérifier  $\text{Tr}_{f, \mathcal{K}} = \text{Tr}_{g'} \text{Tr}_{f', \mathcal{K}}$  assure que l'image de  $\text{Tr}_{f', \mathcal{K}}$  est  $\text{Tr}_{f, \mathcal{K}}$ . L'assertion en résulte.

**Lemme 2.3.6.** *Si  $Y$  est un diviseur dans  $X$ , la classe 2.3.2 coïncide avec la classe 2.1.2.*

Par semi-pureté (2.2.6(i) et 2.2.8(i)), le problème est locale sur  $Y$  ; utilisant 2.3.5 pour remplacer  $S$  par  $S'$  convenable, ceci nous permet de supposer que  $N = 1$ . Utilisant à nouveau la semi-pureté (2.2.6(ii) et 2.2.8(ii)) il suffit de prouver 2.3.6 au-dessus des points génériques de  $S$ . Une localisation étale nous ramène alors à supposer  $S$  spectre d'un corps algébriquement clos  $k$ . Les classes 2.3.2 et 2.1.2 étant chacune additive en  $Y$ , ceci nous ramène au cas où  $Y$  est un point fermé sur un courbe lisse sur  $k$ . Que la propriété caractéristique 2.3.2 soit vérifiée est alors la compatibilité fondamentale 2.1.5.

**Lemme 2.3.7.** *La formation de  $\text{cl}(Y, \mathcal{K})$  est compatible à tout changement de base  $S'/S$ .*

Résulte de la même assertion pour les morphismes trace.

**Théorème 2.3.8.** (i)  $\text{cl}(Y, \mathcal{K})$  ne dépend que de  $Y \subset X$  et des longueurs de  $\mathcal{K}$  aux points génériques de  $Y$ . Cette classe est additive en  $\mathcal{K}$ . Pour  $\mathcal{K} = \mathcal{O}_Y$  et  $Y$  d'intersection complète locale, elle induit la classe locale 2.2.2.

(ii) Soit un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc} X' & \xrightarrow{u} & X \\ \downarrow & & \downarrow \\ S' & \longrightarrow & S \end{array}$$

avec  $X'$  lisse sur  $S'$ . Si  $u^{-1}(Y)$  est encore fibre par fibre de codimension  $\geq c$ , alors

$$\text{cl}(u^{-1}(Y), \mathbb{L}u^* \mathcal{K}) = u^* \text{cl}(Y, \mathcal{K}).$$

(iii) Soit  $Y' \subset X$  fibre par fibre de codimension  $\geq c'$ ,  $\mathcal{K}'$  un poids sur  $Y'$  et supposons que  $Y \cap Y'$  soit fibre par fibre de codimension  $\geq c + c'$ . Alors

$$\text{cl}\left(Y \cap Y', \mathcal{K} \overset{\mathbb{L}}{\otimes} \mathcal{K}'\right) = \text{cl}(Y, \mathcal{K}) \smile \text{cl}(Y', \mathcal{K}').$$

(A) Etant donné  $Y \subset X/S$  comme dit, il résulte de la semi-pureté (2.2.6, 2.2.8) que pour vérifier que deux classes dans  $\text{H}_Y^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c))$  coïncident, il suffit de le vérifier localement aux points génériques de  $Y$ , voire même après tout changement de bas  $s \rightarrow S$  ( $s$  point géométrique générique de  $S$ ), aux points génériques de  $Y$ .

**(B) Preuve de (ii) pour  $S = S'$  et  $u$  un plongement fermé** Par localisation (A) on peut supposer que  $X'$  est l'image réciproque de la section 0 par un morphisme lisse  $v : X \rightarrow \mathbb{A}_S^{N'}$

$$\begin{array}{ccccc} X' & \xrightarrow{u} & X & & \\ \downarrow & & \downarrow v & & \\ S & \xrightarrow{0} & \mathbb{A}_S^{N'} & \xrightarrow{\pi} & S \end{array}$$

On applique 2.3.5 à  $g = \pi v$  et 2.3.7 au changement de base  $S \rightarrow \mathbb{A}_S^{N'}$ .

**(C) Dans une situation produit :**  $X = X' \times_S X''$ ,  $Y = Y' \times_S Y''$ ,  $\mathcal{K} = \mathcal{K}' \otimes_S^L \mathcal{K}''$ , on a  $\text{cl}(Y, \mathcal{K}) = \text{cl}(Y', \mathcal{K}') \smile \text{cl}(Y'', \mathcal{K}'')$  (cup-produit extérieur, i.e.  $\text{pr}_1^* \text{cl}(Y', \mathcal{K}') \smile \text{pr}_2^* \text{cl}(Y'', \mathcal{K}'')$ ).

Des propriétés fonctorielles de  $\text{Tr}_g$  [AGV72, XVIII.2.12] résulte la commutativité de

$$\begin{array}{ccccc} H_{X'}^{2c'} \otimes H_{X''}^{2c''} & \longrightarrow & \text{hom}_S(Rf'_! \mathbb{Z}/n(d')[2d'], Rg'_! \mathbb{Z}/n(N')[2N']) \otimes \cdots & \longrightarrow & \text{hom}_S(R^{2d'} f'_! \mathbb{Z}/n, \mathbb{Z}/n) \otimes \cdots \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ H_X^{2c} & \longrightarrow & \text{hom}_S(Rf_! \mathbb{Z}/n(d)[2d], Rg_! \mathbb{Z}/n(N)[2N]) & \longrightarrow & \text{hom}_S(R^{2d} f_! \mathbb{Z}/n, \mathbb{Z}/n) \end{array}$$

et on vérifie que  $\text{Tr}_f$  est l'image de  $\text{Tr}_{f'} \otimes \text{Tr}_{f''}$  d'où l'assertion.

**Preuve de (ii)** (2.3.7) et un changement de base préliminaire nous ramènent à supposer que  $S = S'$ . Factorisons  $u$  par son graphe :

$$X' \xrightarrow{(\text{id}, u)} X' \times X \xrightarrow{\text{pr}_2} X.$$

Ceci nous amène à traiter séparément  $\text{pr}_2$ , justiciable de (C) pour  $X' = X'$ ,  $\mathcal{K}' = \mathcal{O}_{X'}$  (avec  $\text{cl}(Y') = 1 \in H^0(X, \mathbb{Z}/n)$ ), et  $(\text{id}, u)$ , justiciable de (B).

**Preuve de (iii)** Soit  $\delta : X \rightarrow X \times_S X$  l'inclusion diagonale. On utilise la formule  $\delta^*(Y_1 \times_S Y_2) = Y_1 \cap Y_2$  pour se ramener à (B) et (C).

**Preuve de (i)** Le changement de base  $S_{\text{red}} \rightarrow S$  remplace  $X$  par  $X_{\text{red}}$  ; ceci nous ramène à supposer  $X$  et  $S$  réduits. Une localisation au voisinage des points génériques de  $Y$  nous ramène ensuite au cas où  $Y_{\text{red}}$  est irréductible et l'intersection complète de  $c$  diviseurs  $D_i$ . La même localisation, et la définition de  $\text{Tr}$  dans le cas quasi-fini, montre ensuite que  $\text{cl}(Y, \mathcal{K}) = \text{lg } \text{cl}(Y_{\text{red}}, \mathcal{O}_{Y_{\text{red}}})$ , où  $\text{lg}$  est la longueur de  $\mathcal{K}$  au point générique de  $Y$ . D'après (iv), on a donc

$$\text{cl}(Y, \mathcal{K}) = \text{lg} \prod_i \text{cl}(D_i, \mathcal{O}_{D_i})$$

et on conclut par 2.3.6.

### 2.3.9 Remarque

Pour  $S$  le spectre d'un corps, et la classe d'un cycle étant définie comme en 2.2.10, l'assertion (iii) dit que, si deux cycles  $Y'$  et  $Y''$  se coupent avec la bonne dimension, alors

$$\text{cl}(Y' \cap Y'') = \text{cl}(Y') \smile \text{cl}(Y''),$$

pourvu que les multiplicités des composantes de  $Y' \cap Y''$  soient calculées comme sommes alternées de  $\text{Tor}$ .

### 2.3.10 Remarque

Soit  $X/\text{Spec}(k)$ ,  $k$  algébriquement clos. Si deux cycles de codimension  $c$  dans  $X$  sont algébriquement équivalents, il résulte de l'existence de la théorie relative ci-dessus que les images dans  $H^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c))$  de leurs classes sont les fibres, en deux points de  $S$  connexe convenable, d'une section sur  $S$  du faisceau constant  $H^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c))$  (le faisceau  $R^{2c} f_* \mathbb{Z}/n(c)$  pour  $f = \text{pr}_2 : X \times S \rightarrow S$ ) : deux cycles algébriquement équivalents ont même classe dans  $H^{2c}(X, \mathbb{Z}/n(c))$ .

### 3 Application : la formule des traces de Lefschetz dans le cas propre et lisse

#### 3.1

Soient  $X$  et  $Y$  des variétés algébriques propres et lisses sur un corps algébriquement clos  $k$ , purement de dimensions  $N$  et  $M$ . Via l'isomorphisme de Künneth  $H^\bullet(X \times Y) = H^\bullet(X) \otimes H^\bullet(Y)$ , le morphisme trace  $H^\bullet(X \times Y)(M) \rightarrow H^\bullet(X)$  n'est autre que  $H^\bullet(X) \otimes$  (le morphisme trace  $H^\bullet(Y)(M) \rightarrow \mathbb{Q}_\ell$ ). Le morphisme étant homogène de degré pair, il n'y a pas de problème de signe. On le note  $\int_Y$ .

#### 3.2

Une classe  $\eta \in H^{2q}(X \times Y)(q)$  définit un morphisme de degré  $2(q - N)$   $\eta_{XY} : H^\bullet(Y)(N - q) \rightarrow H^\bullet(X)$ , par la formule

$$\beta \mapsto \int_Y \eta \cdot \text{pr}_2^* \beta.$$

**Proposition 3.3.** *Soient  $p$  et  $q$  deux entiers, avec  $p + q = N + M$ , et  $\varepsilon \in H^{2p}(X \times Y)(p)$ ,  $\eta \in H^{2q}(X \times Y)(p)$ . La trace de  $\eta_{XY} \varepsilon_{YX} : H^\bullet(X) \rightarrow H^\bullet(X)$  étant entendue au sens 1.3, on a alors*

$$\text{Tr}_{X \times Y}(\eta \cdot \varepsilon) = \text{Tr}(\eta_{XY} \varepsilon_{YX}, H^\bullet(X)).$$

Pour exorciser les signes, il y a intérêt à ne retenir de la graduation de  $H^\bullet$  que la  $\mathbb{Z}/2$ -graduation sous-jacente. Pour éviter de trainer avec soi les twist à la Tate, on fixe de plus un isomorphisme  $\mathbb{Q}_\ell(1) = \mathbb{Q}_\ell$ . Soit  $\alpha_Y$  l'homomorphisme  $H^\bullet(Y) \rightarrow H^\bullet(Y)^\vee$  (un isomorphisme) rendant commutatif le diagramme

$$\begin{array}{ccc} H^\bullet(Y) \otimes H^\bullet(Y) & \longrightarrow & H^\bullet(Y) \xrightarrow{\text{Tr}} \mathbb{Q}_\ell \\ \downarrow \alpha_Y \otimes 1 & & \parallel \\ H^\bullet(Y)^\vee \otimes H^\bullet(Y) & \xrightarrow{(1.3.1)} & \mathbb{Q}_\ell. \end{array}$$

L'application  $\eta_{XY}$  est l'image de  $\eta$  par

$$H^\bullet(X \times Y) = H^\bullet(X) \otimes H^\bullet(Y) \xrightarrow{\alpha_Y} H^\bullet(X) \otimes H^\bullet(Y)^\vee \xrightarrow{(1.3.2)} \text{hom}(H^\bullet(X), H^\bullet(Y)),$$

et de même pour  $\varepsilon$ . La définition 1.3.4 de la trace ramène alors 3.3 à la formule  $\text{Tr}_{X \times Y} = \text{Tr}_X \otimes \text{Tr}_Y$ .

#### 3.4 Remarque

La preuve de 3.4 n'utilise pas que  $\alpha_X$  et  $\alpha_Y$  soient des isomorphismes. Elle vaut sans supposer  $X$  et  $Y$  lisses. Toutefois, en dehors du cas lisse, il est difficile de trouver des classes de *cohomologie* auxquelles on veuille appliquer 3.3.

#### 3.5 Remarque

Si  $\varepsilon, \eta$  sont les classes de cohomologie de cycles algébriques  $A$  et  $B$  sur  $X \times Y$ , de codimension  $p$  et  $q$ , et que  $A \cap B$  est de dimension 0, alors  $\text{Tr}_{X \times Y}(\eta \varepsilon)$  est la multiplicité d'intersection  $A \cdot B$ , calculée par une somme alternée de Tor (2.3.9).

**Proposition 3.6.** *Pour  $q = M$  et  $\eta = \text{cl}(B)$  la classe d'un sous-schéma  $B \subset X \times Y$ , fini sur  $X$ , l'application  $\eta_{XY}$  est la composée*

$$\eta_{XY} : H^\bullet(Y) \xrightarrow{\text{pr}_2^*} H^\bullet(B) \xrightarrow{\text{Tr}_{B/X}} H^\bullet(X).$$

D'après 3.2 et (2.3.3.1) pour  $\mathcal{K} = \mathcal{O}_B$ , on a en effet

$$\eta_{XY}(\beta) = \mathrm{Tr}_{X \times Y/X}(\mathrm{cl}(B) \cdot \mathrm{pr}_2^* \beta) = \mathrm{Tr}_{B/X}(\mathrm{pr}_2^* \beta).$$

Le cas le plus important est celui où  $B$  est le graphe d'une application  $f : X \rightarrow Y$ . Dans ce cas, 3.6 montre que  $\eta_{XY} = f^*$ .

**Corollaire 3.7.** *Soit  $f$  un endomorphisme de  $X$  propre et lisse sur un corps algébriquement clos  $k$ . On suppose que les points fixes de  $f$  sont isolés. Alors, la trace  $\sum (-1)^i \mathrm{Tr}(f^*, H^i(X))$  est le nombre de points fixes de  $f$ , chacun compté avec sa multiplicité.*

Dans 3.5, on prend  $A = \text{graphe de l'identité}$ ,  $B = \text{graphe de } f$  et on applique 3.3, 3.6.

**Corollaire 3.8.** *Soient  $X$  un courbe sur  $k$  algébriquement clos, déduit par extension des scalaires de  $X_0$  sur  $\mathbb{F}_q$ , et  $f$  le morphisme de Frobenius. Alors,  $\sum (-1)^i \mathrm{Tr}(f^*, H_c^\bullet(X))$  est le nombre de points fixes de  $f$ .*

On peut remplacer  $X$  par  $X_{\mathrm{red}}$ , donc supposer  $X$  réduite. Soit  $U$  l'ouvert de  $X$  où  $X$  est lisse de dimension 1, et  $\bar{U}$  le complétion projective et lisse de  $U$ . Les suites exactes longues de cohomologie pour  $(X, U)$  et  $(\bar{U}, U)$  donnent

$$\mathrm{Tr}(f^*, H_c^\bullet(X)) = \mathrm{Tr}(f^*, H_c^\bullet(U)) + \mathrm{Tr}(f^*, H_c^\bullet(X \setminus U))$$

et

$$\mathrm{Tr}(f^*, H_c^\bullet(\bar{U})) = \mathrm{Tr}(f^*, H_c^\bullet(U)) + \mathrm{Tr}(f^*, H_c^\bullet(\bar{U} \setminus U)).$$

Le mêmes formules valent pour les nombres de points fixes. La formule 3.8 étant claire pour un schéma de dimension 0, ceci ramène à prouver 3.8 pour  $\bar{U}$ . Ce cas est justiciable de 3.7. Le fait que  $df = 0$  garantit que les points fixes sont tous de multiplicité un.

### 3.9 Remarque

Pour  $X$  de dimension  $\leq 1$  sur  $k$  algébriquement clos, et  $f : X \rightarrow X$  tel que  $df = 0$ , il n'est pas difficile de vérifier que 3.8 est encore valable.

# Chapitre 5

## Dualité

On trouvera dans cet exposé quelques théorèmes et compatibilités, tous relatifs à la dualité de Poincaré. Au paragraphe 1, le théorème de bidualité locale en dimension 1 [Gro66, I.5.1] et quelques calculs de deux. Au paragraphe 2, une démonstration très économique de la dualité de Poincaré sur les courbes, que m'a apprise M. Artin. Au paragraphe 3, une compatibilité qui fait le lien entre deux définitions de l'accouplement qui donne lieu à la dualité de Poincaré pour les courbes : par cup-produit, ou par autodualité de la jacobienne. Au paragraphe 4, enfin, la preuve de la compatibilité du titre.

Dans tout l'exposé, les schémas seront noethériens et séparés, et  $n$  est un entier inversible sur tous les schémas considérés.

### 1 Bidualité locale, en dimension 1

#### 1.1

Soit  $S$  un schéma régulier purement de dimension 1. Nous nous proposons de montrer que le complexe réduit à  $\mathbb{Z}/n$  en degré 0 est dualisant, i.e. que pour  $\mathcal{K} \in \text{Ob } D_c^b(S, \mathbb{Z}/n)$  ( $(-)_c$  pour constructible), si on pose  $D\mathcal{K} = R\mathcal{H}om(\mathcal{K}, \mathbb{Z}/n)$ , alors  $D\mathcal{K}$  est encore constructible à cohomologie bornée, et que le morphisme canonique  $\alpha$  de  $\mathcal{K}$  dans  $DD\mathcal{K}$  est un isomorphisme.

Pour  $\mathcal{K}$  dans  $D^-$ , et  $\mathcal{L}$  quelconque, on a

$$\text{hom}(\mathcal{K} \otimes^L \mathcal{L}, \mathbb{Z}/n) = \text{hom}(\mathcal{L}, \mathcal{H}om(\mathcal{K}, \mathbb{Z}/n)).$$

Le morphisme de  $\mathcal{K}$  dans  $DD\mathcal{K}$  est défini en supposant  $D\mathcal{K}$  dans  $D^-$ ; si  $\beta : D\mathcal{K} \otimes^L \mathcal{K} \rightarrow \mathbb{Z}/n$  est l'accouplement canonique, il est défini par l'accouplement  $\mathcal{K} \otimes^L D\mathcal{K} = D\mathcal{K} \otimes^L \mathcal{K} \xrightarrow{\beta} \mathbb{Z}/n$ .

#### 1.2

Soit  $f : X \rightarrow S$  un morphisme séparé de type fini. Posons  $\mathcal{K}_X = Rf^! \mathbb{Z}/n$ . Pour  $\mathcal{K} \in \text{Ob } D^-(X, \mathbb{Z}/n)$ , on pose  $D\mathcal{K} = R\mathcal{H}om(\mathcal{K}, \mathcal{K}_X)$ . L'adjonction entre  $Rf_!$  et  $Rf^!$  assure que

$$Rf_* \mathcal{K} \otimes^L Rf_* D\mathcal{K} \longrightarrow Rf_!(\mathcal{K} \otimes^L D\mathcal{K}) \longrightarrow Rf_! Rf^! \mathbb{Z}/n \longrightarrow \mathbb{Z}/n.$$

La symétrie de cette description montre que, pour  $f$  propre, le diagramme

$$\begin{array}{ccc} Rf_* \mathcal{K} & \longrightarrow & DDRf_* \mathcal{K} \\ \downarrow & & \downarrow \wr \\ Rf_* DD\mathcal{K} & \xrightarrow{\sim} & DRf_* D\mathcal{K} \end{array} \quad (1.2.1)$$

est commutatif.



Si  $f$  est l'inclusion d'un point fermé, on sait que  $Rf^! \mathbb{Z}/n = \mathbb{Z}/n(-1)[-2]$  – soit, à torsion et décalage près,  $\mathbb{Z}/n$ . Sur le spectre d'un corps, ce complexe est dualisant (dualité de Pontrjagin pour les  $\mathbb{Z}/n$ -modules). D'après (1.2.1), on a donc  $\mathcal{K} \xrightarrow{\sim} DD\mathcal{K}$  pour  $\mathcal{K}$  de la forme  $Rf_! \mathcal{L}$  – et donc lorsque le support de  $\underline{H}^\bullet(\mathcal{K})$  est fini.

**Théorème 1.3.** *Soient  $j : U \hookrightarrow S$  un ouvert dense de  $S$  et  $\mathcal{F}$  un faisceau localement constant constructible de  $\mathbb{Z}/n$ -modules sur  $U$ . On a  $Dj_* \mathcal{F} = j_* D\mathcal{F}$ , i.e.  $\mathcal{H}om(j_* \mathcal{F}, \mathbb{Z}/n) = j_* \mathcal{H}om(\mathcal{F}, \mathbb{Z}/n)$  et  $\mathcal{E}xt^i(j_* \mathcal{F}, \mathbb{Z}/n) = 0$  pour  $i > 0$ .*

Sur  $U$ ,  $\mathcal{E}xt^i(j_* \mathcal{F}, \mathbb{Z}/n) = 0$  pour  $i > 0$ , car  $\mathcal{F}$  est localement constant (et  $\mathbb{Z}/n$  est un  $\mathbb{Z}/n$ -module injectif), tandis que pour  $i = 0$  c'est le dual  $\mathcal{F}^\vee$  de  $\mathcal{F}$ . On vérifie que  $\mathcal{H}om(j_* \mathcal{F}, \mathbb{Z}/n) = j_* \mathcal{F}^\vee$ , et il reste à vérifier la nullité des  $\mathcal{E}xt^i$  ( $i > 0$ ) en les points de  $S \setminus U$ . Le problème est local en ces points. Ceci nous ramène à supposer que  $S$  est un trait strictement local et, que  $U$  est réduit à son point générique  $\eta$ . Soit  $I = \text{Gal}(\bar{\eta}/\eta)$ . Le faisceau  $\mathcal{F}$  s'identifie au module galoisien  $\mathcal{F}_\eta$ , et la fibre spéciale de  $j_* \mathcal{F}$  à  $\mathcal{F}_\eta^I$ .

Soit  $i$  l'inclusion du point fermé  $s$ , et appliquons  $D$  aux suites exactes

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & j_! \mathcal{F} & \longrightarrow & j_* \mathcal{F} & \longrightarrow & i_* \mathcal{F}_\eta^I \longrightarrow 0 \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ 0 & \longrightarrow & j_! \mathcal{F}_\eta^I & \longrightarrow & \mathcal{F}_\eta^I & \longrightarrow & i_* \mathcal{F}_\eta^I \longrightarrow 0. \end{array}$$

On obtient un morphisme de triangles

$$\begin{array}{ccccc} i_* (\mathcal{F}_\eta^I)^\vee (-1)[-2] & \longrightarrow & Dj_* \mathcal{F} & \longrightarrow & Rj_* \mathcal{F}^\vee \\ \parallel & & \downarrow & & \downarrow \\ i_* (\mathcal{F}_\eta^I)^\vee (-1)[-2] & \longrightarrow & (\mathcal{F}_\eta^I)^\vee & \longrightarrow & Rj_* \mathcal{F}_\eta^I. \end{array}$$

La suite exacte longue déduite de la première ligne fournit la nullité des  $\mathcal{E}xt^i$  ( $i > 2$ ) et, prenant la fibre en  $s$ , on trouve

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & (\underline{H}^1(Dj_* \mathcal{F}))_s & \longrightarrow & H^1(I, \mathcal{F}_\eta^\vee) & \xrightarrow{\partial} & (\mathcal{F}_\eta^I)^\vee (-1) \longrightarrow (\underline{H}^2 Dj_* \mathcal{F})_s \longrightarrow 0 \\ & & & & \downarrow & & \parallel \\ 0 & \longrightarrow & H^1(I, (\mathcal{F}_\eta^I)^\vee) & \xrightarrow{\partial} & (\mathcal{F}_\eta^I)^\vee (-1) & \longrightarrow & 0. \end{array}$$

Puisque  $(\mathcal{F}_\eta^I)^\vee = (\mathcal{F}_\eta^\vee)_I$ , posant  $M = \mathcal{F}_\eta^\vee$ , il faut finalement vérifier que

$$H^1(I, M) \xrightarrow{\sim} H^1(I, M_I).$$

Si  $p$  est l'exposant caractéristique résiduel,  $I$  est extension d'un groupe isomorphe à  $\widehat{\mathbb{Z}}_{p'} = \varprojlim_{(m,p)=1} \mathbb{Z}/m$  par un  $p$ -groupe  $P$ . Puisque  $P$  est premier à l'ordre de  $M$ , on a  $H^1(P, M) = 0$  ( $i > 0$ ) et  $(M_I)^P = (M^P)_I$ . Ceci permet de remplacer  $M$  par  $M^P$  et  $I$  par  $I/P$ . On a enfin un isomorphisme fonctoriel  $H^1(\widehat{\mathbb{Z}}_{p'}, M) \sim$  (coinvariants de  $\widehat{\mathbb{Z}}_{p'}$ , dans  $M$ ), d'où le théorème.

**Théorème 1.4.** *Pour  $\mathcal{K} \in \text{Ob } D_c^b(S, \mathbb{Z}/n)$ , on a  $\mathcal{K} \xrightarrow{\sim} DD\mathcal{K}$ .*

Par dévissage, on se ramène à supposer que  $\mathcal{K}$  est réduit à un faisceau constructible  $\mathcal{F}$  en degré 0, et que  $\mathcal{F}$  est soit à support fini (1.2), soit de la forme  $j_* \mathcal{F}_1$  comme en 1.3. Dans ce second cas, 1.3 nous ramène à la bidualité locale pour  $\mathcal{F}$  localement constant sur  $U$ .

## 2 La dualité de Poincaré pour les courbes, d'après M. Artin

### 2.1

Soit  $X$  une courbe projective et lisse sur  $k$  algébriquement clos. On pose  $\mathcal{K}_X = \mathbb{Z}/n(1)[2]$  et, pour  $\mathcal{K} \in \text{Ob } D_c^b(X, \mathbb{Z}/n)$ ,  $D\mathcal{K} = R\mathcal{H}om(\mathcal{K}, \mathcal{K}_X)$ . Pour  $M$  un  $\mathbb{Z}/n$ -module, on pose aussi  $DM = \text{hom}(M, \mathbb{Z}/n)$ ; de même pour les complexes de modules. Le morphisme trace  $H^0(X, \mathcal{K}_X) \rightarrow \mathbb{Z}/n$ , ou  $R\Gamma(X, \mathcal{K}_X) \rightarrow \mathbb{Z}/n$ , définit un accouplement  $R\Gamma(X, \mathcal{K}) \otimes^L R\Gamma(X, D\mathcal{K}) \rightarrow \mathbb{Z}/n$ . La dualité de Poincaré entre cohomologie et cohomologie à supports propres d'un ouvert  $j : U \hookrightarrow X$  de  $X$  dit que, pour  $\mathcal{K} = j_! \mathbb{Z}/n$ , cet accouplement identifie chaque facteur au dual de l'autre.

J'expose ci-dessous une démonstration, qui m'a été communiquée par M. Artin, de ce que pour  $\mathcal{K} \in \text{Ob } D_c^b(X, \mathbb{Z}/n)$ , cet accouplement est toujours parfait, i.e. définit un isomorphisme

$$R\Gamma(X, \mathcal{K}) \xrightarrow{\sim} DR\Gamma(X, D\mathcal{K}). \quad (2.1.1)$$

Pour tout faisceau constructible  $\mathcal{F}$ , posons

$${}^i H^i(X, \mathcal{F}) = \mathbb{Z}/n\text{-dual de } H^{-i}(X, D\mathcal{F}).$$

Que (2.1.1) soit un isomorphisme équivaut au

**Théorème 2.2.** *Pour  $\mathcal{F}$  un faisceau constructible de  $\mathbb{Z}/n$ -modules, on a*

$$H^i(X, \mathcal{F}) \xrightarrow{\sim} {}^i H^i(X, \mathcal{F}). \quad (2.2.1)$$

**Lemme 2.3.** *Soit  $f : X \rightarrow Y$  un morphisme génériquement étale entre courbes lisses sur  $k$ . On a  $\mathcal{K}_X = f^* \mathcal{K}_Y = Rf^! \mathcal{K}_Y$ , avec  $\text{Tr}_f$  pour flèche d'adjonction  $Rf_! Rf^! \mathcal{K}_Y \rightarrow \mathcal{K}_Y$ .*

On se ramène à vérifier que pour  $f$  fini, on a  $f_* Rf^! \mathcal{K}_Y = R\mathcal{H}om(f_* \mathbb{Z}/n, \mathcal{K}_Y)$  est  $f_* \mathbb{Z}/n$ , avec  $\text{Tr}_f$  pour flèche d'adjonction. La nullité des  $\mathcal{E}xt^i$  ( $i > 0$ ) résulte de 1.3, et l'assertion en résulte.

On peut dire, plus explicitement, que  $Rf^!$  est le foncteur dérivé du foncteur  $f^! : f^! \mathcal{F}(U) = \text{hom}(f_! \mathbb{Z}_U, \mathcal{F})$  et 1.3 implique la nullité des  $R^i f^! \mathbb{Z}/n$  pour  $i > 0$ .

**Corollaire 2.4.** *Soit  $f : X' \rightarrow X$  un morphisme génériquement étale de courbes projectives et lisses sur  $k$ . On a  ${}^i H^i(X, f_* \mathcal{F}) = {}^i H^i(X', \mathcal{F})$ ; cet isomorphisme est fonctoriel et le diagramme*

$$\begin{array}{ccc} H^i(X, f_* \mathcal{F}) & \longrightarrow & {}^i H^i(X, f_* \mathcal{F}) \\ \parallel & & \parallel \\ H^i(X', \mathcal{F}) & \longrightarrow & {}^i H^i(X', \mathcal{F}) \end{array}$$

*est commutatif.*

L'isomorphisme est donné par 1.2 :  $Df_* \mathcal{F} = f_* D\mathcal{F}$ .

### 2.5

Prouvons 2.2. Si  $\mathcal{F}$  est réduit à  $\mathbb{Z}/n$  en un point, prolongé par 0, on a  $H^*(D\mathcal{F}) = \text{Ext}^*(\mathcal{F}, \mathcal{K}_X) = \mathbb{Z}/n$  en degré 0, et dans l'accouplement  $H^*(\mathcal{F}) \otimes H^*(D\mathcal{F}) \rightarrow \mathbb{Z}/n$ , on a  $1 \otimes 1 \mapsto 1$  (Cycle, 2.1.5) : la dualité est parfaite. Le cas où  $\mathcal{F}$  est à support fini se traite de même.

Pour  $\mathcal{F}$  constructible quelconque,  $\mathcal{A}$  le sous-faisceau de ses sections à support fini, et  $\mathcal{G} = \mathcal{F}/\mathcal{A}$ , la suite exacte

$$0 \longrightarrow \mathcal{A} \longrightarrow \mathcal{F} \longrightarrow \mathcal{G} \longrightarrow 0 \quad (2.5.1)$$

fournit un diagramme

$$\begin{array}{ccccccccc}
 0 & \longrightarrow & H^0(X, \mathcal{A}) & \longrightarrow & H^0(X, \mathcal{F}) & \longrightarrow & H^0(X, \mathcal{G}) & \longrightarrow & 0 \\
 & & \downarrow \wr & & \downarrow & & \downarrow & & \\
 0 & \longrightarrow & {}'H^{-1}(X, \mathcal{F}) & \longrightarrow & {}'H^{-1}(X, \mathcal{F}) & \longrightarrow & {}'H^0(X, \mathcal{A}) & \longrightarrow & {}'H^0(X, \mathcal{F}) & \longrightarrow & 0
 \end{array} \quad (2.5.2)$$

et des isomorphismes compatibles  $H^i(X, \mathcal{F}) \xrightarrow{\sim} H^i(X, \mathcal{G})$ ,  ${}'H^i(X, \mathcal{F}) \xrightarrow{\sim} {}'H^i(X, \mathcal{G})$  ( $i \neq 0, -1$ ). Si  $j : U \rightarrow X$  est un ouvert sur lequel  $\mathcal{F}$  est localement constant, on a une suite exacte

$$0 \longrightarrow \mathcal{G} \longrightarrow j_* j^* \mathcal{F} \longrightarrow \mathcal{B} \longrightarrow 0 \quad (2.5.3)$$

avec  $\mathcal{B}$  à support fini. Puisque  ${}'H^i(X, j_* j^* \mathcal{F}) = D H^{2-i}(X, j_* (j^* \mathcal{F})^\vee(1))$  d'après 1.3, cet  ${}'H^i = 0$  pour  $i < 0$  et (2.5.2) et la suite exacte longue définie par (2.5.3) montrent que  ${}'H^i$  est toujours nul pour  $i < 0$ .

Si  $\mathcal{F} = \mathbb{Z}/n$ , le théorème est vrai pour  $i = 0$  et 2. Ceci exprime que, pour  $X$  connexe, le morphisme trace :  $H^2(X, \mu_n) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}/n$  est un isomorphisme. D'après 2.4, le théorème reste vrai pour  $i = 0$  et  $\mathcal{F} = f_* \mathbb{Z}/n$ .

Pour  $\mathcal{F}$  à nouveau quelconque et  $\mathcal{G}$  comme plus haut, il existe  $f : X' \rightarrow X$  comme en 2.4 tel que  $\mathcal{G}$  se plonge dans  $f_* \mathbb{Z}/n$  :

$$0 \longrightarrow \mathcal{G} \longrightarrow f_* \mathbb{Z}/n \longrightarrow \mathcal{Q} \longrightarrow 0.$$

Changeant  $X'$  en un  $X''/X'$ , on peut supposer que  $H^i(X, \mathcal{F}) \rightarrow H^i(X, f_* \mathbb{Z}/n) = H^i(X', \mathbb{Z}/n)$  est nul pour  $i > 0$ . Considérons alors

$$\begin{array}{ccccccccccccccc}
 0 & \rightarrow & H^0(X, \mathcal{G}) & \rightarrow & H^0(S', \mathbb{Z}/n) & \rightarrow & H^0(X, \mathcal{Q}) & \rightarrow & H^1(X, \mathcal{G}) & \xrightarrow{0} & H^1(X', \mathbb{Z}/n) & \rightarrow & H^1(X, \mathcal{Q}) & \rightarrow & \dots \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \\
 0 & \rightarrow & {}'H^0(X, \mathcal{G}) & \rightarrow & {}'H^0(X', \mathbb{Z}/n) & \rightarrow & {}'H^0(X, \mathcal{Q}) & \rightarrow & {}'H^1(X, \mathcal{G}) & \rightarrow & {}'H^1(X', \mathbb{Z}/n) & \rightarrow & {}'H^1(X, \mathcal{Q}) & \rightarrow & \dots
 \end{array}$$

L'isomorphisme en  $H^0(X')$  fournit  $H^0(X, \mathcal{G}) \hookrightarrow {}'H^0(X, \mathcal{G})$ , et la même injectivité pour  $\mathcal{F}$  (2.5.2). Appliqué à  $\mathcal{Q}$ , cela donne  $H^1(X, \mathcal{G}) \hookrightarrow {}'H^1(X, \mathcal{G})$ . On applique cela à  $H^1(X', \mathbb{Z}/n)$ . Ce groupe ayant même ordre que  ${}'H^1(X', \mathbb{Z}/n) = D(H^1(X', \mathbb{Z}/n)(1))$ , on trouve un isomorphisme, et  $H^1(X, \mathcal{G}) \xrightarrow{\sim} {}'H^1(X, \mathcal{G})$ . De même pour  $\mathcal{F}$ . Pour  $i = 2$ , on sait déjà que  $H^2(X', \mathbb{Z}/n) \xrightarrow{\sim} {}'H^2(X', \mathbb{Z}/n)$ , et on procède de même, puis s'arrête, faute de combattants.

### 3 Dualité de Poincaré pour les courbes

Dans ce paragraphe, nous prouvons la compatibilité (Arcata 6.2.2.3).

#### 3.1

Les notations sont celles de (Arcata 6.2.3) :  $\bar{X}$  est une courbe projective, lisse et connexe sur un corps algébriquement clos  $k$ ,  $D$  est un diviseur réduit sur  $\bar{X}$ , 0 un point de  $X = \bar{X} \setminus D$

$$X \xhookrightarrow{j} \bar{X} \xleftarrow{i} D,$$

et  $\text{Pic}_D(\bar{X}) = H^1(\bar{X}, {}_D\mathbb{G}_m)$  où  ${}_D\mathbb{G}_m$  est le faisceau des sections de  $\mathbb{G}_m$  congrues à 1 mod  $D$ . On rappelle que  $H^1(X, \mu_n) = \text{Pic}_D^0(\bar{X})_n$ , et que  $x \rightarrow \mathcal{O}(x)$  définit une application canonique  $f : X \rightarrow \text{Pic}_D(\bar{X})$ . On pose  $f_0(x) = f(x) - f(0) : X \rightarrow \text{Pic}_D^0(\bar{X})$ .

Notons encore  $j$  l'inclusion de  $X \times X$  dans  $X \times \bar{X}$ . La diagonale  $\Delta$  de  $X \times X$  est fermée dans  $X \times \bar{X}$ ; elle définit une classe dans  $H_{\Delta}^2(X \times X, \mu_n) = H_{\Delta}^2(X \times \bar{X}, j_* \mu_n)$ . On note  $c$  son image dans  $H^2(X \times \bar{X}, j_* \mu_n)$ .

La formule de Künneth assure que

$$H^\bullet(X \times \bar{X}, j_* \mu_n) = H^\bullet(X, \mathbb{Z}/n) \otimes H^\bullet(\bar{X}, j_* \mu_n) = H^\bullet(X, \mathbb{Z}/n) \otimes H_c^\bullet(X, \mu_n).$$

Nous nous proposons de calculer la  $(1, 1)$ -composante de  $c$ ,

$$c^{1,1} \in H^1(X, \mathbb{Z}/n) \otimes H_c^1(X, \mu_n) = H^1(X, H_c^1(X, \mu_n)) = H^1(X, \text{Pic}_D^0(\bar{X})_n).$$

La suite exacte

$$0 \longrightarrow \mathrm{Pic}_D^0(\bar{X})_n \longrightarrow \mathrm{Pic}_D^0(\bar{X}) \xrightarrow{n} \mathrm{Pic}_D^0(\bar{X}) \longrightarrow 0$$

fait de  $\mathrm{Pic}_D^0(\bar{X})$  un  $\mathrm{Pic}_D^0(\bar{X})_n$ -torseur sur  $\mathrm{Pic}_D^0(\bar{X})$ . Notons,  $u$  la classe, dans  $H^1(X, H_c^1(X, \mu_n)) = H^1(X, \mathrm{Pic}_D^0(\bar{X})_n)$ , de son image réciproque par  $f_0$ .

**Proposition 3.2.** *Avec les notations précédentes,  $c^{1,1} = -u$ .*

Soit  $e$  la différence des images dans  $H^2(X \times \bar{X}, j_! \mu_n)$  des classes de cohomologie de  $\Delta$  et  $X \times \{0\}$  étant de type de Künneth  $(0, 2)$ , on a  $c^{1,1} = e^{1,1}$ . Soit la suite spectrale de Leray pour  $\mathrm{pr}_1 : X \times \bar{X} \rightarrow X$  et le faisceau  $j_! \mu_n$  :

$$E_2^{pq} = H^p(X, R^q \mathrm{pr}_{1*} j_! \mu_n) = H^p(X, H_c^q(X, \mu_n)) \Rightarrow H^{p+q}(X \times \bar{X}, j_! \mu_n).$$

Elle dégénère : c'est le produit tensoriel de  $H^\bullet(X)$  par la suite spectrale de Leray (triviale) pour  $\bar{X} \rightarrow \mathrm{Spec}(k)$  et le faisceau  $j_! \mu_n$ . Le diviseur  $\Delta - X \times \{0\}$  est fibre par fibre de degré 0, de sorte que l'image de  $e$  dans  $E^{0,2}$  est nulle. On peut donc parler de son image  $\bar{e}$  dans  $E^{1,1}$ , et il nous faut montrer que  $\bar{e} = -u$ .

Soit  $\mathcal{G}$  sur  $X \times \bar{X}$  le sous-faisceau de  $\mathbb{G}_m$  formé des sections locales dont la restriction au sous-schéma  $X \times D$  est 1. On a encore une suite exacte

$$0 \longrightarrow j_! \mu_n \longrightarrow \mathcal{G} \longrightarrow \mathcal{G} \longrightarrow 0 \quad (3.2.1)$$

et  $e$  est l'image par  $\partial$  de la classe  $e_1 \in H^1(X \times \bar{X}, \mathcal{G})$  du faisceau inversible  $\mathcal{O}(\Delta - X \times \{0\})$  trivialisé par 1 sur  $X \times D$ .

L'image directe par  $R\mathrm{pr}_{1*}$  du triangle distingué par (2.2.1) est un triangle distingué

$$\xrightarrow{\partial} R\mathrm{pr}_{1*} j_! \mu_n \longrightarrow R\mathrm{pr}_{2*} \mathcal{G} \longrightarrow R\mathrm{pr}_{2*} \mathcal{G} \xrightarrow{\partial} \quad (3.2.2)$$

et le diagramme

$$\begin{array}{ccc} H^1(X \times \bar{X}, \mathcal{G}) & \xrightarrow{\partial} & H^2(X \times \bar{X}, j_! \mu_n) \\ \parallel_{(1)} & & \parallel \\ H^1(X, R\mathrm{pr}_{1*} \mathcal{G}) & \xrightarrow{\partial} & H^2(X, R\mathrm{pr}_{1*} j_! \mu_n) \end{array}$$

est commutatif : notre problème devient celui d'identifier l'image dans  $E^{1,1} = H^1(X, H_c^1(X, \mu_n))$  (l'image dans  $E^{0,2}$  étant nulle) de l'image par  $\partial_{(3.2.2)} : H^1(X, R\mathrm{pr}_{1*} \mathcal{G}) \rightarrow H^2(X, R\mathrm{pr}_{1*} j_! \mu_n)$  de la classe, encore notée  $e_1$ , qui correspond à  $e_1$  par (1).

Le faisceau  $R^1 \mathrm{pr}_{1*} \mathcal{G}$  est défini par le schéma en groupe sur  $X$  image réciproque du groupe algébrique  $\mathrm{Pic}_D(\bar{X})$  sur  $\mathrm{Spec}(k)$ , et l'image de  $e_1$  dans  $H^0(X, R^1 \mathrm{pr}_{1*} \mathcal{G}) = \mathrm{hom}(X, \mathrm{Pic}_D(\bar{X}))$  est  $f_0$ .

Représentons le triangle (3.2.2) comme défini par une suite exacte courte de complexes de faisceaux.

$$0 \longrightarrow \mathcal{A} \longrightarrow \mathcal{B} \longrightarrow \mathcal{C} \longrightarrow 0.$$

Soit  $\mathcal{B}'$  le sous-faisceau de

$$\tau_{\leq 1} \mathcal{B} : \cdots \mathcal{B}^0 \rightarrow \ker(d) \rightarrow 0 \cdots$$

obtenu en remplaçant  $\mathcal{B}^1 = \ker(d)$  par l'image réciproque, par  $\ker(d) \rightarrow \underline{H}^1(\mathcal{B}) = \mathrm{Pic}_D(\bar{X})$  sur  $X$ , de  $\mathrm{Pic}_D^0(\bar{X})$  sur  $X$ . Soient  $\mathcal{A}' = \mathcal{A} \cap \mathcal{B}'$  et  $\mathcal{C}'$  l'image de  $\mathcal{B}'$ . On a  $\mathcal{A}' = \tau_{\leq 1}(\mathcal{A})$ , et  $\mathcal{C}'$  se déduit de  $\mathcal{C}$  comme  $\mathcal{B}'$  de  $\mathcal{B}$ , d'où un diagramme commutatif de suites exactes courtes

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & \mathcal{A} & \longrightarrow & \mathcal{B} & \longrightarrow & \mathcal{C} \longrightarrow 0 \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ 0 & \longrightarrow & \tau_{\leq 1} \mathcal{A} & \longrightarrow & \mathcal{B}' & \longrightarrow & \mathcal{C}' \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ 0 & \longrightarrow & H_c^1(X, \mu_n)[1] & \longrightarrow & \mathrm{Pic}_D^0(\bar{X})[1] & \longrightarrow & \mathrm{Pic}_D^0(\bar{X})[1] \longrightarrow 0 \end{array} \quad (3.2.3)$$

où la dernière ligne doit être vue comme une suite exactes de complexes de faisceaux réduits au degré 1 sur  $X$ .

- a)  $e \in H^2(X, \mathcal{A})$  provient de  $\tilde{e} \in H^2(X, \tau_{\leq 1} \mathcal{A})$  (car son image dans  $E^{02}$  est nulle). On cherche l'image  $\bar{e}$  de  $\tilde{e}$  dans  $H^2(X, H_c^1(X, \mu_n)[-1]) = H^1(X, H_c^1(X, \mu_n))$ .
- b)  $e_1 \in H^1(X, \mathcal{C})$  provient de  $\tilde{e}_1 \in H^1(X, \mathcal{C}')$ , car son image  $f_0$  dans  $H^0(X, \text{Pic}_D(\bar{X}))$  est dans  $H^0(X, \text{Pic}_D^0(\bar{X}))$ . On peut prendre  $\tilde{e} = \partial \tilde{e}_1$ .
- c) On a donc  $\bar{e} = \partial f_0$ , où  $\partial$  est défini par (3.2.2), et où on utilise les isomorphismes usuels  $H^2(X, \mathcal{F}[-1]) = H^1(X, \mathcal{F})$ . Ces isomorphismes anticommulent à  $\partial$ , de sorte que  $\bar{e} = -\partial f_0$ , pour  $\partial$  défini par la suite exacte

$$0 \longrightarrow H_c^1(X, \mu_n) \longrightarrow \text{Pic}_D^0(\bar{X}) \longrightarrow \text{Pic}_D^0(\bar{X}) \longrightarrow 0$$

On conclut par (Cycles, 1.1.1).

### 3.3

Pour tout homomorphisme  $\varphi : H_c^1(X, \mu_n) \rightarrow \mathbb{Z}/n$ , soit  $\varphi(u) \in H^1(X, \mathbb{Z}/n)$  l'image de  $u$  par  $\varphi : H^1(X, H_c^1(X, \mu_n)) \rightarrow H^1(X, \mathbb{Z}/n)$ . Si  $x \in H_c^1(X, \mu_n)$ , le cup-produit  $\varphi(u) \smile x$  est dans  $H_c^2(X, \mu_n)$ . On se propose de prouver que

**Proposition 3.4.**  $\text{Tr}(\varphi(u) \smile x) = \varphi(x)$ .

Cette identité se déduit, par application de  $\varphi$ , de

$$\text{Tr}(u \smile x) = x \tag{3.4.1}$$

où  $\text{Tr}$  est cette fois l'application

$$\text{Tr} : H_c^2(X, H_c^1(X, \mu_n) \otimes \mu_n) \longrightarrow H_c^1(X, \mu_n),$$

de sorte que  $x \mapsto \text{Tr}(u \smile x)$  est l'application composée

$$\begin{aligned} H_c^1(X, \mu_n) &\xrightarrow{u \otimes x} H^1(X, H_c^1(X, \mu_n)) \otimes H_c^1(X, \mu_n) \xleftarrow{\sim} H^1(X, \mathbb{Z}/n) \otimes H_c^1(X, \mu_n) \otimes H_c^1(X, \mu_n) \\ &\xrightarrow{(1)} H_c^2(X, \mu_n) \otimes H_c^1(X, \mu_n) \xrightarrow{\text{Tr} \otimes \text{id}} H_c^1(X, \mu_n) \end{aligned} \tag{3.4.2}$$

où (1) est donné par  $a \otimes b \otimes c \mapsto (a \smile c) \otimes b$ .

Exprimons ce morphisme en terme du morphisme trace  $\text{Tr} : H_c^3(X \times X, \mu_n^{\otimes 2}) \rightarrow H_c^2(X, \mu_n)$  relatif à la seconde projection. Pour  $x \in H_c^3$ ,  $\text{Tr}(x)$  se calcule ainsi : de ses composantes de Künneth, on ne garde que celle de type  $(2, 1)$ , et on applique  $\text{Tr} : H_c^2(X, \mu_n) \rightarrow \mathbb{Z}/n$ .

Notons  $u'$  l'image de  $u$  par l'application

$$\begin{aligned} H^1(X, H_c^1(X, \mu_n)) &\xleftarrow{\sim} H^1(X, \mathbb{Z}/n) \otimes H_c^1(X, \mu_n) = H^1(X, \mathbb{Z}/n) \otimes H^1(\bar{X}, j_! \mu_n) \\ &\longrightarrow H^2(X \times \bar{X}, \mathbb{Z}/n \boxtimes j_! \mu_n). \end{aligned}$$

Vu la relation entre Künneth et cup-produit, on a

$$\text{Tr}(u \smile x) = -\text{Tr}(u' \smile \text{pr}_1^* x).$$

Le second cup-produit est celui de (Cycle 1.2.4) :

$$H^2(X \times \bar{X}, \mathbb{Z}/n \boxtimes j_! \mu_n) \otimes H^1(\bar{X} \times \bar{X}, j_! \mu_n \boxtimes \mathbb{Z}/n) \longrightarrow H^3(\bar{X} \times \bar{X}, j_! \mu_n \boxtimes j_! \mu_n).$$

Le signe  $-$  provient de la permutation de deux symboles de degré 1 dans (1). Puisque  $c \smile \text{pr}_1^* x$  et  $c^{1,1} \smile \text{pr}_1^*$  ont même  $(2, 1)$ -composante de Künneth, et que  $u' = c^{1,1}$ , on a

$$\text{Tr}(u \smile x) = \text{Tr}(c \smile \text{pr}_1^* x).$$

Le cup-produit à droite peut cette fois s'interpréter comme le cup-produit (Cycle 1.2.5) de  $\text{cl}(\Delta) \in H_\Delta^2(X \times X, \mu_n)$  par  $\text{pr}_1^* x \in H_c^1(\Delta, \mu_n)$ . Sur  $\Delta$ , on a  $\text{pr}_1 = \text{pr}_2$ , d'où

$$\text{Tr}(c \smile \text{pr}_1^* x) = \text{Tr}(\text{cl}(\Delta) \smile \text{pr}_1^* x) = \text{Tr}(\text{cl}(\Delta) \smile \text{pr}_2^* x) = \text{Tr}(\text{cl}(\Delta)) \smile x = x.$$

## 4 Compatibilité SGA 4 XVIII 3.1.10.3

Dans [AGV72, XVIII], en proie au découragement, je n'ai pas vérifié la compatibilité du titre. Bien qu'elle s'avère n'être que fumée, je me crois tenu du réparer ici cette lacune. Pour  $f : X \rightarrow S$  séparé de type fini, il s'agissait de vérifier que le morphisme d'adjonction  $Rf_! Rf^! \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{L}$  est compatible à toute localisation étale  $k : V \rightarrow S$ . Désignant par  $k$  et  $f$  plusieurs flèches, comme ci-dessous, il s'agit de vérifier une commutativité :

$$\begin{array}{ccc} X_V & \xrightarrow{k} & X \\ \downarrow f & & \downarrow f \\ V & \xrightarrow{k} & S \end{array} \quad \begin{array}{ccc} k^* Rf_! Rf^! \mathcal{L} & \xrightarrow{k^*(\text{adj})} & k^* \mathcal{L} \\ \downarrow \sim & & \parallel \\ Rf_! Rf^! k^* \mathcal{L} & \xrightarrow{\text{adj}} & k^* \mathcal{L}. \end{array}$$

Au niveau des complexes, la commutativité voulue s'écrit (loc. cit.)

$$\begin{array}{ccc} k^* f_! f^! \mathcal{L} & \longrightarrow & k^* \mathcal{L} \\ \downarrow (1) & & \parallel \\ f_! f^! k^* \mathcal{L} & \longrightarrow & k^* \mathcal{L}. \end{array}$$

On la vérifie composante par composante, ce qui ramène à une compatibilité pour  $\mathcal{L}$  un faisceau et pour chacune des paires de foncteurs adjoints  $(f_{i!}, f_i^!)$ , notés simplement  $f^!$  et  $f_!$ . La flèche (1) est définie à partir de l'isomorphisme (2) :  $k^* f_! = f_! k^*$ , et d'un morphisme (3) :  $k^* f^! \rightarrow f^! k^*$  qui s'en déduit. Dans loc. cit., on introduit d'abord un morphisme (4) :  $k_! f_! \rightarrow f_! k_!$ , déduit de (2) par adjonction de  $k^* = k^!$  et de  $k_! : k_! f_! \rightarrow k_! f_! k^* k_! \rightarrow k_! k^* f_! k_! \rightarrow f_! k_!$ , et on déduit (3) de (4) par adjonction. Il revient au même de déduire (3) de (2) par adjonction de  $f_!$  et  $f^! : k^* \rightarrow f^! f_! k^* f^! \rightarrow f^! k^* f_! f^! \rightarrow f^! k^*$ .

Écrivant  $k$  pour  $k^*$  et omettant  $\mathcal{L}$ , la commutativité est alors celle du bord extérieur de

$$\begin{array}{ccc} k f_! f^! & \longrightarrow & f_! k f^! \longrightarrow f_! f^! f_! k f^! \longrightarrow f_! f^! k f_! f^! \\ \parallel & & \parallel \\ k f_! f^! & \longleftarrow & f_! f^! k f_! f^! \\ \downarrow & & \downarrow \\ k & \longleftarrow & f_! f^! k. \end{array}$$

En première ligne, on trouve un homomorphisme  $k_! f^! \rightarrow f_! f^! k f_! f^!$ , défini parce que  $k f_! f^!$  est de la forme  $f_! X$  ( $X = k f^!$ ) ; il admet pour rétraction le morphisme d'adjonction en seconde ligne, et la commutativité du carré inférieur la functorialité de ce morphisme d'adjonction.

## Chapitre 6

# Applications de la formule des traces aux sommes trigonométriques

Dans cet exposé, j'explique comment la formule des traces permet de calculer ou d'étudier diverses sommes trigonométriques et comment, jointe à la conjecture de Weil, elle peut permettre de les majorer.

Les deux premiers paragraphes donnent un “mode d'emploi” de ces outils. Le paragraphe 3 est un exposé, dans un langage cohomologique, des résultats de Weil sur les sommes à 1 variable. Les paragraphes 4 à 6 forment une étude détaillée des sommes de Gauss et de Jacobi – y inclus les résultats anciens et récents de Weil sur les caractères de Hecke définis par des sommes de Jacobi. Au paragraphe 7, nous étudions une généralisation à plusieurs variables des sommes de Kloosterman. Enfin, au paragraphe 8, on trouvera quelques indications sur d'autres usages qui ont été faits ou peuvent être faits de ces méthodes.

## Notations

### 0.1

On utilise les notations de Rapport, paragraphe 1. On aura souvent à considérer une extension finie  $\mathbb{F}_{q^n} \subset \mathbb{F}$  de  $\mathbb{F}_q$ . On notera par un indice 0 un objet sur  $\mathbb{F}_q$ , et par un indice 1 un objet sur  $\mathbb{F}_{q^n}$ . Remplacer un indice 0 par un indice 1 (resp. supprimer l'indice) signifie qu'on étend les scalaires à  $\mathbb{F}_{q^n}$  (resp. à  $\mathbb{F}$ ).

### 0.2

On désigne par  $\ell$  un nombre premier  $\neq p$ . Nous utilisons librement le langage des  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux, ainsi que celui des  $E_\lambda$ -faisceaux, pour  $E_\lambda$  une extension finie de  $\mathbb{Q}_\ell$  (cf. Rapport, paragraphe 2 et spécialement 2.11).

### 0.3

Soit  $H^\bullet$  un espace vectoriel gradué. Si  $T$  est un endomorphisme de  $H^\bullet$ , on pose (cf. Cycle, 1.3.5)

$$\mathrm{Tr}(T, H^\bullet) = \sum (-1)^i \mathrm{Tr}(T, H^i).$$

## 1 Principes

### 1.1

Soient  $X_0$  un schéma séparé de type fini sur  $\mathbb{F}_q$ ,  $E_\lambda$  une extension finie de  $\mathbb{Q}_\ell$  et  $\mathcal{F}_0$  un  $E_\lambda$ -faisceau sur  $X - 0$ . La formule des traces dit que

$$\sum_{x \in X^F} \mathrm{Tr}(F_x^*, \mathcal{F}) = \sum (-1)^i \mathrm{Tr}(F^*, H_c^i(X, \mathcal{F})). \quad (1.1.1)$$

Avec la notation 0.3, le membre de droite s'écrit simplement  $\text{Tr}(F^*, H_c^\bullet(X, \mathcal{F}))$ .

Cette formule des traces pour les  $E_\lambda$ -faisceaux peut soit être déduite de Rapport 4.10 par passage à limite (cf. Rapport 4.11 à 4.13), soit être déduite de la formule des traces pour les  $\mathbb{Q}_\ell$ -faisceaux (Rapport 3.2) par la méthode de (Fonctions  $L$  mod.  $\ell^n$ , 4.3).

Nous allons interpréter diverses sommes trigonométriques comme le membre de gauche de (1.1.1), pour  $X_0$  et  $\mathcal{F}_0$  convenables.

## 1.2

Soit  $A$  un groupe fini. Un  $A$ -torseur sur un schéma  $X$  est un faisceau  $T$  sur  $X$ , muni d'une action à droite de  $A$ , qui, localement (pour la topologie étale) sur  $X$ , est isomorphe au faisceau constant  $A$  sur lequel  $A$  agit par translation à droite.

Si  $\tau : A \rightarrow B$  est un homomorphisme, et  $T$  un  $A$ -torseur, il existe à isomorphisme unique près un et un seul  $B$ -torseur  $\tau(T)$ , muni d'un morphisme de faisceaux  $\tau : T \rightarrow \tau(T)$  tel que

$$\tau(ta) = \tau(t)\tau(a). \quad (1.2.1)$$

Si  $T$  est un  $A$ -torseur sur  $X$ , et  $\rho$  une représentation linéaire de  $A : \rho : A \rightarrow \text{GL}(V)$  ( $V$  un espace vectoriel de dimension finie sur  $E_\lambda$ ), il existe à isomorphisme unique près un seul  $E_\lambda$ -faisceau  $\mathcal{F}$ , lisse de rang  $\dim(V)$ , muni d'un morphisme de faisceaux

$$\rho : T \rightarrow \underline{\text{Isom}}(V, \mathcal{F}). \quad (1.2.2)$$

tel que  $\rho(ta) = \rho(t)\rho(a)$ . On le note  $\rho(T)$ . Pour  $\tau : A \rightarrow B$  et  $\rho$  une représentation de  $B$ , on a un isomorphisme canonique  $\rho(\tau(T)) = (\rho\tau)(T)$ .

Dans ce paragraphe (sauf l'appendice), on ne considère que le cas où  $A$  est commutatif et où  $V = E_\lambda : \rho$  est un caractère  $A \rightarrow E_\lambda^\times$ , et  $\rho(T)$  un  $E_\lambda$ -faisceau lisse de rang un. Le morphisme (1.2.2) s'interprète comme un morphisme partout non nul

$$\rho : T \rightarrow \rho(T) \quad (1.2.3)$$

tel que  $\rho(ta) = \rho(a)\rho(t)$ .

## 1.3

Soient  $S$  un schéma,  $G$  un schéma en groupe commutatif sur  $S$ , et  $G'$  une extension de schémas en groupes commutatifs sur  $S$

$$0 \longrightarrow A \longrightarrow G' \xrightarrow{\pi} G \longrightarrow 0.$$

Le faisceau  $T$  des sections locales de  $\pi$  est alors un  $A$ -torseur sur  $G$ .

Si  $X$  est un schéma sur  $S$ , et  $f, g$  deux  $S$ -morphisms de  $X$  dans  $G$ , du fait que  $T$  est défini par une extension, on a un isomorphisme canonique

$$(f + g)^*T = f^*T + g^*T. \quad (1.3.1)$$

A gauche,  $f + g$  est la somme de  $f$  et  $g$ , au sens de la loi de groupe  $G$  : à droite,  $+$  désigne une somme de toseurs.

Si  $f : X \rightarrow G$  se factorise par  $G'$ ,  $f^*T$  est trivial (et une factorisation donne une trivialisation) ; à isomorphisme (non unique) près, le  $A$ -torseur  $f^*T$  ne dépend que de l'image de  $f$  dans  $\text{hom}_S(X, G)/\pi \text{hom}_S(X, G') : \text{il est donné par le morphisme } \partial \text{ dans la suite exacte}$

$$\text{hom}(X, G') \longrightarrow \text{hom}(X, G) \xrightarrow{\partial} H^1(X, A).$$

Nous appliquerons ces constructions aux suites exactes de Kummer  $0 \rightarrow \mu_n \rightarrow \mathbb{G}_m \rightarrow \mathbb{G}_m \rightarrow 0$ , et aux toseurs de Lang.



## 1.4 Le torseur de Lang

Soit  $G_0$  un groupe algébrique commutatif connexe sur  $\mathbb{F}_q$  (pour le cas non commutatif, voir l'appendice). La loi de groupe est notée *multiplicativement*. L'isogénie de Lang

$$\mathfrak{L} : G_0 \rightarrow G_0 : x \mapsto Fx \cdot x^{-1}$$

est étale ; son image, un sous-groupe ouvert de  $G_0$ , ne peut être que  $G_0$  lui-même ; son noyau est le groupe fini  $G_0(\mathbb{F}_q)$ . Le *torseur de Lang*  $L$  est le  $G_0(\mathbb{F}_q)$ -torseur sur  $G_0$  défini par la suite exacte

$$0 \longrightarrow G_0(\mathbb{F}_q) \longrightarrow G_0 \xrightarrow{\mathfrak{L}} G_0 \longrightarrow 0. \quad (1.4.1)$$

**Notation** On note encore  $L$  et  $\mathfrak{L}$  (ou  $L_{(q)}$  et  $\mathfrak{L}_{(q)}$ ) les objets déduits de  $L$  et  $\mathfrak{L}$  par extension du corps de base. En cas de besoin, on précisera par un indice 0 ou 1.

**Exemples** Pour  $G_0 = \mathbb{G}_a$  ou  $\mathbb{G}_m$ , les suites (1.4.1) s'écrivent

$$0 \longrightarrow \mathbb{F}_q \longrightarrow \mathbb{G}_a \xrightarrow{x^q - x} \mathbb{G}_a \longrightarrow 0 \quad (1.4.2)$$

$$0 \longrightarrow \mu_{q-1} \longrightarrow \mathbb{G}_m \xrightarrow{x^{q-1}} \mathbb{G}_m \longrightarrow 0 \quad (1.4.3)$$

## 1.5

Calculons l'endomorphisme  $F^*$  de la fibre du torseur de Lang en  $\gamma \in G^F = G_0(\mathbb{F}_q)$ . Si  $g \in \mathfrak{L}^{-1}(\gamma) \subset G$ , on a  $Fg = Fg \cdot g^{-1} \cdot g = \gamma g$ . Dès lors (Rapport, 1.2)

$$\text{sur } L_0(G_0)_\gamma \simeq \mathfrak{L}^{-1}(\gamma), F^* \text{ est } g \mapsto g\gamma^{-1}. \quad (1.5.1)$$

## 1.6

Sur  $\mathbb{F}_{q^n}$ , l'identité  $F_{(q^n)} = F_{(q)}^n$  entre endomorphismes de  $G_1$  implique que  $\mathfrak{L}_{(q^n)} = \mathfrak{L}_{(q)} \circ \prod_{i=0}^{n-1} F_{(q)}^i$ . Sur  $G_0(\mathbb{F}_{q^n})$ ,  $F_{(q)}^i$  agit comme l'élément  $x \mapsto x^{q^i}$  de  $\text{Gal}(\mathbb{F}_{q^n}/\mathbb{F}_q)$ . Sur  $G_0(\mathbb{F}_{q^n})$ ,  $\prod F_{(q)}^i$  est donc le composé de la norme  $G_0(\mathbb{F}_{q^n}) \rightarrow G_0(\mathbb{F}_q)$  et de l'inclusion  $G_0(\mathbb{F}_q) \subset G_0(\mathbb{F}_{q^n})$  : le diagramme

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & G_0(\mathbb{F}_{q^n}) & \longrightarrow & G_1 & \xrightarrow{\mathfrak{L}_{(q^n)}} & G_1 \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow N & & \downarrow \prod_{i=0}^{n-1} F_{(q)}^i & \parallel & \\ 0 & \longrightarrow & G_0(\mathbb{F}_q) & \longrightarrow & G_q & \xrightarrow{\mathfrak{L}_{(q)}} & G_1 \longrightarrow 0 \end{array} \quad (1.6.1)$$

est commutatif. Dans le langage des toseurs, ceci fournit un isomorphisme canonique entre  $G_0(\mathbb{F}_q)$ -torseurs sur  $G_1$

$$NL_{(q^n)} = L_{(q)}. \quad (1.6.2)$$

**Définition 1.7.** Soient  $f_0 : X_0 \rightarrow G_0$  un morphisme et  $\chi : G_0(\mathbb{F}_q) \rightarrow E_\lambda^\times$  un caractère. On pose  $\mathcal{F}(\chi, f_0) = \chi^{-1}(f_0^*(L_0(G_0))) = f_0^* \chi^{-1}(L_0(G_0))$ .

On a les propriétés de fonctorialité suivantes :

a)  $\mathcal{F}(\chi, f_0)$  est bimultiplicatif en  $\chi$  et  $f_0$  :

$$\mathcal{F}(\chi, f'_0 \cdot f''_0) = \mathcal{F}(\chi, f'_0) \otimes \mathcal{F}(\chi, f''_0), \quad (1.7.1)$$

$$\mathcal{F}(\chi' \chi'', f_0) = \mathcal{F}(\chi', f_0) \otimes \mathcal{F}(\chi'', f_0). \quad (1.7.2)$$

Cela résulte de la définition de  $\chi(T)$ , pour  $T$  un toseur, joint à (1.3.1) pour (1.7.1).

b) Pour  $g_0 : Y_0 \rightarrow X_0$  un morphisme, on a

$$\mathcal{F}(\chi, f_0 \circ g_0) = g_0^* \mathcal{F}(\chi, f_0). \quad (1.7.3)$$

En particulier,  $\mathcal{F}(\chi, f_0) = f_0^* \mathcal{F}(\chi)$ , où  $\mathcal{F}(\chi)$  désigne  $\mathcal{F}(\chi, \text{id}_{G_0})$ ,

c) Pour  $u_0 : G_0 \rightarrow H_0$  un morphisme, et  $\chi : H_0(\mathbb{F}_q) \rightarrow E_\lambda^\times$ , on a

$$\mathcal{F}(\chi, u_0 f_0) = \mathcal{F}(\chi u_0, f_0). \quad (1.7.4)$$

d) Pour  $G_0 = \prod_{i \in I} G_0^i$ ,  $\chi$  de coordonnées  $\chi_i$  ( $i \in I$ ) et  $f_0$  de coordonnées  $f_0^i$ , il résulte de (1.7.1) à (1.7.4) que

$$\mathcal{F}(\chi, f_0) = \bigotimes_{i \in I} \mathcal{F}(\chi_i, f_0^i). \quad (1.7.5)$$

Noter le  $\chi^{-1}$  dans la définition 1.7. Il assure que, pour  $x \in X^F$ , on ait sur  $\mathcal{F}(\chi, f_0)_x$

$$F_x^* = \chi f_0(x) \quad (1.7.6)$$

(utiliser que la fibre en  $x$  du morphisme (1.2.2), pour  $\rho = \chi^{-1}$ , commute à  $F_x^*$ , et (1.5.1)).

Si  $\mathcal{F}(\chi, f_0)_1$  est le faisceau déduit de  $\mathcal{F}(\chi, f_0)$  par extension du corps de base à  $\mathbb{F}_{q^n}$ , on déduit de (1.6.2) que

$$\mathcal{F}(\chi, f_0)_1 = \mathcal{F}(\chi \circ N, f_1). \quad (1.7.7)$$

## 1.8 Abus de notations

(i) Si  $\Xi$  est une notation pour l'application composée  $\chi f_0 : X_0(\mathbb{F}_q) \rightarrow E_\lambda^\times$ , on écrira parfois  $\mathcal{F}(\Xi)$  au lieu de  $\mathcal{F}(\chi, f_0)$ . Grâce à (1.7.1) à (1.7.5), on ne risque guère d'ambiguïté. Par exemple :

a) on écrit  $\mathcal{F}(\chi)$  pour  $\mathcal{F}(\chi, \text{id}_{G_0})$  (notations déjà utilisée en 1.7b) ;

b) on écrit  $\mathcal{F}(\chi f_0)$  pour  $\mathcal{F}(\chi, f_0)$  ;

c) avec les notations de 1.7d), on écrit  $\mathcal{F}(\prod \chi_i f_0^i)$  pour  $\mathcal{F}(\chi, f)$ .

Avec cette notation, (1.7.4) exprime que l'écriture  $\mathcal{F}(\chi u_0 f_0)$  n'est pas ambiguë, (1.7.1) (1.7.2) (1.7.5) expriment une multiplicativité de  $\mathcal{F}(\Xi)$  en  $\Xi$ , et (1.7.6) se récrit  $F_x^* = \Xi(x)$  sur  $\mathcal{F}(\Xi)_x$ .

(ii) Si  $X$  est un schéma sur une extension  $k$  de  $\mathbb{F}_q$ , et que  $f$  est un morphisme de  $X$  dans  $G_0 \otimes_{\mathbb{F}_q} k$ , on notera encore  $\mathcal{F}(\chi, f)$ ,  $\mathcal{F}(\chi f)$ , ou  $\mathcal{F}(\chi)$  (pour  $f$  une inclusion) l'image réciproque par  $f$  du  $E_\lambda$ -faisceau déduit de  $\chi^{-1}(L_0(G))$  par extension des scalaires de  $\mathbb{F}_q$  à  $k$ . Si  $f_0$  est le composé  $X \rightarrow G_0 \otimes_{\mathbb{F}_q} k \rightarrow G_0$ , c'est encore le  $\mathcal{F}(\chi, f_0)$  de 1.7. Pour  $k$  est une extension finie de  $\mathbb{F}_q$ , on a  $\mathcal{F}(\chi f) = \chi(\chi N_{k/\mathbb{F}_q} f)$ .

Appliquant (1.1.1) à (1.7.6) et (1.7.7), on trouve :

**Théorème 1.9.** Soient  $S_0$  un schéma séparé de type fini sur  $\mathbb{F}_q$ ,  $G_0$  un groupe algébrique commutatif connexe sur  $\mathbb{F}_q$ ,  $f_0 : S_0 \rightarrow G_0$  un morphisme et  $\chi : G_0(\mathbb{F}_q) \rightarrow E_\lambda^\times$ . On a

$$\sum_{s \in S_0(\mathbb{F}_q)} \chi f_0(s) = \text{Tr}(F^*, H_c^\bullet(S, \mathcal{F}(\chi, f_0))) \quad (1.9.1)$$

et, pour tout entier  $n \geq 1$

$$\sum_{s \in S_0(\mathbb{F}_{q^n})} \chi \circ N_{\mathbb{F}_{q^n}/\mathbb{F}_q} f_0(s) = \text{Tr}(F^{*n}, H_c^\bullet(S, \mathcal{F}(\chi, f_0))). \quad (1.9.2)$$

### 1.9.3 Remarque

Prenons pour  $G_0$  un produit. Avec les notations de 1.7d) et 1.8c), la formule (1.9.2) devient

$$\sum_{s \in S_0(\mathbb{F}_{q^n})} \prod_i \chi_i \circ N_{\mathbb{F}_{q^n}/\mathbb{F}_q}(f_0^i(s)) = \text{Tr}\left(F^{*n}, H_c^\bullet\left(S, \mathcal{F}\left(\prod_i \chi_i f_0^i\right)\right)\right).$$

### 1.9.4 Remarque

Prenons  $G_0 = \{e\}$ . La formule (1.9.1) devient

$$|S_0(\mathbb{F}_q)| = \sum_{s \in S_0(\mathbb{F}_q)} 1 = \text{Tr}(F^*, H_c^\bullet(S, \mathbb{Q}_\ell)).$$

Il est rare qu'on puisse explicitement calculer le membre de droite de (1.9.1). Voici un exemple amusant, avec  $G_0 = \{e\}$ .

### 1.10 Exemple

Une quadrique projective non singulière de dimension impaire sur  $\mathbb{F}_q$  a le même nombre de points rationnels que l'espace projectif sur  $\mathbb{F}_q$  de la même dimension.

Si, sur  $\mathbb{C}$ ,  $X$  est une hypersurface quadrique non singulière dans l'espace projectif  $\mathbb{P}^{2N}$ , et  $Y$  un hyperplan, on sait que pour  $i \leq 2 \dim(X) = 2 \dim(Y)$ , les inclusions  $X \hookrightarrow \mathbb{P}^{2N} \hookleftarrow Y$  induisent des isomorphismes (en cohomologie ordinaire)

$$H^i(X, \mathbb{Q}) \xleftarrow{\sim} H^i(\mathbb{P}^{2N}, \mathbb{Q}) \xrightarrow{\sim} H^i(Y, \mathbb{Q}).$$

Par spécialisation, il en résulte que si  $X'_0$  est une hypersurface quadrique non singulière dans l'espace projectif  $\mathbb{P}_0^{2N}$  sur  $\mathbb{F}_q$ , et  $Y'_0$  un hyperplan, les inclusions  $X'_0 \hookrightarrow \mathbb{P}_0^{2N} \hookleftarrow Y'_0$  induisent des isomorphismes

$$H^i(X', \mathbb{Q}_\ell) \xleftarrow{\sim} H^i(\mathbb{P}^{2N}, \mathbb{Q}_\ell) \xrightarrow{\sim} H^i(Y', \mathbb{Q}_\ell).$$

Ces isomorphismes commutent à  $F^*$ , et on applique la formule des traces.

### 1.11

On peut aussi utiliser la formule des traces pour comprendre les formules classiques donnant le nombre de points rationnels des groupes linéaires sur les corps finis, et ceux de certains espaces homogènes (voir le paragraphe 8).

### 1.12

On dispose d'un dictionnaire permettant de traduire en termes cohomologiques ques divers types de manipulations classiques sur les sommes trigonométriques. Ce dictionnaire sera donné au paragraphe 2. L'énoncé cohomologique étant plus "géométrique," il pourra parfois s'appliquer à des situations où l'argument classique ne s'applique qu'après une extension du corps fini de base. Voici un exemple (un cas particulier d'un théorème de Kazhdan).

**Théorème 1.13** (Kazhdan). *Soit  $X_0$  un schéma sur  $\mathbb{F}_q$ . Supposons qu'il existe une action  $\rho$  de  $\mathbb{G}_a$  sur  $X$ , et un morphisme  $f : X \rightarrow Y$  de schémas sur  $\mathbb{F}$ , faisant de  $X$  un  $\mathbb{G}_a$ -torseur sur  $Y$ . Alors, le nombre de points rationnels de  $X_0$  est divisible par  $q$ .*

Supposons d'abord que  $\rho$ ,  $Y$  et  $f$  soient définis sur  $\mathbb{F}_q$ .

**Argument classique** Les fibres de  $f : X_0(\mathbb{F}_q) \rightarrow Y_0(\mathbb{F}_q)$  ont toutes  $q$  éléments :  $|X_0(\mathbb{F}_q)| = q \cdot |Y_0(\mathbb{F}_q)|$ , d'où la divisibilité.

**Traduction cohomologique** Les faisceaux images directes supérieures  $R^i f_! \mathbb{Q}_\ell$  sont

$$R^i f_! \mathbb{Q}_\ell = \begin{cases} \mathbb{Q}_\ell(-1) & \text{si } i = 2 \\ 0 & \text{pour } i \neq 2 \end{cases}$$

La suite spectrale de Leray de  $f$  dégénère donc en un isomorphisme

$$H_c^i(X, \mathbb{Q}_\ell) = H_c^{i-2}(Y, \mathbb{Q}_\ell)(-1).$$

Pour comprendre l'effet d'un twist à la Tate sur les valeurs propres de Frobenius, le plus commode est d'utiliser le point de vue galoisien (Rapport 1.8), et de noter que la substitution de Frobenius  $\varphi$  agit sur  $\mathbb{Q}_\ell(1)$  par multiplication par  $q$ . Les valeurs propres de  $F^*$  sur  $H_c^p(X, \mathbb{Q}_\ell)$  sont donc les produits par  $q$  des valeurs propres de  $F^*$  agissant sur  $H_c^{i-2}(Y, \mathbb{Q}_\ell)$ . On sait que celles-ci sont des entiers algébriques [DGK73, XXI 5.2.2]; dès lors

$$\begin{aligned} &\text{les valeurs propres de } F^* \text{ agissant sur } H_c^i(X, \mathbb{Q}_\ell) \text{ sont} \\ &\text{des entiers algébriques divisibles par } q. \end{aligned} \quad (*)$$

**Descente** Revenons aux hypothèses du théorème. Pour  $n$  convenable, on peut supposer que  $\rho$ ,  $Y$  et  $f$  sont définis sur  $\mathbb{F}_{q^n}$ . Le morphisme de Frobenius relatif à  $\mathbb{F}_{q^n}$  étant la puissance  $n$ -ième de celui relatif à  $\mathbb{F}_q$ , l'énoncé (\*) pour le schéma sur  $\mathbb{F}_{q^n}$  déduit de  $X_0$  par extension des scalaires nous fournit :

$$\begin{aligned} &\text{les puissances } n\text{-ièmes des valeurs propres de } F^* \text{ agissant sur} \\ &H_c^i(X, \mathbb{Q}_\ell) \text{ sont des entiers algébriques divisibles par } q^n. \end{aligned} \quad (**)$$

Cette assertion implique (\*). Le nombre de points rationnels de  $X_0$ , soit  $\text{Tr}(F^*, H^*(X, \mathbb{Q}_\ell))$ , est donc entier algébrique divisible par  $q$ . Ceci implique qu'il soit divisible par  $q$  en tant qu'entier rationnel.

### 1.14

La formule 1.9.3 contrôle la dépendance en  $n$  de la somme trigonométrique au membre de gauche. Elle implique des identités entre une somme trigonométrique et celles qui s'en déduisent par "extension des scalaires." Le plus célèbre de ces identités est celle de Hasse-Davenport : soient  $\chi : \mathbb{F}_q^\times \rightarrow \mathbb{C}^\times$  et  $\psi : \mathbb{F}_q \rightarrow \mathbb{C}^\times$  des caractères,  $\psi$  non trivial, et définissons la somme de Gauss  $\tau(\chi, \psi)$  par

$$\tau(\chi, \psi) = - \sum_{x \in \mathbb{F}_q^\times} \psi(x) \chi^{-1}(x). \quad (1.14.1)$$

**Théorème 1.15** (Hasse-Davenport). *On a*

$$\tau(\chi \circ N_{\mathbb{F}_{q^n}/\mathbb{F}_q}, \psi \circ \text{Tr}_{\mathbb{F}_{q^n}/\mathbb{F}_q}) = \tau(\chi, \psi)^n. \quad (1.15.1)$$

Soient  $E \subset \mathbb{C}$  un corps de nombres contenant les valeurs de  $\chi$  et  $\psi$ , et  $E_\lambda$  le complété de  $E$  en une place de caractéristique  $\ell \neq p$ . L'identité (1.15.1) est une identité dans  $E$ . Il revient au même de la prouver dans  $\mathbb{C}$ , ou dans  $E_\lambda$ . Nous la prouverons dans  $E_\lambda$ , en regardant  $\chi$  et  $\psi$  comme à valeurs dans  $E_\lambda^\times$ .

On applique 1.9.3 pour  $X_0 = \mathbb{G}_m$  sur  $\mathbb{F}_q$  et  $G_0 = \mathbb{G}_m \times \mathbb{G}_a$ . Les  $H_c^i(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\chi^{-1}\psi))$  sont nuls pour  $i \neq 1$ , et le  $H_c^1$  est de dimension 1 (4.2). D'après 1.9.3,  $\tau(\chi \circ N_{\mathbb{F}_{q^n}/\mathbb{F}_q}, \psi \circ \text{Tr}_{\mathbb{F}_{q^n}/\mathbb{F}_q})$  est l'unique valeur propre de  $(F^*)^n$  sur  $H_c^1$ , et (1.15.1) en résulte.

Des exemples analogues sont donnés dans Weil [Wei74a, App V].

### 1.16

Un  $E_\lambda$ -faisceau  $\mathcal{F}_0$  sur  $X - 0$  est dit *ponctuellement de poids  $n$*  si pour tout point fermé  $x \in |X_0|$ , les valeurs propres de  $F_x^*$  (Rapport 1.2) sont des nombres algébriques dont tous les conjugués complexes sont de valeur absolue  $q_x^{n/2}$ , où  $q_x$  est le nombre d'éléments de  $k(x)$ . Le théorème suivant sera démontré dans [Del80].

**Théorème 1.17.** *Si  $\mathcal{F}_0$  est ponctuellement de poids  $n$ , pour toute valeur propre  $\alpha$  de l'endomorphisme  $F^*$  de  $H_c^i(X, \mathcal{F})$ , il existe un entier  $m \leq n + i$  tel que les conjugués complexes de  $\alpha$  soient tous de valeur absolue  $q^{m/2}$ .*

Les faisceaux considérés en 1.9 sont de poids 0. Le théorème fournit donc pour la somme 1.9.1 (on plutôt, pour tous ses conjugués complexes) la majoration

$$\left| \sum_{s \in S_0(\mathbb{F}_q)} \prod_i \chi_i(f^i(s)) \right| \leq \sum_i \dim H_c^i \left( S, \mathcal{F} \left( \prod_i \chi_i f^i \right) \right) \cdot q^{i/2}. \quad (1.17.1)$$

### 1.18 Remarques

a) Si  $\dim S = n$ , pour tout  $E_\lambda$ -faisceau  $\mathcal{F}$  sur  $S$ , on a

$$H_c^i(S, \mathcal{F}) = 0 \quad \text{pour } i \notin [0, 2n].$$

b) Le groupe  $H_c^0(X, \mathcal{F})$  est le groupe des sections globales de  $\mathcal{F}$  sur  $S$  dont le support est propre. Si  $S$  est connexe, non complet et  $\mathcal{F}$  lisse, on bien si  $S$  est connexe,  $\mathcal{F}$  lisse de rang un, et non constant, ce groupe est nul.

c) Si  $S$  est lisse purement de dimension  $n$ , et  $\mathcal{F}$  lisse, la dualité de Poincaré dit que les espaces vectoriels  $H_c^i(X, \mathcal{F})$  et  $H^{2n-i}(X, \mathcal{F}^\vee)(2n)$  sont duaux l'un de l'autre (pour l'effet d'un twist à la Tate sur les valeurs propres de Frobenius, cf. la 2ème partie de la preuve de 1.13).

d) Si  $\dim S = n$ , la dualité de Poincaré permet de calculer comme suite  $H_c^{2n}(S, \mathcal{F})$  : on prend un ouvert  $U$  de  $S_{\text{red}}$ , dont le complémentaire est de dimension  $< n$ , lisse purement de dimension  $n$ , et sur lequel  $\mathcal{F}$  est lisse. On a alors  $H_c^{2n}(U, \mathcal{F}) \xrightarrow{\sim} H_c^{2n}(S, \mathcal{F})$ , car dans la suite exacte longue de cohomologie,  $H_c^i(S \setminus U, \mathcal{F}) = 0$  pour  $i = 2n, 2n - 1$ . Par Poincaré, on a donc

$$H_c^{2n}(S, \mathcal{F}) \xrightarrow{\sim} (H^0(U, \mathcal{F}^\vee)(2n))^\vee.$$

Supposons  $U$  connexe, et soit  $u$  un point géométrique de  $U$ . Le “système local”  $\mathcal{F}$  correspond à une représentation de  $\pi_1(U, u)$  sur  $\mathcal{F}_u$ , et  $H^0(U, \mathcal{F}^\vee)$  est  $(\mathcal{F}_u^\vee)^{\pi_1(U, u)} = ((\mathcal{F}_u)_{\pi_1(U, u)})^\vee$  (dual des coinvariants). On a donc

$$H_c^{2n}(S, \mathcal{F}) \simeq (\mathcal{F}_u)_{\pi_1(U, u)}(-2n).$$

e) Ces remarques permettent souvent le calcul de  $b_0$  et  $b_{2n}$ . Calculer les autres  $b_i$  peut être difficile. Si  $b_{2n} = 0$  et que  $b_{2n-1} = 0$ , la majoration (1.17.1) est une majoration à la Lang-Weil, avec, pour  $q$  grand, un gain en  $\sqrt{q}$  par rapport à la majoration triviale en  $O(q^n)$ . On prendra toutefois garde que la majoration (1.17.1) n'implique pas formellement la majoration triviale

$$\left| \sum_{s \in S_0(\mathbb{F}_q)} \prod_i \chi_i(f^i(s)) \right| \leq |S_0(\mathbb{F}_q)|,$$

donc il peut être utile de tenir compte (cf. la preuve de 3.8).

J'explique ci-dessous une méthode pour prouver que  $b_i = 0$  pour  $i \neq n$ . Quand elle s'applique, elle fournit une estimation en  $O(q^{n/2})$ . La constante implicite dans 0 est  $b_n = (-1)^n \chi(S, \mathcal{F}(\prod \chi_i f^i))$  en peut être difficile à calculer.

**Proposition 1.19.** *Soient  $\bar{X}$  un schéma propre sur un corps algébriquement clos  $k$ ,  $j : X \hookrightarrow \text{bar } X$  un ouvert de  $X$  et  $\mathcal{F}$  un  $E_\lambda$ -faisceaux sur  $X$ . On suppose que*

a)  $(j_* \mathcal{F})_x = 0$  pour  $x \in \bar{X} \setminus X$ , i.e.  $j_! \mathcal{F} \xrightarrow{\sim} j_* \mathcal{F}$  ;

b)  $R^i j_* \mathcal{F} = 0$  pour  $i > 0$ .

Alors, les applications

$$H_c^i(X, \mathcal{F}) \rightarrow H^i(X, \mathcal{F})$$

sont des isomorphismes.

Les hypothèses a) b) signifient que  $j_! \mathcal{F} \xrightarrow{\sim} Rj_* \mathcal{F}$ , d'où

$$H_c^i(X, \mathcal{F}) = H^i(\bar{X}, j_! \mathcal{F}) \xrightarrow{\sim} H^i(\bar{X}, Rj_* \mathcal{F}) = H^i(X, \mathcal{F}).$$

Autrement dit, la suite spectrale de Leray pour  $j$

$$E_2^{pq} = H^p(\bar{X}, R^q j_* \mathcal{F}) \Rightarrow H^{p+q}(X, \mathcal{F})$$

dégénère, par b) en des isomorphismes

$$H^i(\bar{X}, j_* \mathcal{F}) \xrightarrow{\sim} H^i(X, \mathcal{F}),$$

tandis que, par a)

$$H_c^i(X, \mathcal{F}) = H^i(\bar{X}, j_! \mathcal{F}) \xrightarrow{\sim} H^i(\bar{X}, j_* \mathcal{F}).$$

### 1.19.1 Exemple

Si  $X$  est une courbe, ou si  $\bar{X}$  est lisse,  $X$  le complément d'un diviseur à croisements normaux et  $\mathcal{F}$  modérément ramifié, l'hypothèse a) de 1.19 (pas d'invariants sous la monodromie locale) implique l'hypothèse b).

**Proposition 1.20.** *Soient  $X_0$  un schéma affine lisse purement de dimension  $n$  sur  $\mathbb{F}_q$  et  $\mathcal{F}_0$  un  $E_\lambda$ -faisceau lisse ponctuellement de poids  $m$  sur  $X_0$ . On suppose que les applications  $H_c^i(X, \mathcal{F}) \rightarrow H^i(X, \mathcal{F})$  sont des isomorphismes (cf. 1.17). Alors,  $H_c^i(X, \mathcal{F}) = 0$  pour  $i \neq n$ , et les conjugués complexes des valeurs propres de  $F^*$  sur  $H_c^n(X, \mathcal{F})$  sont de valeur absolue  $q^{(m+n)/2}$ .*

La dualité de Poincaré met en dualité  $H_c^i(X, \mathcal{F})$  (resp.  $H_c^i(X, \mathcal{F}^\vee)$ ) avec  $H^{2n-i}(X, \mathcal{F}^\vee(n))$  (resp.  $H^{2n-i}(X, \mathcal{F}(n))$ ). D'après [AGV72, XIV 3.2], les  $H^i$  sans support sont nuls pour  $i > n$ . Par dualité, les  $H_c^i$  sont nuls pour  $i < n$ ; puisque  $H_c^i(X, \mathcal{F}) \xrightarrow{\sim} H^i(X, \mathcal{F})$ , ces groupes sont nuls pour  $i \neq n$ . Appliquons 1.15 à  $\mathcal{F}_0$  et à  $\mathcal{F}_0^\vee(n)$  (de poids  $-m - 2n$ ). On trouve que les conjugués complexes  $\alpha$  des valeurs propres de  $F^*$  sur  $H_c^n(X, \mathcal{F}) = H_c^n(X, \mathcal{F}^\vee(n))^\vee$  vérifient

$$|\alpha| \leq q^{(m+n)/2} \quad \text{et} \quad |\alpha^{-1}| \leq q^{((-m-2n)+n)/2} = q^{-(m+n)/2},$$

d'où l'assertion.

### 1.21 Remarque

Le dernier argument montre que si  $X_0$  est un schéma séparé lisse sur  $\mathbb{F}_q$ , que  $\mathcal{F}_0$  est un  $E_\lambda$ -faisceau lisse ponctuellement de poids  $m$  sur  $X_0$  et que  $H_c^i(X, \mathcal{F}) \hookrightarrow H^i(X, \mathcal{F})$ , alors les conjugués complexes des valeurs propres de  $F^*$  sur  $H_c^i(X, \mathcal{F})$  sont de valeur absolue  $q^{(m+i)/2}$ .

## Appendice. L'isogénie de Lang dans le cas non commutatif

### 1.22

Soient  $G - 0$  un groupe algébrique connexe sur  $\mathbb{F}_q$  et  $\mathfrak{L}$  le morphisme  $x \mapsto Fx \cdot x^{-1}$  de  $G - 0$  dans lui-même. C'est un orphisme de  $G_0$ -espaces homogènes, si à la source on fait agir  $G - 0$  par translation à gauche  $x \mapsto (y \mapsto xy)$ , au but par  $x \mapsto (y \mapsto Fx \cdot y \cdot x^{-1})$ . On a  $\mathfrak{L}(xy) = \mathfrak{L}(x)$  pour  $y \in G_0(\mathbb{F}_q)$ , et  $\mathfrak{L}$  induit un isomorphisme  $G_0/G_0(\mathbb{F}_q) \xrightarrow{\sim} G_0$ .

Comme dans le cas commutatif,  $\mathfrak{L}$  fait donc de  $G_0$  un  $G_0(\mathbb{F}_q)$ -torseur sur  $G_0$ , le *torseur de Lang*  $L$ . Si  $\rho : G_0(\mathbb{F}_q) \rightarrow \mathrm{GL}(n, E_\lambda)$  est une représentation linéaire de  $G_0(\mathbb{F}_q)$ , nous noterons  $\mathcal{F}(\rho)$  le  $E_\lambda$ -faisceau  $\rho(L)$  (1.2).

### 1.23

Soit  $\gamma \in G^F = G_0(\mathbb{F}_q)$ , et calculons l'endomorphisme  $F^*$  de  $\mathcal{F}(\rho)_\gamma$ . Soit  $g \in G$  tel que  $\mathfrak{L}(g) = \gamma$ , d'où un repère  $\rho(g) \in \mathrm{Isom}(E_\lambda^n, \mathcal{F}(\rho)_\gamma)$ . Pour  $e \in E_\lambda^n$ , on a

$$F(\rho(g)(e)) = \rho(Fg)(e) = \rho(\gamma g)(e) = \rho(g \cdot g^{-1}\gamma g)(e).$$

On verra que  $g^{-1}\gamma g \in G_0(\mathbb{F}_q)$ , d'où

$$F(\rho(g)(e)) = \rho(g)\rho(g^{-1}\gamma g)(e)$$

et

$$\rho(g)^{-1}(F^*)^{-1}\rho(g) = \rho(g^{-1}\gamma g) : \quad (1.23.1)$$

$\rho(g)$  identifie l'inverse de  $F^*$  en  $\gamma$  à l'automorphisme  $\rho(g^{-1}\gamma g)$  de  $E_\lambda^n$ . Reste à comprendre ce qu'est  $g^{-1}\gamma g$ .

**Lemme 1.24.** (i) *Si  $Fg \cdot g^{-1} \in G_0(\mathbb{F}_q)$ , on a  $g^{-1}(Fg \cdot g^{-1})g = g^{-1}Fg \in G_0(\mathbb{F}_q)$ .*

- (ii) Soient  $\gamma \in G_0(\mathbb{F}_q)$ , et  $g$  tel que  $Fg \cdot g^{-1} = \gamma$ . La classe de conjugaison de  $\gamma' = g^{-1}Fg$  dans  $G_0(\mathbb{F}_q)$  ne dépend que de celle de  $\gamma$ .
- (iii) L'application induite par  $\gamma \mapsto \gamma'$ , de l'ensemble  $G_0(\mathbb{F}_q)^\natural$  des classes de conjugaison de  $G_0(\mathbb{F}_q)$  dans lui-même, est bijective. Son inverse est l'application pour le groupe opposé.
- (i) Si  $\gamma = Fg \cdot g^{-1} \in G_0(\mathbb{F}_q)$ , les identités  $Fg = \gamma g$  et  $F\gamma = \gamma$  donnent  $F(g^{-1}Fg) = (Fg)^{-1}FFg = g^{-1}\gamma^{-1}F(\gamma g) = g^{-1}\gamma^{-1}F\gamma Fg = g^{-1}Fg$ , de sorte que  $g^{-1}Fg \in G_0(\mathbb{F}_q)$ .
- (ii) Pour  $\alpha, \gamma \in G_0(\mathbb{F}_q)$ , les  $g$  tels que  $Fg \cdot g^{-1} = \gamma$  forment une classe à droite sous  $G_0(\mathbb{F}_q)$ , et si  $Fg \cdot g^{-1} = \gamma$ , on a  $F(\alpha g \alpha^{-1})(\alpha g \alpha^{-1})^{-1} = \alpha \gamma \alpha^{-1}$ . Pour  $\gamma$  parcourant une classe de conjugaison dans  $G_0(\mathbb{F}_q)$ , les  $g$  tels que  $Fg \cdot g^{-1} = \gamma$  parcourent donc une double classe sous  $G_0(\mathbb{F}_q)$ , et  $\gamma' = g^{-1}Fg$  parcourt une classe de conjugaison.
- (iii) Enfin, l'inverse de  $Fg \cdot g^{-1} \mapsto g^{-1}Fg$  est  $g^{-1}Fg \mapsto Fg \cdot g^{-1}$ .

## 1.25

La formule (1.23.1) peut se lire, brièvement :  $F^*$  en  $\gamma$  est  $\rho(\gamma')^{-1}$ . Si  $\gamma$  appartient à la composante neutre de son centralisateur, on peut prendre  $g$  dans  $Z(\gamma)$ . On a alors  $\gamma = \gamma'$ . Si cette condition n'est pas remplie,  $\gamma$  et  $\gamma'$  peuvent ne pas être conjugués.

## 1.26 Un exemple

Pour  $G_0 = \mathrm{SL}(2)$ ,  $q$  impair,  $\alpha \in F_q^\times \setminus \mathbb{F}_q^{\times 2}$  et  $\bar{\gamma}$  la classe de conjugaison de  $-1(1+N)$ , avec  $N^2 = 0$ ,  $\bar{\gamma}'$  est la classe de conjugaison de  $-1 \cdot (1 + \alpha N)$ , de sorte que  $\bar{\gamma}' \neq \bar{\gamma}$  si  $N \neq 0$ .

## 2 Dictionnaire

Une manipulation élémentaire sur les sommes trigonométriques peut souvent être vue comme le reflet, via la formule des traces, d'un énoncé cohomologique. Dans ce paragraphe, j'énumère de tels énoncés, et leur reflet ; il portent le même numéro, augmenté d'une  $*$  pour l'énoncé cohomologique.

### 2.1

“Une somme d'entiers algébriques est un entier algébrique” admet pour analogue cohomologique le théorème suivant, prouvé dans [DGK73, XXI 5.2.2] (cf. l'usage de 2.1\* en 1.13).

**Théorème (2.1\*).** Soient  $X_0$  un schéma séparé de type fini sur  $\mathbb{F}_q$  et  $\mathcal{F}_0$  un  $E_\lambda$ -faisceau sur  $X_0$ . Si, pour tout  $x \in |X_0|$ , les valeurs propres de  $F_x^*$  sur  $\mathcal{F}_0$  sont des entiers algébriques, alors les valeurs propres de  $F^*$  sur  $H_c^i(X, \mathcal{F})$  sont des entiers algébriques.

### 2.2

D'autres résultats d'intégralités sont prouvés dans [DGK73, XXI, 5.2.2 et 5.4] : si  $\dim(x_0) \leq n$ , et que  $\alpha$  est une valeur propre de  $F^*$  sur  $H_c^i(X, \mathcal{F})$ , on a :

- a) sous les hypothèses de 2.1\*, et si  $i > n$ , alors  $q^{i-n}$  divise  $\alpha$  ;
- b) si les inverses des valeurs propres de  $F_x^*$  sont des entiers algébriques, alors  $\alpha^{-1}$  est entier, sauf en  $p$ . Plus précisément,  $q^{\inf(n,i)}\alpha^{-1}$  est un entier algébrique.

Pour les faisceaux considérés en 1.9, les valeurs propres des  $F_x^*$  sont des racines de l'unité, de sorte que les hypothèses du théorème et celle de b) ci-dessus sont vérifiées.

### 2.3

Soient  $f : A \rightarrow B$  une application d'un ensemble fini dans un autre, et  $\varepsilon$  une fonction sur  $A$ . On a

$$\sum_{a \in A} \varepsilon(a) = \sum_{b \in B} \sum_{f(a)=b} \varepsilon(a). \quad (2.3.1)$$

**2.3\***

Soient  $f : X \rightarrow Y$  un morphisme de schémas séparés de type fini sur  $k$  algébriquement clos, et  $\mathcal{F}$  un  $E_\lambda$ -faisceau sur  $X$ . La suite spectrale de Leray de  $f$  en cohomologie à support propre s'écrit

$$E_2^{pq} = H_c^p(Y, R^q f_! \mathcal{F}) \Rightarrow H_c^{p+q}(X, \mathcal{F}). \quad (2.3.1^*)$$

Soient  $f_0 : X_0 \rightarrow Y_0$  un morphisme de schémas séparés de type fini sur  $\mathbb{F}_q$  et  $\mathcal{F}_0$  un  $E_\lambda$ -faisceau sur  $X_0$ . On a entre (2.3.1) et (2.3.1\*) la compatibilité suivante.

- a) Le faisceau  $R^q f_! \mathcal{F}$  se déduit par extension des scalaires de  $\mathbb{F}_q$  à  $\mathbb{F}$  du faisceau  $R^q f_{0!} \mathcal{F}_0$  sur  $Y_0$ . En tant que tel, il est muni d'une correspondance de Frobenius  $F^* : F^* R^q f_! \mathcal{F} \rightarrow R^q f_! \mathcal{F}$ . Elle se déduit par fonctorialité de  $Rf_!$  de la correspondance de Frobenius de  $\mathcal{F} : c$ 'est le composé

$$F^* R^q f_! \mathcal{F} \xrightarrow{\sim} R^q f_! F^* \mathcal{F} \xrightarrow{\sim} R^q f_! \mathcal{F}.$$

- b) La formule des traces pour  $\mathcal{F}_q$  s'écrit

$$\sum_{x \in X_0(\mathbb{F}_q)} \text{Tr}(F_x^*, \mathcal{F}_0) = \text{Tr}(F^*, H^\bullet(X, \mathcal{F})); \quad (1)$$

celle pour  $R^q f_! \mathcal{F}$  s'écrit

$$\sum_{y \in Y_0(\mathbb{F}_q)} \text{Tr}(F_y^*, R^q f_! \mathcal{F}) = \text{Tr}(F^*, H^\bullet(Y, R^q f_! \mathcal{F})). \quad (2_q)$$

On a, pour  $y \in Y(\mathbb{F})$ ,  $(R^q f_! \mathcal{F})_y = H_c^q(f^{-1}(y), \mathcal{F})$ , et si  $y \in Y_0(\mathbb{F}_q)$ ,

$$\text{Tr}(F_y^*, R^q f_! \mathcal{F}) = \text{Tr}(F^*, H_c^q(f^{-1}(y), \mathcal{F})),$$

d'où par la formule des traces sur la fibre

$$\sum_{\substack{x \in X_0(\mathbb{F}_q) \\ f(x)=y}} \text{Tr}(F_x^*, \mathcal{F}_0) = \sum (-1)^q \text{Tr}(F_y^*, R^q f_! \mathcal{F}).$$

Prenant la somme alternée des identités (2<sub>q</sub>), on trouve donc

$$\sum_{y \in Y_0(\mathbb{F}_q)} \sum_{\substack{x \in X_0(\mathbb{F}_q) \\ f(x)=y}} \text{Tr}(F_x^*, \mathcal{F}_0) = \text{Tr}(F^*, H^\bullet(Y, R^\bullet f_! \mathcal{F})). \quad (2)$$

L'égalité des membres de gauche de (1) et (2) résulte de (2.3.1), celle des membres de droite de (2.3.1\*) (compte tenu du fait que  $F^*$  est un endomorphisme de toute la suite spectrale).

**2.4**

Soient  $(A_i)_{i \in I}$  une famille finie d'ensembles finis,  $A = \prod_{i \in I} A_i$ ,  $\varepsilon_i$  une fonction sur  $A_i$ , et  $\varepsilon$  la fonction  $a \mapsto \prod \varepsilon_i(a_i)$  sur  $A$ . On a

$$\sum_{a \in A} \varepsilon(a) = \prod_{i \in I} \sum_{a_i \in A_i} \varepsilon_i(a_i). \quad (2.4.1)$$

**2.4\***

Soient  $(X_i)_{i \in I}$  une famille finie de schémas séparés de type fini sur  $k$  algébriquement clos,  $X = \prod_{i \in I} X_i$ ,  $\mathcal{F}_i$  un  $E_\lambda$ -faisceau sur  $X_i$  et  $\mathcal{F}$  le produit tensoriel externe  $\boxtimes_{i \in I} \mathcal{F}_i = \bigotimes_{i \in I} \text{pr}_i^*(\mathcal{F}_i)$  des  $\mathcal{F}_i$ . On a la formule de Künneth

$$H_c^\bullet(X, \mathcal{F}) = \bigotimes_{i \in I} H_c^\bullet(X_i, \mathcal{F}_i). \quad (2.4.1^*)$$

Si on veut un isomorphisme (2.4.1\*) canonique, et indépendant du choix d'un ordre total sur  $I$ , il faut prendre au membre droite le produit tensoriel gradué au sens de la règle de Koszul (Cycle, 1.3).



**2.5**

Soient  $A$  un ensemble fini,  $B$  une partie de  $A$  et  $\varepsilon$  une fonction sur  $A$ . On a

$$\sum_{a \in A} \varepsilon(a) = \sum_{a \in A \setminus B} \varepsilon(a) + \sum_{a \in B} \varepsilon(a). \quad (2.5.1)$$

**2.5\***

Soient  $x$  un schéma séparé de type fini sur  $k$  algébriquement clos,  $Y$  un sous-schéma fermé et  $\mathcal{F}$  un  $E_\lambda$ -faisceaux sur  $X$ . On a une suite exacte longue de cohomologie

$$\cdots \xrightarrow{\partial} H_c^i(X \setminus Y, \mathcal{F}) \longrightarrow H_c^i(X, \mathcal{F}) \longrightarrow H_c^i(Y, \mathcal{F}) \xrightarrow{\partial} \cdots \quad (2.5.1^*)$$

Plus généralement, si on part d'une filtration finie de  $X$  par des parties fermées  $X_p$  ( $p \in \mathbb{Z}$ ; on suppose que  $X_p \supset X_{p+1}$ , que  $X_p = X$  pour  $p$  assez petit, et que  $X_p = \emptyset$  pour  $p$  assez grand), on a une suite spectrale

$$E_1^{pq} = H_c^{p+1}(X_p \setminus X_{p+1}, \mathcal{F}) \Rightarrow H_c^{p+q}(X, \mathcal{F}). \quad (2.5.2^*)$$

**2.6**

Soient  $A$  un ensemble fini,  $(A_i)_{i \in I}$  un recouvrement fini de  $A$  et  $\varepsilon$  une fonction sur  $A$ . Pour  $J \subset I$ , soit  $A_J$  l'intersection des  $A_j$  ( $j \in J$ ). On a

$$\sum_{J \subset I} (-1)^{|J|} \sum_{a \in A_J} \varepsilon(a) = 0. \quad (2.6.1)$$

**2.6\***

Soient  $X$  un schéma séparé de type fini sur  $k$  algébriquement clos,  $(X_i)_{i \in I}$  un recouvrement fermé (resp. ouvert) fini de  $X$  par des sous-schémas, et  $\mathcal{F}$  un  $E_\lambda$ -faisceau sur  $X$ . Pour  $J \subset I$ , soit  $X_J$  l'intersection des  $X_j$  ( $j \in J$ ). On a des suites spectrales respectives (de Leray)

$$E_1^{pq} = \bigoplus_{|J|=p+1>0} H_c^q(X_J, \mathcal{F}) \otimes_{\mathbb{Z}} \bigwedge^{|J|} \mathbb{Z}^J \Rightarrow H_c^{p+q}(X, \mathcal{F}) \quad (2.6.1^*)$$

$$E_1^{pq} = \bigoplus_{|J|=1-p>0} H_c^q(X_J, \mathcal{F}) \otimes_{\mathbb{Z}} \bigwedge^{|J|} \mathbb{Z}^J \Rightarrow H_c^{p+q}(X, \mathcal{F}) \quad (2.6.2^*)$$

Si  $J = \emptyset$  n'était pas exclus, on aurait de même des suites spectrales convergeant vers 0. Les facteurs  $\bigwedge^{|J|} \mathbb{Z}^J$  sont là pour nous dispenser de choisir un ordre total sur  $I$ .

**2.7**

Soient  $A$  un groupe commutatif fini, et  $\chi : A \rightarrow E_\lambda^\times$  un caractère non trivial. On a

$$\sum_{a \in A} \chi(a) = 0. \quad (2.7.1)$$

On prouvera l'analogie cohomologique de (2.7.1) en transposant la preuve suivante : si  $x \in A$ ,  $a \mapsto xa$  est une permutation de  $A$ , et

$$\begin{aligned} \sum_{a \in A} \chi(a) &= \sum_{a \in A} \chi(xa) = \chi(x) \sum_{a \in A} \chi(a), & \text{, d'où} \\ (\chi(x) - 1) \sum_{a \in A} \chi(a) &= 0, \end{aligned}$$

et il existe par hypothèse  $x$  tel que  $\chi(x) - 1 \neq 0$ .

**Théorème (2.7\*).** Soient  $G_0$  un groupe algébrique commutatif connexe sur  $\mathbb{F}_q$  et  $\chi : G_0(\mathbb{F}_q) \rightarrow E_\lambda^\times$  un caractère non triviale. On a

$$H_c^\bullet(G, \mathcal{F}(\chi)) = 0. \quad (2.7.1^*)$$

Pour  $x$  un point rationnel de  $G$ , notons  $t_x$  la translation  $t_x(g) = xg$  de  $G$ . La formule  $\mathfrak{L}t_x = t_{\mathfrak{L}(x)}\mathfrak{L}$  exprime que  $(t_x, t_{\mathfrak{L}(x)})$  est un automorphisme du diagramme  $G \xrightarrow{\mathfrak{L}} G$  ( $G$  muni du torseur de Lang). Soit  $\rho(g)$  l'automorphisme de  $(G, \mathcal{F}(\chi))$  qui s'en déduit. Pour  $g \in G_0(\mathbb{F}_q)$ , i.e. pour  $\mathfrak{L}(g) = e$ , c'est l'identité sur  $G$ , et la multiplication par  $\chi(g)^{-1}$  sur  $\mathcal{F}(\chi)$ .

Notons  $\rho_H(g)$  l'automorphisme de  $H_c^\bullet(G, \mathcal{F}(\chi))$  déduit de  $\rho(g)$ . Un argument d'homotopie (Lemme 2.8 ci-dessous) montre que  $\rho_H(g) = \rho_H(e)$ , donc est l'identité. D'autre part, pour  $g \in G_0(\mathbb{F}_q)$ ,  $\rho_H(g)$  est la multiplication par  $(\chi^{-1}(g) : \text{sur } H_c^\bullet(G, \mathcal{F}(\chi)))$ , la multiplication par  $(\chi^{-1}(g) - 1)$  est nulle. Prenant  $g$  tel que  $\chi(g) \neq 1$ , on obtient 2.7.

**Lemme 2.8.** Soient  $X$  et  $Y$  deux schémas sur  $k$  algébriquement clos, avec  $X$  séparé de type fini et  $Y$  connexe. Soient  $\mathcal{F}$  un faisceau sur  $X$  et  $(\rho, \varepsilon)$  une famille d'endomorphismes de  $(X, \mathcal{F})$  paramétrée par  $Y$  :

$$\begin{aligned} \rho : Y \times_k X &\rightarrow Y \times_k X && \text{est un } Y\text{-morphisme, et} \\ \varepsilon : \rho^* \text{pr}_2^* \mathcal{F} &\rightarrow \text{pr}_2^* \mathcal{F} && \text{un morphisme de faisceaux.} \end{aligned}$$

On suppose que  $\rho$  est propre. Pour  $y \in Y(k)$ , soit  $\rho_H(y)^*$  l'endomorphisme de  $H_c^\bullet(X, \mathcal{F})$  induit par  $\rho_y : X \rightarrow X$  et  $\varepsilon_y : \rho_y^* \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{F}$ . Alors,  $\rho_H(y)^*$  est indépendant de  $y$ .

En effet,  $R^p \text{pr}_{1!} \text{pr}_2^* \mathcal{F}$  est le faisceau constant sur  $Y$  de valeur  $H^p(X, \mathcal{F})$ , et  $\rho_H(y)^*$  est la fibre en  $y$  de l'endomorphisme

$$R^p \text{pr}_{1!} \text{pr}_2^* \mathcal{F} \xrightarrow{\rho^*} R^p \text{pr}_{1!} \rho^* \text{pr}_2^* \mathcal{F} \xrightarrow{\varepsilon} R^p \text{pr}_{1!} \text{pr}_2^* \mathcal{F}$$

de ce faisceau.

## 2.9 Remarque

Soient  $G_0$  un groupe algébrique connexe sur  $\mathbb{F}_q$  et  $\rho : G_0(\mathbb{F}_q) \rightarrow \text{GL}(V)$  une représentation linéaire telle que  $V^{G_0(\mathbb{F}_q)} = 0$ . On a encore  $H_c^\bullet(G, \rho(L)) = 0$ .

## 3 Sommes à une variable

### 3.1

Weil est le premier à avoir appliqué des méthodes “cohomologiques” à l'étude des sommes trigonométriques à une variable; puisqu'il avait prouvé l'analogue de l'hypothèse de Riemann pour les fonctions  $L$  d'Artin sur les corps de fonctions, ces méthodes lui fournissaient d'excellentes estimations (en  $O(\text{racine carrée du nombre de termes})$ ), et le comportement de ces sommes par “extension du corps de base.”

L'essentiel de ce paragraphe est un exposé, dans un langage cohomologique, de ses résultats.

### 3.2

Les méthodes cohomologiques amènent ici à calculer des groupes  $H_c^i(X, \mathcal{F})$ , pour  $\mathcal{F}_0$  un  $E_\lambda$ -faisceau sur une courbe  $X - 0$  sur  $\mathbb{F}_q$ . Ces groupes sont nuls pour  $i \neq 0, 1, 2$  et pour  $i = 0, 2$ , ils ont une interprétation simple (1.8 a,b,c). De plus, la caractéristique d'Euler-Poincaré  $\chi_c(\mathcal{F}) = \sum (-1)^i \dim H_c^i(X, \mathcal{F})$  (par ailleurs égale à  $\chi(\mathcal{F}) = \sum (-1)^i \dim H^i(X, \mathcal{F})$ ) peut être calculée en terme de  $x$ , de rang de  $\mathcal{F}$  aux points génériques de  $X$ , et des propriétés de ramification de  $\mathcal{F}$ . Le résultat essentiel est le suivant.

Soient  $\bar{X}$  une courbe projective lisse et connexe, de genre  $g$ , sur un corps algébriquement clos  $k$ ,  $X$  un ouvert dense de  $\bar{X}$ , le complément d'un ensemble fini  $S$  de points et  $\mathcal{F}$  un  $E_\lambda$ -faisceau lisse sur  $X$ . Soient

$\chi(X) = 2 - 2g - \#S$  la caractéristique d'Euler-Poincaré de  $X$ , et  $\text{rg}(\mathcal{F})$  le rang de  $\mathcal{F}$ . Pour chaque point  $s \in S$ , on définit un entier  $\text{Sw}_s(\mathcal{F})$ , le conducteur de Swan, mesurant la ramification sauvage de  $\mathcal{F}$ , et

$$\chi_c(\mathcal{F}) = \text{rg}(\mathcal{F}) \cdot \chi(X) - \sum_{s \in S} \text{Sw}_s(\mathcal{F}) \quad (3.2.1)$$

[Ray65].

### 3.3

Soient  $\bar{X}$ ,  $j : X \hookrightarrow \bar{X}$  et  $\mathcal{F}$  comme en 3.2. Le théorème de dualité de Poincaré admet la forme très maniable :  $H^i(\bar{X}, j_* \mathcal{F})$  et  $H^{2-i}(\bar{X}, j_*(\mathcal{F}^\vee(1)))$  sont duaux l'un de l'autre (Dualité, 1.3).

### 3.4

Faisons  $k = \mathbb{F}$ , et supposons que  $X$ ,  $\bar{X}$ , et  $\mathcal{F}$  proviennent de  $X_0$ ,  $\bar{X}_0$  et  $\mathcal{F}_0$  sur  $\mathbb{F}_q$ . Si  $\mathcal{F}_0$  devient trivial sur un revêtement fini de  $X_0$ , Weil a prouvé que les conjugués complexes des valeurs propres de  $F^*$  sur  $H^i(\bar{X}, j_* \mathcal{F})$  sont de valeur absolue  $q^{i/2}$ . De tels faisceaux  $\mathcal{F}_0$  correspondent aux fonctions  $L$  d'Artin sur le corps de fonctions de  $\bar{X}_0$ .

### 3.5

Sous les mêmes hypothèses, ou plus généralement si  $E_\lambda$  est le complété en une place  $\lambda$  d'un corps de nombres  $E$  et que  $\mathcal{F}_0$  appartient à un système compatible infini de représentations  $v$ -adiques ( $v$  place de  $E$ ), on peut calculer

$$\prod_i \det(-F^*, H^i(X, \mathcal{F}))^{(-1)^i}$$

à partir d'informations *locales* sur  $\mathcal{F}_0$ . Ceci est expliqué dans [Del73]. Pour  $\mathcal{F}_0$  trivial sur un revêtement fini de  $X_0$ , c'est l'expression de la constante de l'équation fonctionnelle d'une fonction  $L$  d'Artin comme produit de constantes locales.

### 3.5 Exemple

Soit  $\psi$  le caractère  $\exp\left(\frac{2\pi i}{p} \text{Tr}_{\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p}\right)$  de  $\mathbb{F}_q$ ; on a  $\psi(a^p - a) = 0$ . Soient  $X_0$  une courbe projective lisse absolument irréductible de genre  $g$  sur  $\mathbb{F}_q$ , et  $f$  une fonction rationnelle sur  $X_0$ , i.e. un morphisme  $f : X_0 \rightarrow \mathbb{P}^1$ , non identiquement égale à  $\infty$ . On s'intéresse à la somme

$$S'_f = \sum_{\substack{x \in X_0(\mathbb{F}_q) \\ f(x) \neq \infty}} \psi(f(x)).$$

Cette somme est nulle pour  $f$  de la forme  $g^p - g$ . Ceci suggère de modifier la somme  $S'_f$  comme suite :

- a) pour tout point fermé  $x$  de  $X_0$ , on pose  $v_x(f)$  = ordre du pôle de  $f$  en  $x$  si  $f(x) = \infty$ ,  $v_x(f) = 0$  sinon, et  $v_x^*(f) = \inf v_x(f + g^p - g)$  (borne inférieure sur  $g$ ).
- b) Si  $v_x^*(f) = 0$ , que  $x \in X_0(\mathbb{F}_q)$ , et que  $f + g^p - g$  est régulier en  $x$ , on pose  $\psi(f(x)) = \psi((f + g^p - g)(x))$ . On pose enfin

$$S_f = \sum'_{x \in X_0(\mathbb{F}_q)} \psi(f(x)), \quad (3.5.1)$$

où  $(-)'$  indique que la somme est étendue aux  $x$  tels que  $v_x^*(f) = 0$ .

On a  $S_f = S_{f+g^p-g}$ . On se propose de vérifier que si  $f$  n'est pas la forme  $g^p - g + c^{te}$ , alors

$$|S_f| \leq \left( 2g - 2 + \sum_{v_x^*(f) \neq 0} [k(x) : \mathbb{F}_q](1 + v_x^*(f)) \right) q^{1/2}. \quad (3.5.2)$$

On commence par passer du complexe au  $\ell$ -adique, en remplaçant  $\psi$  par un caractère de la forme  $\psi_0 \circ \text{Tr}_{\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p}$ , avec  $\psi_0 : \mathbb{F}_p \hookrightarrow E_\lambda^\times$ . Pour  $j : U_0 \hookrightarrow X_0$  l'inclusion de l'ouvert où  $f \neq \infty$ , on prouve alors que

$$S_f = \sum (-1)^i \text{Tr}(F^*, H^i(X, j_* \mathcal{F}(\psi f))). \quad (3.5.3)$$

La formule des traces ramène cet énoncé aux suivants (pour  $x \in X_0(\mathbb{F}_q)$ ) :

- a) Si  $v_x^*(f) = 0$ , alors  $F_x^*$  sur  $j_* \mathcal{F}(\psi f)$  est  $\psi(f(x))$ ;
- b) Si  $v_x^*(f) \neq 0$ , alors  $j_* \mathcal{F}(\psi f)$  se ramifie en  $x : (j_* \mathcal{F}(\psi f))_{\bar{x}} = 0$ .

La formule a) résulte de (1.7.6) si  $v_x(f) = 0$ , et on se ramène à ce cas en remplaçant  $f$  par  $f + g^p - g$  : à isomorphisme près, ceci ne change pas  $\mathcal{F}(\psi f)_0$  sur l'ouvert où  $f$  et  $g$  sont réguliers (1.3).

La formule b) résulte de

$$\text{Sw}_x \mathcal{F}(f, \psi) = v_x^*(f). \quad (3.5.4)$$

Après réduction au cas où  $v_x(f) = v_x^*(f)$  (d'où  $p \nmid v_x(f)$ ) et extension des scalaires à  $\mathbb{F}$ , cette formule est dans [Ser61, 4.4].

Enfin, on vérifie que le faisceau  $\mathcal{F}(\psi f)$  sur  $U$  est non constant si  $f$  n'est pas de la forme  $g^p - g + c^{te}$  : puisque  $\psi_0$  est injectif, la trivialité de  $\mathcal{F}(\psi f) = \mathcal{F}(\psi_0 f)$  (1.8.ii) équivaut à celle du  $\mathbb{F}_q$ -torseur d'équation serait l'image réciproque d'un  $\mathbb{F}_q$ -torseur sur  $\text{Spec}(\mathbb{F}_q)$ , d'équation  $T^p - T - \lambda = 0$ , le  $\mathbb{F}_p$ -torseur d'équation  $T^p - T - (f - \lambda) = 0$  sur  $U_0$  serait trivial et  $f$  serait donc de la forme  $g^p - g + \lambda$ . Les  $H^i(\bar{X}, j_* \mathcal{F}(\psi f))$  sont donc nuls pour  $i \neq 1$ , la formule (3.5.3) se réduit à

$$S_f = -\text{Tr}(F^*, H^1(\bar{X}, j_* \mathcal{F}(\psi f))) \quad (3.5.5)$$

et, d'après (3.2.1) et (3.5.4), de  $H^1$  est de dimension  $2g - 2 + \sum_{v_x^*(f) > 0} [k(x) : \mathbb{F}_q](1 + v_x^*(f))$  et  $-S_f$  est somme de ce nombre de valeurs propres de  $F^*$ , chacune de valeurs absolues complexes  $q^{1/2}$ .

### 3.6

Supposons que, pour un automorphisme  $\sigma$  de  $X_0$ , on ait

$$f(\sigma x) = -f(x).$$

La somme  $S_f$  est alors réelle. Si  $\sigma$  est involutif, la dualité de Poincaré permet de dire un peu plus : si on pose  $\mathcal{F}_0 = j_* \mathcal{F}(\psi f)$ ,  $\mathcal{G}_0 = j_* \mathcal{F}(\psi(-f))$ , on a

- a)  $\mathcal{F}_0$  et  $\mathcal{G}_0$  sont en dualité,
- b)  $\sigma^* \mathcal{F}_0 \xrightarrow{\sim} \mathcal{G}_0$  et  $\sigma^* \mathcal{G}_0 \xrightarrow{\sim} \mathcal{F}_0$ , pour des isomorphismes naturels tel que le composé  $\mathcal{F}_0 = (\sigma^2)^* \mathcal{F}_0 \xrightarrow{\sim} \sigma^* \mathcal{G}_0 \xrightarrow{\sim} \mathcal{F}_0$  soit l'identité.
- c) L'accouplement  $\mathcal{F}_0 \otimes \mathcal{G}_0 \rightarrow E_\lambda$  vérifie  $\sigma^*(f \cdot g) = \sigma^*(f) \cdot \sigma^*(g)$ .

Passant à cohomologie, on trouve que  $H^1(X, \mathcal{F})$  et  $H^1(X, \mathcal{G})$  sont en dualité parfaite à valeur dans  $E_\lambda(1)$ , et que la forme bilinéaire  $\alpha \cdot \sigma^* \beta$  sur  $H^1(X, \mathcal{F})$  est *alternée* :  $\sigma^*$  agit trivialement sur  $E_\lambda(1)$ , et

$$\alpha \cdot \sigma^* \beta = \sigma^*(\alpha \cdot \sigma^* \beta) = \sigma^* \alpha \cdot \beta = -\beta \cdot \sigma^* \alpha.$$

On en conclut que  $H^1(X, \mathcal{F})$  est de dimension paire (on vérifie d'ailleurs facilement que chaque  $v_x^*(f)$  non nul est impair) et que les valeurs propres de  $F^*$  sur  $H^1(X, \mathcal{F})$  sont groupées en paires  $\alpha$  et  $q/\alpha$ .

### 3.7 Exemple

Ceci s'applique aux sommes de Kloosterman  $\sum_{x \in \mathbb{F}_q^\times} \psi(x + \frac{a}{x})$  (faire  $X_0 = \mathbb{P}^1$ ,  $f = x + \frac{a}{x}$ ,  $\sigma x = -x$  ; les pôles de  $f$  sont 0 et  $\infty$ , et en chacun d'eux  $v_x^*(f) = 1$  ; le  $H^1$  est de dimension  $-2 + 2 + 2 = 2$ ). On a donc (pour  $a \neq 0$ )

$$\sum_{\substack{xy=a \\ x, y \in \mathbb{F}_{q^n}}} \exp\left(\frac{2\pi i}{p} \text{Tr}_{\mathbb{F}_{q^n}/\mathbb{F}_p}(x+y)\right) = (-\alpha^n + \alpha^{-n}) \quad , \quad \alpha \bar{\alpha} = q.$$

Ce résultat est dû à L. Carlitz [Car70].

Voici maintenant une application d'une méthode de Lang-Weil.

**Proposition 3.8.** Soit  $P \in \mathbb{F}_q[X_1, \dots, X_n]$  un polynôme à  $n$  variable, de degré  $d$ , dont on suppose qu'il n'est pas de la forme  $Q^p - Q + C^{te}$ . Posant encore  $\psi(x) = \exp\left(\frac{2\pi i}{p} \text{Tr}_{\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p}(x)\right)$  on a

$$\left| \sum_{x_i \in \mathbb{F}_q} \psi P(x_1, \dots, x_n) \right| \leq (d+1)q^{n-\frac{1}{2}}.$$

On a pour le membre de gauche l'estimation triviale  $q^n$ . Il suffit donc de prouver 3.8 lorsque  $d-1 < q^{1/2}$ ; supposons seulement que  $d < q+1$ , et soit  $P_d$  la partie homogène de degré  $d$  de  $P$ . Rappelons le

**Lemme 3.9.** Une hypersurface de degré  $d$  dans  $\mathbb{P}^r$  ( $r \geq i$ ) ne peut passer par tout les points rationnels sur  $\mathbb{F}_q$  qui se  $d \geq q+1$ .

On procède par récurrence : s'il existe un hyperplan rationnel non entièrement contenu dans l'hypersurface (tel n'est pas le cas pour  $r=1$ ), on applique l'hypothèse de récurrence à la trace de l'hypersurface sur cet hyperplan. Sinon, le degré  $d$  est  $\geq$  le nombre d'hyperplans rationnel,  $\geq q+1$ .

Distinguons maintenant deux cas.

**Cas 1 :  $p \nmid d$ .** Appliquant le lemme à  $P_d$ , on voit que, quitte à faire un changement linéaire de variables, on peut supposer que  $P_d(1, 0, \dots, 0) \neq 0$ , i.e. que le coefficient de  $X_1^d$  dans  $P$  est non nul. Un polynôme à 1 variable

$$S(X) = \sum_{i=0}^d a_i X^i,$$

avec  $a_d \neq 0$  ( $p \nmid d$ ) n'est jamais de la forme  $Q^p - Q + C^{te}$ , et l'estimation (3.5.2) se réduit à

$$\left| \sum \psi(S(x)) \right| \leq (d-1)q^{1/2}.$$

Appliquant cette estimation aux sommes partielles obtenues en ne faisant varier que  $x_1$ , on trouve

$$\left| \sum \psi P(x_1, \dots, x_n) \right| = \left| \sum_{x_2, \dots, x_n} \sum_{x_1} \psi P(x_1, \dots, x_n) \right| \leq q^{n-1} (d-1) q^{1/2}$$

comme promis.

**Cas 2 :  $p \mid d$  ( $d > 0$ ).** Si  $P_d$  est une puissance  $p$ -ième, remplacer  $P$  par  $P - (P_d - P_d^{1/p})$  ne change pas la somme considérée, et abaisse le degré : on se débarrasse de ce cas en procédant par récurrence sur  $d$ . Sinon, la différentielle de  $P_d$  n'est pas identiquement nulle; appliquant 3.9, on peut supposer, quitte à faire un changement linéaire de variables, qu'elle n'est pas nulle au point  $(1, 0, \dots, 0)$ . Si on écrit

$$P_d = \sum_{i=0}^d X_1^{d-i} S_i(X_2, \dots, X_n),$$

cela signifie que la forme linéaire  $S_1$  n'est pas identiquement nulle.

La forme  $S_0$  est une constante, et remplaçant  $P$  par  $P - (S_0 X_1^d - S_0^{1/p} X_1^{d/p})$ , on peut supposer qu'elle est nulle. Soit enfin  $-\lambda$  le coefficient de  $X_1^{d-1}$  dans  $P$ . Pour  $x_2, \dots, x_n$  fixes, on a

$$P(X_1, x_2, \dots, x_n) = (S_1(x_2, \dots, x_n) - \lambda) X_1^{d-1} + \text{termes de plus bas degré en } X_1$$

et si  $S_1(x_2, \dots, x_n) \neq \lambda$ , on a donc

$$\left| \sum_{x_1} \psi P(x_1, \dots, x_n) \right| \leq (d-2)q^{1/2}.$$

Au total,

$$\begin{aligned}
\left| \sum \psi P(x_1, \dots, x_n) \right| &\leq \left| \sum_{S=\lambda} \psi P(x_1, \dots, x_n) \right| + \sum_{S(X_2, \dots, X_n) \neq \lambda} \left| \sum_{x_1} \psi P(x_1, \dots, x_n) \right| \\
&\leq q^{n-1} + (q^{n-1} - q^{n-2})(d-2)q^{1/2} \\
&< (d-2)q^{n-1/2} + q^{n-1} \\
&< (d-1)q^{n-1/2}.
\end{aligned}$$

Un autre résultat de cette nature est donné par R.A. Smith [Smi70].

## 4 Sommes de Gauss et sommes de Jacob

### 4.1

Soient  $k$  un corps fini de caractéristique  $p$ ,  $\chi$  un caractère de  $k^\times$ , et  $\psi$  un caractère non trivial du groupe additif de  $k$ . Nous prendrons pour définition des sommes de Gauss :

$$\tau(\chi, \psi) = - \sum_{x \in k^\times} \psi(x) \chi^{-1}(x) \quad (4.1.1)$$

(noter le signe). Classiquement,  $\chi$  et  $\psi$  sont à valeurs complexes. Nous les prendrons à valeurs dans  $E_\lambda^\times$  (cf. la preuve de 1.15). Regardons  $-\tau(\chi, \psi)$  comme une somme sur les points rationnels du schéma  $\mathbb{G}_m$  sur  $k$ . D'après le paragraphe 1, on a  $-\tau(\chi, \psi) = \text{Tr}(F^*, H_c^*(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\psi\chi^{-1})))$ . De plus

**Proposition 4.2.** *La cohomologie de  $\mathbb{G}_m$  à coefficient dans  $\mathcal{F}(\psi\chi^{-1})$  vérifie*

- (i)  $H_c^i = 0$  pour  $i \neq 1$ , et  $\dim H_c^1 = 1$ .
- (ii)  $F^*$ , agissant sur  $H_c^1$ , est la multiplication par  $\tau(\chi, \psi)$ .
- (iii) Si  $\chi$  est non trivial, on a  $H_c^\bullet \xrightarrow{\sim} H^\bullet$ .

*Preuve.* Pour tout  $n$  premier à  $p$ , notons  $K_n$  le  $\mu_n$ -torseur sur  $\mathbb{G}_m$  défini par la suite exacte de Kummer  $0 \rightarrow \mu_n \rightarrow \mathbb{G}_m \xrightarrow{x^n} \mathbb{G}_m \rightarrow 0$ . Si  $k$  a  $q$  éléments, on a sur  $k$  :  $\mu_{q-1} = k^\times$ , et le torseur de Lang sur  $\mathbb{G}_m/k$  est  $K_{q-1}$ . Dès lors,  $\mathcal{F}(\chi^{-1}) = \chi(K_{q-1})$ . L'assertion 4.2(ii) résulte de (i,iii), eux-mêmes contenus dans l'énoncé géométrique suivant, où  $\mathcal{F}(\psi)$  désigne le faisceau sur  $\mathbb{G}_m/\mathbb{F}$  déduit par extension des scalaires de  $k$  à  $\mathbb{F}$  de  $\mathcal{F}(\psi)$  sur  $\mathbb{G}_m/k$  (1.8.b).  $\square$

**Proposition 4.3.** *Soit  $\chi : \mu_n \rightarrow E_\lambda^\times$ . La cohomologie de  $\mathbb{G}_m$  à coefficient dans  $\mathcal{F}(\psi) \otimes \chi(K_n)$  vérifie*

- (i)  $H_c^i = 0$  pour  $i \neq 1$ , et  $\dim H_c^1 = 1$ .
- (ii) Si  $\chi$  est non triviale, on a  $H_c^\bullet \xrightarrow{\sim} H^\bullet$ .

*Preuve.* Le faisceau  $\mathcal{F}(\psi)$  est la restriction à  $\mathbb{G}_m$  d'un faisceau localement constant sur  $\mathbb{G}_a$ , sauvagement ramifié à l'infini, de conducteur de Swan 1. Le faisceau  $\chi(K_n)$  est constant si  $\chi = 1$  ; si  $\chi \neq 1$ , il est ramifié en 0 et  $\infty$ , modérément.

Le faisceau  $\mathcal{F}(\psi) \otimes \chi(K_n)$  est donc ramifié à l'infini ; appliquant 1.18(b,c), on trouve que  $H_c^i(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\psi) \otimes \chi(K_n)) = 0$  pour  $i \neq 1$ . Si  $\chi \neq 1$ , il est ramifié en 0 et  $\infty$  et (ii) résulte de 1.19.a.

Les conducteurs de Swan sont 0 en 0 et 1 en  $\infty$ . D'après (3.2.1), la caractéristique d'Euler-Poincaré est donc  $-1$  et ceci achève la démonstration.  $\square$

### 4.4 Remarque

Si  $\chi$  est non trivial, 4.2(iii) et la dualité de Poincaré montrent que  $H_c^1(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\psi\chi^{-1}))$  et  $H_c^1(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\psi^{-1}\chi))$  sont en dualité (dualité à valeurs dans  $E_\lambda(-1)$ ). On a donc  $\tau(\chi, \psi) \cdot \tau(\chi^{-1}, \psi^{-1}) = q$ , i.e.  $|\tau(\chi, \psi)| = 1$ .

## 4.5

Si  $k$  est une extension de degré  $N$  de  $\mathbb{F}_q$ , on peut aussi regarder (4.1.1) comme une somme à  $N$  variables sur  $\mathbb{F}_q$ . Soit plus généralement  $k$  une algèbre étale sur  $\mathbb{F}_q$ , de degré  $N$  sur  $\mathbb{F}_q$ . C'est un produit de corps  $k_i$ , de degré  $N_i$ , et on pose

$$\varepsilon(k) = (-1)^{\sum (N_i+1)}. \quad (4.5.1)$$

C'est la signature de la permutation de  $S = \text{hom}_{\mathbb{F}_q}(k, \mathbb{F})$  induite par la substitution de Frobenius  $\varphi \in \text{Gal}(\mathbb{F}/\mathbb{F}_q)$ .

Soient  $\psi : \mathbb{F}_q \rightarrow E_\lambda^\times$  un caractère non trivial, et  $\chi : k^\times \rightarrow E_\lambda^\times$ . On pose

$$\tau_{\mathbb{F}_q}(\chi, \psi) = (-1)^N \sum_{x \in k^\times} \psi \text{Tr}_{k/\mathbb{F}_q}(x) \cdot \chi^{-1}(x). \quad (4.5.2)$$

Si  $\chi$  a pour coordonnées les  $\chi_i : k_i^\times \rightarrow E_\lambda^\times$ , on a l'identité triviale

$$\tau_{\mathbb{F}_q}(\chi, \psi) = \varepsilon(k) \prod \tau(\chi_i, \psi \circ \text{Tr}_{k_i/\mathbb{F}_q}). \quad (4.5.3)$$

Après quelques préliminaires, nous donnerons en 4.10 une interprétation cohomologique des sommes (4.5.2). En 4.12, nous interpréterons l'identité de Hasse-Davenport comme une forme tordue (cf. 1.12) du cas particulier suivant de (4.5.3) : pour  $k = \mathbb{F}_q^N$ , et  $\chi$  un caractère de  $\mathbb{F}_q^\times$ , on a  $\tau_{\mathbb{F}_q}(\chi \circ N_{k/\mathbb{F}_q}, \psi) = \tau(\chi, \psi)^N$ .

## 4.6

Rappelons que pour  $M$  un module projectif de type fini sur un anneau  $A$ , le foncteur  $\text{Spec}(B) \mapsto M \otimes_A B$ , des schémas affines sur  $\text{Spec}(A)$  dans **Ens** est représenté par le schéma affine  $\mathbb{V}(M^\vee)$  (notations des EGA), le spectre de  $\text{Sym}_A^\bullet(M^\vee)$ . Si  $M = A^n$ , c'est l'espace affine type de dimension  $n$ .

Supposons que  $M$  soit une  $A$ -algèbre à unité, et posons  $V = \mathbb{V}(M^\vee)$ . Par définition, pour toute extension  $B$  de  $A$ , l'ensemble  $V(B)$  de points de  $V$  à coordonnées dans  $B$  est  $M \otimes_A B$ . Le foncteur  $B \mapsto M \otimes_A B$  étant à valeurs dans les anneaux à unité,  $V$  est un schéma en anneaux à unités sur  $\text{Spec}(A)$ . Les morphismes norme et trace :  $M \otimes_A B \rightarrow B$  sont fonctoriels en  $B$ ; ils correspondent donc à des morphismes de schéma  $N$  et  $T$  de  $V$  dans  $\mathbb{G}_a$ . Nous aurons à considérer les schémas déduits de  $V$  suivant :

- a)  $V^*$  est l'ouvert des éléments inversibles de  $V$  (un schéma en groupes pour  $\cdot$ );
- b)  $W$  est l'hyperplan d'équation  $T = 0$  et  $W^* = W \cap V^*$ ;
- c)  $P$  est l'hyperplan à l'infini  $V \setminus \{0\}/\mathbb{G}_m$  de l'espace affine  $V$  sur  $\text{Spec}(A)$ . Si  $Q$  est l'hyperplan à l'infini de  $W$ ,  $W^*/\mathbb{G}_m$  et  $V^*/\mathbb{G}_m$  sont des ouverts des espaces projectifs  $Q$  et  $P$  sur  $\text{Spec}(A)$ .

$$\begin{array}{ccc} W^* \hookrightarrow V^* & \subset & W \setminus \{0\} \hookrightarrow V \setminus \{0\} \\ \downarrow \pi & & \downarrow \pi \\ W^*/\mathbb{G}_m \hookrightarrow V^*/\mathbb{G}_m & & Q \hookrightarrow P. \end{array} \quad (4.6.1)$$

Si  $M = A^I$ ,  $I$  un ensemble fini, alors  $V \simeq \mathbb{G}_a^I$ ,  $V^* = \mathbb{G}_m^I$ ,  $V^*/\mathbb{G}_m$  est le tore  $\mathbb{G}_m^I/(\mathbb{G}_m \text{ diagonal})$ ,  $N$  et  $T$  s'écrivant  $\prod x_i$  et  $\sum x_i$ , et  $Q$  est donc l'hyperplan projectif d'équation  $\sum x_i = 0$  de  $P$ .

Le cas qui nous intéresse est celui où  $M$  est fini étale sur  $A$ . La description précédente vaut alors localement sur  $\text{Spec}(A)$  (pour la topologie étale) et on peut écrire  $V^* = \mathbb{G}_m^I$ , pour  $I$  un faisceau localement constant d'ensembles finis sur  $\text{Spec}(A)$ . Si par exemple  $A$  est un corps, de clôture algébrique  $\bar{A}$ , et que  $M$  est un  $A$ -algèbre séparable, on pose  $I = \text{hom}_A(M, \bar{A})$ , et, sur  $\bar{A}$ , on a  $V \sim \mathbb{G}_a^I$ . Via cet isomorphisme,  $N$  et  $T$  s'écrivent  $\prod x_i$  et  $\sum x_i$ .

## 4.7 Torseur de Kummer

Soient  $S$  un schéma,  $n$  un entier inversible sur  $S$  et  $G$  un schéma en groupes commutatifs à fibres connexes (noté multiplicativement) sur  $S$ . La suite

$$0 \longrightarrow G_n \longrightarrow G \xrightarrow{x^n} G \longrightarrow 0$$

est exacte. Elle définit un  $G_n$ -torseur  $K_n(G)$  (ou simplement  $K_n$ ) sur  $G$ . Pour  $\chi : G_n \rightarrow E_\lambda^\times$  un homomorphisme du  $S$ -faisceau étale  $G_n$  dans le faisceau constant  $E_\lambda^\times$ , on note  $\mathcal{K}_n(\chi)$  le  $E_\lambda$ -faisceau  $\chi^{-1}(K_n)$ .

Les toreseurs  $K_n$  forment un système projectif de toreseurs sous le système projectif de groupes  $G_n$  (morphisme de transition  $x \mapsto x^d : G_{nd} \rightarrow G_n$ ). Ceci exprime la commutativité des diagrammes

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & G_{nd} & \longrightarrow & G & \xrightarrow{x^{nd}} & G \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow x^d & & \downarrow x^d & & \parallel \\ 0 & \longrightarrow & G_n & \longrightarrow & G & \xrightarrow{x^n} & G \longrightarrow 0. \end{array}$$

On a donc  $\mathcal{K}_n(\chi) = \mathcal{K}_{nd}(\chi \circ x^d)$ .

#### 4.8

Appliquons la construction 4.6 pour  $A = \mathbb{F}_q$ , et  $M = k$  un algèbre étale sur  $\mathbb{F}_q$ . Conformément aux conventions générales, on notera avec un indice 0 les  $\mathbb{F}_q$ -schémas notés  $V, V^*, \dots$  en 4.6. Les mêmes lettres sans indice désignent les schémas sur  $\mathbb{F}$  qui s'en déduisent par extension des scalaires.

On pose  $I = \text{hom}(k, \mathbb{F})$ , d'où  $V \sim \mathbb{G}_a^I$  et  $T$  s'écrit  $(x_i) \mapsto \sum x_i$ .

$$\mathcal{F}(\psi \circ \text{Tr}_{k/\mathbb{F}_q}) = T^* \mathcal{F}(\psi) = \bigotimes_i \text{pr}_i^* \mathcal{F}(\psi). \quad (4.8.1)$$

Puisque  $V^* \sim \mathbb{G} + m^I$ , un caractère  $\chi$  de  $V_n^* \sim \mu_n^I$ , à valeurs dans  $E_\lambda^\times$ , s'écrit comme une famille  $(\chi_i)_{i \in I}$  de caractères de  $\mu_n$  indénée par  $I$ . Elle est définie sur  $\mathbb{F}_q$  si, pour tout  $\sigma \in \text{Gal}(\mathbb{F}/\mathbb{F}_q)$ , on a  $\chi_{\sigma i} = \chi_i \circ \sigma^{-1}$ . Elle définit alors un  $E_\lambda$ -faisceau  $\mathcal{K}_n((\chi_i)_{i \in I})$  sur  $V_0^*$ . Si le produit des  $\chi_i$  est trivial,  $\chi$  se factorise par un caractère de  $(V_0^*/\mathbb{G}_m)_n$  et  $\mathcal{K}_n((\chi_i)_{i \in I})$  est l'image réciproque d'un faisceau, noté de même, sur  $V - 0^*/\mathbb{G}_m$ . Cette construction se compare comme suit au toreur de Lang.

**Lemme 4.9.** (i) Pour  $n$  assez divisible, on a un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & (V_0^*)_n & \longrightarrow & V_0^* & \xrightarrow{x^n} & V_0^* \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow \tau & & \downarrow \tau & & \parallel \\ 0 & \longrightarrow & k^\times & \longrightarrow & V_0^* & \xrightarrow{\Sigma} & V_0^* \longrightarrow 0; \end{array}$$

si  $\chi$  est un caractère  $\chi : k^\times \rightarrow E_\lambda^\times$ , on a  $\mathcal{F}(\chi) = \mathcal{K}_n(\chi \circ \tau)$ .

(ii) Pour  $n$  assez divisible,  $\tau$  identifie  $k^\times$  aux coinvariants de  $\text{Gal}(\bar{\mathbb{F}}/F)$  agissant sur  $V_n^* \sim \mu_n^I$ .

(iii) Pour  $k$  un corps,  $N = [k : \mathbb{F}_q]$ ,  $\omega \in I$  un plongement de  $k$  dans  $\mathbb{F}$ , et  $n = q^N - 1$ , la composante d'indice  $\omega$  de  $\chi \circ \tau$  est  $\chi \circ \omega^{-1}$ .

(iv) Si  $\chi$  est non trivial sur chaque facteur de  $k$ , les  $(\chi \circ \tau)_i$  sont tous non triviaux.

Il suffit de prouver le lemme lorsque  $k$  est un corps, de degré  $N$  sur  $\mathbb{F}_q$ . Dans ce cas,  $n$  est "assez divisible" si  $q^N - 1 \mid n$ . Choisissons un plongement  $\omega$  de  $k$  dans  $\mathbb{F}_q$ ;  $I$  s'identifie alors à  $\mathbb{Z}/N$  : à  $i \in \mathbb{Z}/N$  correspond  $\omega_i = \omega^{q^i}$ . Via l'isomorphisme  $V_0^*(\mathbb{F}) = F^{\times I}$ , on a

- a)  $x \in k^\times$  correspond à  $(\omega_i(x)) \in \mathbb{F}^{\times I}$ ;
- b)  $F((x_i)_{i \in \mathbb{Z}/N}) = (x_{i-1}^{q^i})_{i \in \mathbb{Z}/N}$ .

Un caractère  $\chi = (\chi_i)$  de  $V_n^* \sim \mu_n^I$  sera défini sur  $\mathbb{F}_q$  si  $\chi_{-i} = \chi_0(x^{q^i})$  ( $i \in \mathbb{Z}$ ). Si  $q^N - 1 \mid n$ , il y a  $q^N - 1$  tels caractères :  $\chi_0$  se factorise par  $\mu_{q^N-1}$ , et détermine les  $\chi_i$ . Pour prouver (ii), il suffit donc de vérifier (i) et (iii) (ou son corollaire (iv)) qui assure que  $\chi \mapsto \chi \circ \tau$  est injectif.

Prouvons (i) et (iii), pour  $n = q^N - 1$ . Notons additivement le groupe des endomorphismes de  $V^* \sim \mathbb{G}_m^I$ ; en particulier, notons  $n$  l'opérateur  $x \mapsto x^n$ . Si  $\alpha$  est l'opérateur de permutations circulaire  $(x_i) \mapsto (x_{i-1})$ , on a  $q^N - 1 = (q\alpha)^N - 1 = (q\alpha - 1)((q\alpha)^{N-1} + \dots + 1)$ . Ceci détermine  $\tau$  : on a  $\tau((x_i)) = \prod_{0 \leq j < N} x_{i-j}^{q^j}$ , et l'application induite de  $(V_0^*)_n$  dans  $k^\times$  s'écrit [a) ci-dessus]  $(x_i) \mapsto \prod x_{-i}^{q^i}$ ; de là résulte (iii).



**Proposition 4.10.** *La cohomologie de  $V^*$  à coefficients dans  $\mathcal{F}(\chi^{-1} \cdot \psi \operatorname{Tr}_{k/\mathbb{F}_q})$  vérifie*

- (i)  $H_c^i = 0$  pour  $i \neq N$ , et  $\dim H_c^N = 1$ .
- (ii) Sur  $H_c^N$ ,  $F^*$  est la multiplication par  $\tau_{\mathbb{F}_q}(\chi, \psi)$ .
- (iii) Si  $\chi$  est non trivial sur chaque facteur de  $k$ , on a  $H_c^\bullet \xrightarrow{\sim} H^\bullet$ .

Appliquons 4.9(i) : sur  $\mathbb{F}$ , si  $\chi \circ \tau = (\chi_i)_{i \in I}$ , on a  $\mathcal{F}(\chi) = \mathcal{K}_n((\chi_i)_{i \in I})$ . Les points (i) et (iii) résultant donc de l'énoncé plus géométrique suivant (pour (iii), appliquer 4.9(iv)) et (ii) en résulte par la formule des traces :

**Proposition 4.11.** *Soit  $(\chi_i)_{i \in I}$  une famille de caractère de  $\mu_n(\mathbb{F})$ . La cohomologie de  $V^* \simeq \mathbb{G}_m^I$  à coefficient dans  $\mathcal{K}_n((\chi_i)_{i \in I}) \otimes \mathcal{F}(\psi \operatorname{Tr}_{k/\mathbb{F}_q})$  vérifie*

- (i)  $H_c^i = 0$  pour  $i \neq N$ , et  $\dim H_c^N = 1$ .
- (ii) Si les  $\chi_i$  sont tous non triviaux, on a  $H_c^\bullet \xrightarrow{\sim} H^\bullet$ .

On a  $V^* \sim \mathbb{G}_m^I$ ,  $\mathcal{K}((\chi_i)) = \bigotimes_i \operatorname{pr}_i^* \chi_i(K_n(\mathbb{G}_m))$  et  $\mathcal{F}(\psi \circ \operatorname{Tr}_{\mathbb{F}_q/k}) = T^* \mathcal{F}(\psi) = \bigotimes_i \operatorname{pr}_i^* \mathcal{F}(\psi)$ . Ceci permet d'appliquer la formule de Künneth, et 4.11 résulte de 4.3.

## 4.12

De 2.4\* et (Cycle, 1.3 exemple 2), on tire aussi que le groupe des permutations  $\sigma$  de  $I$  telles que  $\chi_i = \chi_{\sigma i}$  ( $i \in I$ ) agit sur  $H_c^N$  par multiplication par la signature  $\varepsilon(\sigma)$ . Nous allons en déduire une seconde preuve de l'identité de Hasse-Davenport.

Si  $\chi$  est un caractère de  $\mathbb{F}_q^\times$ , le fait que, sur  $\mathbb{F}$ ,  $N$  s'écrit  $(x_i) \mapsto \prod x_i$  fournit :  $\mathcal{F}(\chi \circ N) = N^* \mathcal{F}(\chi) = \bigotimes_i \operatorname{pr}_i^* \mathcal{F}(\psi)$  et la formule de Künneth fournit :

$$H_c^\bullet(V^*, \mathcal{F}(\chi^{-1} \circ N, \psi \circ \operatorname{Tr})) \sim H_c^\bullet(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\chi^{-1} \psi))^{\otimes I},$$

où, au membre de droite, le produit tensoriel est pris au sens 2.4\*. Puisque  $H_c^1(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\psi \chi^{-1}))$  est de dimension 1, sa puissance tensorielle  $\bigotimes I$ , au sens ordinaire, ne dépend que du cardinal  $n$  de  $I$ . Appliquant (Cycle, 1.3 exemple 2), on obtient un isomorphisme canonique

$$H_c^N(V, \mathcal{F}(\chi^{-1} \circ N) \otimes T^* \mathcal{F}(\psi)) \sim H_c^1(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\psi \chi^{-1})) \otimes_{\mathbb{Z}} \bigwedge^N \mathbb{Z}^I. \quad (4.12.1)$$

Pour calculer l'action de  $F^*$ , le plus commode est d'adopter le point de vue galoisien et de dire que l'isomorphisme (4.12.1) étant canonique, il est compatible à l'action par transport de structure de  $\operatorname{Gal}(\mathbb{F}/\mathbb{F}_q)$ . Si  $\varepsilon(k)$  est la signature de la permutation  $\varphi$  de  $I$ , on trouve que

$$\begin{aligned} \tau_{\mathbb{F}_q}(\chi \circ N_{k/\mathbb{F}_q}, \psi) &= \operatorname{Tr} \left( \varphi^{-1}, H_c^N(V^*, N^* \mathcal{F}(\chi^{-1}) \otimes T^* \mathcal{F}(\psi)) \right) \\ &= \varepsilon(k) \operatorname{Tr} \left( \varphi^{-1}, H_c^1(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\chi^{-1} \psi)) \right)^N \\ &= \varepsilon(k) \tau(\chi, \psi)^N, \end{aligned}$$

soit

$$\tau_{\mathbb{F}_q}(\chi \circ N_{k/\mathbb{F}_q}, \psi) = \varepsilon(k) \tau(\chi, \psi)^N. \quad (4.12.2)$$

Si  $k$  est un corps,  $\varphi$  est une permutation circulaire de  $I$ ,  $\varepsilon(k) = (-1)^{N+1}$ , et on retrouve l'identité de Hasse-Davenport :

$$\tau(\chi \circ N_{k/\mathbb{F}_q}, \psi \circ \operatorname{Tr}_{k/\mathbb{F}_q}) = (-1)^{N+1} \tau_{\mathbb{F}_q}(\chi \circ N_{k/\mathbb{F}_q}, \psi) = \tau(\chi, \psi)^N.$$

**Lemme 4.13.** *Pour  $\chi \circ \tau = (\chi_i)_{i \in I}$  comme en 4.9(i), les conditions suivantes sont équivalentes*

- (i)  $\chi|_{\mathbb{F}_q^\times}$  est trivial
- (ii) Le produit des  $\chi_i$  est trivial
- (iii)  $\mathcal{F}(\chi) = \mathcal{K}_n((\chi_i))$  est image réciproque d'un (unique) faisceau sur  $V^*/\mathbb{G}_m$ .

(iv) L'image réciproque de  $\mathcal{F}(\chi)$  sur  $\mathbb{G}_m$  (envoyé dans  $V^*$  à partir du morphisme structural  $\mathbb{F}_q \rightarrow k$ ) est triviale.

(i) $\Rightarrow$ (ii). On regarde  $\chi$  comme une caractère de  $V^*/\mathbb{G}_m(\mathbb{F}_q) = k^\times/\mathbb{F}_q^\times$ , et on prend  $\mathcal{F}(\chi)$  sur  $V^*/\mathbb{G}_m$ .

(ii) $\Rightarrow$ (iii). De même, on regarde  $(\chi_i)$  comme un caractère de  $(V^*/\mathbb{G}_m)_n$ . L'unicité dans (iii) résulte de ce que  $V^*$  est un fibré à fibres connexes sur  $V^*/\mathbb{G}_m$ , et (iii) $\Rightarrow$ (iv) est trivial.

(iv) $\Rightarrow$ (i), (ii). Cette image réciproque est  $\mathcal{F}(\chi|\mathbb{F}_q^\times)$  et  $\mathcal{K}_n(\prod \chi_i)$ .

#### 4.14

Soient  $k$  une algèbre étale sur  $\mathbb{F}_q$ , de dimension  $N + 1$  et  $\chi$  un caractère non trivial de  $k^\times$ , trivial sur  $\mathbb{F}_q^\times$ . La somme de Jacobi  $J(\chi)$  est définie par

$$J(\chi) = (-1)^{N-1} \sum_{\substack{x \in k^\times/\mathbb{F}_q^\times \\ \text{Tr}(x)=0}} \chi^{-1}(x). \quad (4.14.1)$$

On a entre sommes de Gauss et sommes de Jacobi l'identité suivante.

**Proposition 4.15.** *Pour  $\chi$  comme ci-dessus et  $\psi$  un caractère additif non trivial de  $\mathbb{F}_q$ , on a*

$$qJ(\chi) = \tau_{\mathbb{F}_q}(\chi, \psi).$$

Dans le cas particulier où  $k = \mathbb{F}_q^n$ , cette formule se récrit par (4.5.3)

$$qJ(\chi) = \prod_i \tau(\chi_i, \psi), \quad (4.15.1)$$

plus écrit sous la forme

$$\begin{aligned} \chi_0(-1)J(\chi) &= (-1)^{N-1} \sum_{\substack{x_1, \dots, x_N \in \mathbb{F}_q^\times \\ \sum x_i = 1}} \prod_{i=1}^N \chi_i^{-1}(x_i) = \tau(\chi_0^{-1}, \psi)^{-1} \prod_{i=1}^N \tau(\chi_i, \psi) \\ \chi_0^{-1} &= \prod_{i=1}^N \chi_i \end{aligned}$$

*Preuve de 4.15.*

$$\tau_{\mathbb{F}_q}(\chi, \psi) = (-1)^{N+1} \sum_{x \in k^\times} \chi(x)^{-1} \psi \text{Tr}(x) = (-1)^{N+1} \sum_{x \in k^\times/\mathbb{F}_q^\times} \chi(x)^{-1} \sum_{\lambda \in \mathbb{F}_q^\times} \psi(\lambda \text{Tr } x).$$

La somme  $\sum_{\lambda \in \mathbb{F}_q^\times} \psi(\lambda \text{Tr } x)$  vaut  $q - 1$  si  $\text{Tr}(x) = 0$ , et  $-1$  si  $\text{Tr}(x) \neq 0$ . Dès lors,

$$\tau_{\mathbb{F}_q}(\chi, \psi) = (-1)^{N+1} \left( q \sum_{x \in k^\times/\mathbb{F}_q^\times} \chi(x)^{-1} - \sum_{x \in k^\times/\mathbb{F}_q^\times} \chi(x)^{-1} \right).$$

La second terme au second membre est nul, car somme des valeurs d'un caractère, et 4.15 en résulte.  $\square$

La proposition 4.15 se transpose ainsi en cohomologie :

**Proposition 4.16.** *La cohomologie de  $W^*/\mathbb{G}_m$  (4.6, 4.8) à coefficient dans  $\mathcal{F}(\chi^{-1})$  vérifie*

- (i)  $H_c^i = 0$  pour  $i \neq N - 1$ , et  $\dim H_c^{N-1} = 1$ .
- (ii) Sur  $H_c^{N-1}$ ,  $F^*$  est la multiplication par  $J(\chi)$ .
- (iii)  $H_c^{N-1}$  est canoniquement isomorphe à  $H_c^{N+1}(V^*, \mathcal{F}(\chi^{-1}, \psi \circ \text{Tr}_{k/\mathbb{F}_q})) (1)$ .

L'assertion (ii) résulte de (i) et de la formule des traces ; (i) et (iii) résultent de 4.11 et de l'énoncé plus géométrique suivant.

**Proposition 4.17.** *Soit  $(\chi_i)_{i \in I}$  une famille de caractères non triviaux de  $\mu_n(\mathbb{F})$ , de produit 1. Alors,  $H_c^{i-1}(W^*/\mathbb{G}_m, \mathcal{K}_m((\chi_i)_{i \in I}))$  est canoniquement isomorphe à  $H_c^{i+1}(V^*, \mathcal{K}_m((\chi_i)_{i \in I}) \otimes \mathcal{F}(\psi \operatorname{Tr}_{k/\mathbb{F}_q}))(1)$ .*

La première ligne de 4.15 devient ( $\pi$  comme en (4.6.1)).

$$R^i \pi_! (\mathcal{K}_n((\chi_i)_{i \in I}) \otimes \mathcal{F}(\psi \operatorname{Tr}_{k/\mathbb{F}_q})) = \mathcal{K}_n((\chi_i)_{i \in I}) \otimes R^i \pi_! \mathcal{F}(\psi \operatorname{Tr}_{k/\mathbb{F}_q}) \quad (4.17.1)$$

(sur  $V^*/\mathbb{G}_m$ ). Calculons les faisceaux  $R^i \pi_! \mathcal{F}(\psi \operatorname{Tr}_{k/\mathbb{F}_q}) = R^i \pi_! T^* \mathcal{F}(\psi)$ . Soit  $v_0 : \tilde{V}_0 \rightarrow V_0$  l'éclaté de  $V_0$  en  $\{0\}$ . Dans le diagramme

$$\begin{array}{ccc} V_0 \setminus \{0\} & \xrightarrow{\subset} & \tilde{V}_0 \xrightarrow{v_0} V_0 \\ & \searrow \pi & \downarrow \bar{\pi} \\ & & P_0 \end{array} \quad (4.17.2)$$

$\pi$  est une fibration de fibre des droites époutées,  $\tilde{V}_0$  est le fibré en droites correspondant, et  $Z_0 = v_0^{-1}(0)$  sa section 0. Le faisceau  $T^* \mathcal{F}(\psi)$  sur  $V - 0 \setminus \{0\}$  se prolonge en  $(Tv_0)^* \mathcal{F}(\psi)$  sur  $\tilde{V}_0$ , et la restriction de ce faisceau à  $Z_0$  est le faisceau constant  $E_\lambda$ , car  $T_0 v_0$  est nul sur  $Z_0$ . La suite exacte longue de cohomologie à support propre s'écrit donc

$$\longrightarrow R^i \pi_! T^* \mathcal{F}(\psi) \longrightarrow R^i \bar{\pi}_! (Tv)^* \mathcal{F}(\psi) \longrightarrow (E_\lambda \text{ pour } i = 0, 0 \text{ sinon}) \longrightarrow \quad (4.17.3)$$

L'image réciproque  $\bar{\pi}^{-1}(Q_0)$  est l'éclaté  $\tilde{W}_0$  de  $W_0$  en 0 ;  $T_0 V_0$  s'annule sur  $\tilde{W}_0$  ; on a donc  $(Tv)^* \mathcal{F}(\psi) = E_\lambda$  sur  $\pi^{-1}(Q_0)$  et,  $\bar{\pi}$  étant un fibré en droites

$$R^i \bar{\pi}_! (Tv)^* \mathcal{F}(\psi)|_Q = \begin{cases} 0 & \text{pour } i \neq 2 \\ E_\lambda(-1) & \text{pour } i = 2. \end{cases} \quad (4.17.4)$$

Si  $x \in P$ ,  $x \notin Q$ , la droite  $D = \pi^{-1}(x)$  est envoyé isomorphiquement sur  $\mathbb{G}_a$  par  $Tv$  ; on a donc 2.7\*)

$$\begin{aligned} H_c^\bullet(D, (Tv)^* \mathcal{F}(\psi)) &= H^\bullet(\mathbb{G}_a, \mathcal{F}(\psi)) = 0 & \text{et} \\ R^i \bar{\pi}_! (Tv)^* \mathcal{F}(\psi) &= \begin{cases} 0 & \text{pour } i \neq 2 \\ E_\lambda(-1)_Q & \text{pour } i = 2 \end{cases} \end{aligned} \quad (4.17.5)$$

Conjuguant (4.17.3) et (4.17.5), on trouve enfin

$$R^i \pi_! T^* \mathcal{F}(\psi) = \begin{cases} 0 & \text{pour } i \neq 1, 2 \\ E_\lambda & \text{pour } i = 1 \\ E_\lambda(-1)_Q & \text{pour } i = 2. \end{cases} \quad (4.17.6)$$

## 4.18

Calculons la cohomologie à support propre du faisceau  $\mathcal{K}_n((\chi_i)) \otimes T^* \mathcal{F}(\psi)$  sur  $V^*$  à l'aide de la suite spectrale de Leray de  $\pi : V^* \rightarrow V^*/\mathbb{G}_m$ . Appliquant (4.17.1) et (4.17.6), on trouve comme termes initiaux les  $E_2^{p,1} = H_c^p(V^*/\mathbb{G}_m, \mathcal{K}_n(\chi_i)) = 0$  (car  $(\chi_i) \neq 0$ ) et les  $E_2^{p,2} = H_c^p(W^*/\mathbb{G}_m, \mathcal{K}(\chi_i))(-1)$ .

La suite spectrale se réduit à un isomorphisme, et 4.17 en résulte.

## 4.19

Les faisceaux  $\mathcal{K}_n((\chi_i)_{i \in I})$  ont un sens sur n'importe quel corps, voire sur n'importe schéma de base. Ceci va nous permettre de généraliser 4.16(i). Avec les notations de 4.6, supposons  $M$  fini étale partout de rang  $N$  sur  $A$ , et soit  $n$  un entier inversible dans  $A$ . On note  $a$  la projection de  $W^*/\mathbb{G}_m$  sur  $\text{Spec}(A)$ . Soit aussi  $\chi$  un caractère (morphisme de faisceaux)  $\chi : (V^*/\mathbb{G}_m)_n \rightarrow E_\chi^\times$ , et  $\mathcal{K}_n(\chi)$  le faisceau correspondant. Localement pour la topologie étale, on peut regarder  $\chi$  comme une famille de caractères  $(\chi_i)_{i \in I}$  de  $\mu_n$ , de produit trivial.

**Proposition 4.20.** (i) Si  $\chi$  est (en tout point) non trivial, on a  $R^i a_! (\mathcal{K}_n(\chi)) = 0$  pour  $i \neq N-1$ , et  $R^{N-1} a_! (\mathcal{K}_n(\chi))$  est lisse, de rang 1.

(ii) Une automorphisme  $\sigma$  de  $M$  qui respecte  $\chi$  agit sur ce  $R^{N-1} a_!$  par multiplication par la signature  $\varepsilon(\sigma)$  de  $\sigma$ , vu comme permutation de  $I$ .

(iii) Si les  $\chi_i$  sont tous non triviaux, on a  $Ra_! \xrightarrow{\sim} Ra_*$ .

*Preuve.* Le schéma  $W^*/\mathbb{G}_m$  est le complément d'un diviseur à croisements normaux relatif dans le schéma  $Q$ , propre et lisse sur  $\text{Spec}(A)$ , et  $\mathcal{K}_n(\chi)$  est localement constant sur  $W^*/\mathbb{G}_m$ , à ramification modérée à l'infini. Il en résulte que les  $R^i a_!$  et  $R^i a_*$  sont lisses, de formation compatible à tout changement de base. Un argument standard nous ramène alors à supposer que  $A$  est un corps fini, et (i) résulte de 4.17 et 4.11(i). Pour prouver (ii), on utilise que l'action de  $\sigma$  est compatible à l'isomorphisme 4.17, et 4.12. Pour (iii), on note que si les  $\chi_i$  sont tous non triviaux, alors  $\mathcal{K}_n(\chi)$  sur  $W^*/\mathbb{G}_m \subset Q$  est ramifié le long de chaque diviseur à l'infini, et 1.19.1.  $\square$

## 5 Caractères de Hecke

## 5.1

Soient  $F$  un corps de nombres (de degré fini sur  $\mathbb{Q}$ ) et  $k$  un corps de caractéristique 0. Voici diverses façon équivalentes de dire ce qu'est un homomorphisme algébrique  $\alpha : F^\times \rightarrow k^\times$ .

(i) Soit  $\{e_i\}$  une base de  $F$  sur  $\mathbb{Q}$ . L'homomorphisme  $\alpha$  est algébrique s'il est donné par une formule  $\alpha(\sum x^i e_i) = A(x^i)$ ,  $A \in k(X^i)$ .

Ceci signifie que  $\alpha$  coïncide sur  $F^\times$  avec une application rationnelle définie sur  $k$  de  $R_{F/\mathbb{Q}}(\mathbb{G}_m)$  dans  $\mathbb{G}_m$ . Par densité de Zariski de  $F^\times$ , et le fait qu'un homomorphisme birationnel est partout défini, une telle application est un homomorphisme de schémas en groupes :

(ii)  $\alpha$  est induit par un homomorphisme de  $k$ -schémas en groupes

$$R_{F/\mathbb{Q}}(\mathbb{G}_m) \otimes_{\mathbb{Q}} k \rightarrow \mathbb{G}_m.$$

Si  $k$  est un corps de nombre, la propriété d'adjonction de la restriction des scalaires  $R$  montre que ceci équivaut à

(iii) ( $k$  un corps de nombres)  $\alpha$  est induit par un homomorphisme de  $\mathbb{Q}$ -schémas en groupes :  $R_{F/\mathbb{Q}}(\mathbb{G}_m) \rightarrow R_{k/\mathbb{Q}}(\mathbb{G}_m)$ .

Soient  $\bar{k}$  un clôture algébrique de  $k$ , et  $I = \text{hom}(F, \bar{k})$ . Sur  $\bar{k}$ , le groupe des caractères de  $R_{F/\mathbb{Q}}(\mathbb{G}_m)$  est  $\mathbb{Z}^I$ , de base les plongements de  $F$  dans  $\bar{k}$ . Les caractères définis sur  $k$  sont ceux invariants par  $\text{Gal}(\bar{k}/k)$ ; on peut les décrire soit comme ceux envoyant  $F^\times$  dans  $k^\times \subset \bar{k}^\times$ , soit en terme des orbites de  $\text{Gal}(\bar{k}/k)$  dans  $I$ , correspondant elle-même aux facteurs de  $F \otimes k$ .

(iv)  $\alpha$  est de la forme  $\alpha = \prod_{\omega \in I} \omega^{n_\omega}$ . Les familles d'exposants  $(n_\omega)$  permises sont celles telles que  $n_\omega = n_{\omega'}$  pour  $\omega$  et  $\omega'$  dans la même orbite de  $\text{Gal}(\bar{k}/k)$ . Ce sont encore celles telle que  $\prod_{\omega} (x)^{n_\omega} \in k$  pour tout  $x \in F$ .

(v) Posons  $F \otimes k = \prod_{j \in J} F_j$ , les  $F_j$  étant des corps. Alors,  $\alpha$  s'écrit  $\alpha = \prod_{F_j/k} N_{F_j/k}^{m_j}$ .

Dans le cas particulier où  $k$  contient une clôture normale de  $F$ , ces expressions deviennent :  $\alpha = \prod \omega^{n_\omega}$ , où  $\omega$  parcourt les  $[F : \mathbb{Q}]$  plongements de  $F$  dans  $k$ .

## 5.2

Supposons que  $k$  soit un corps de nombres, et soit  $\alpha$  un homomorphisme algébrique de  $F^\times$  dans  $k^\times$ . Il existe alors un et un seul homomorphisme, encore noté  $\alpha$ , du groupe  $I(F)$  des idéaux fractionnaires de  $F$  dans celui de  $k$ , tel que  $\alpha((x)) = (\alpha(x))$ . L'unicité résulte de ce que tout idéal  $a$  une puissance qui est un idéal principal, et de ce que  $I(k)$  est sans torsion. Pour prouver l'existence, on utilise par exemple 5.1(v) : on a  $\alpha(a) = \prod N_{F_j/k}^{m_j}((a))$ .

## 5.3

Rappelons la définition des caractères de Hecke algébriques, appelés Weil caractères de Hecke (ou : grössencharaktere) de type  $A_0$ . Soient  $F$  un corps de nombres,  $\mathfrak{m}$  un idéal de  $F$  (i.e., de l'anneau des entiers de  $F$ ),  $I_{\mathfrak{m}}$  le groupe des idéaux fractionnaires de  $F$  premiers à  $\mathfrak{m}$ , et  $k$  un corps de caractéristique 0. Un homomorphisme  $\chi : I_{\mathfrak{m}} \rightarrow k^\times$  est un *caractère de Hecke algébrique* (de conducteur  $\leq \mathfrak{m}$ ) s'il existe un homomorphisme algébrique  $\chi_{\text{alg}} : F^\times \rightarrow k^\times$  vérifiant

$$\text{Pour } x \in F^\times, \text{ premier à } \mathfrak{m}, \text{ totalement positif et } \equiv 1 \pmod{\mathfrak{m}}, \text{ on a } \chi((x)) = \chi_{\text{alg}}(x). \quad (*)$$

Par densité de l'ensemble des  $x$  de  $(*)$ ,  $\chi_{\text{alg}}$  est entièrement déterminé par  $\chi$ . C'est la *partie algébrique* de  $\chi$ . Si  $\chi((x)) = \chi_{\text{alg}}(x)$  pour  $x$  totalement positif et  $\equiv 1 \pmod{\mathfrak{m}'}$ ,  $\chi$  se prolonge en un caractère de Hecke de conducteur  $\leq \inf(\mathfrak{m}, \mathfrak{m}') : I_{\mathfrak{m}+\mathfrak{m}'} \rightarrow k^\times$ . On identifiera les caractères de Hecke qui coïncident sur leur domaine commun de définition, et on appelle *conducteur* de  $\chi$  le plus petit  $\mathfrak{m}'$  tel que  $\chi$  soit de conducteur  $\leq \mathfrak{m}'$ .

## 5.4 Remarque

Si un caractère de Hecke algébrique  $\chi$  prend ses valeurs dans un sous-corps  $k'$  de  $k$ , c'est déjà un caractère de Hecke à valeurs dans  $k'$  : il suffit de voir que  $\chi_{\text{alg}} : R_{F/\mathbb{Q}}(\mathbb{G}_m) \rightarrow \mathbb{G}_m$  est déjà défini sur  $k'$ , et ceci résulte de la densité de Zariski dans  $R_{F/\mathbb{Q}}(\mathbb{G}_m)$  de l'ensemble des  $x$  totalement positif  $\equiv 1 \pmod{\mathfrak{m}}$ . On peut toujours prendre pour  $k'$  un sous-corps de  $k$  de degré fini sur  $\mathbb{Q}$ .

## 5.5

Si  $\varepsilon$  est une unité totalement positive  $\equiv 1 \pmod{\mathfrak{m}}$ , on a  $\chi_{\text{alg}}(\varepsilon) = \chi((\varepsilon)) = 1$ . L'homomorphisme  $\chi_{\text{alg}}$  se factorise donc par le quotient  $T_{\mathfrak{m}}$  de  $R_{F/\mathbb{Q}}(\mathbb{G}_m)$  par l'adhérence de Zariski du groupe  $E_{\mathfrak{m}} \subset F^\times$  des unités totalement positifs  $\equiv 1 \pmod{\mathfrak{m}}$ .

D'après Serre [Ser68, II.3], si  $k$  est une clôture algébrique de  $\mathbb{Q}$ , et que  $\mathfrak{m}$  est assez grand, les caractères  $\prod \omega^{n_\omega}$  de  $R_{F/\mathbb{Q}}(\mathbb{G}_m)$  de la forme  $\chi_{\text{alg}}$  sont caractérisés comme suit : il doit exister un entier  $N$ , le *poide* de  $\chi$  (ou de  $\chi_{\text{alg}}$ ), tel que pour tout élément  $\sigma$  de  $\text{Gal}(k/\mathbb{Q})$  conjugué à la conjugaison complexe, on ait  $n_\omega + n_{\sigma\omega} = N$ . Si  $F_1$  est le plus grand sous-corps de  $F$  qui soit une extension quadratique totalement imaginaire d'un corps totalement réel  $F'_1$ , cela revient à dire que  $\chi_{\text{alg}}$  est de la forme  $\chi_1 \circ N_{F/F_1}$ , et que  $\chi_1|_{F_1} = (N_{F_1/\mathbb{Q}})^N$ .

Si  $\chi$  est de poide  $N$ , pour tout idéal  $\mathfrak{a}$  de  $F$ ,  $\chi(\mathfrak{a})$  est un nombre algébrique dont tous les conjugués sont de valeur absolue  $N(\mathfrak{a})^{N/2}$  [Ser68, II.3 prop.2].

## 5.6

Pour  $k$  un corps de nombres fixé, des conditions supplémentaires sont imposées à  $\chi_{\text{alg}}$ . Pour tout idéal  $\mathfrak{a}$  de  $F$  premier au conducteur, on a en effet

$$\chi_{\text{alg}}(\mathfrak{a}) = (\chi(\mathfrak{a})), \quad (5.6.1)$$

de sorte que  $\chi_{\text{alg}}(\mathfrak{a})$  est principal. Puisque le groupe des idéaux fractionnaires de  $k$  est sous torsion, il suffit de prouver la puissance  $n$ -ième de (5.6.1),  $n \neq 0$  convenable ; ceci permet de remplacer  $\mathfrak{a}$  par  $\mathfrak{a}^n$ , donc de supposer  $\mathfrak{a} = (x)$ , avec  $x$  totalement positif  $\equiv 1 \pmod{\mathfrak{m}}$ . Il ne reste qu'à utiliser les définitions.

Ceci, joint à 5.5, montre que  $\chi_{\text{alg}}$  détermine la norme des  $\chi(\mathfrak{a})$  en toutes les places de  $k$ .

## 5.7

Le groupe  $S_m$  de Serre pourrait être caractérisé comme étant le groupe de type multiplicatif dont le groupe des caractères (sur n'importe quel corps) est le groupe des caractères de Hecke algébriques de conducteur  $\leq m$ . (cf. [Ser68, II 2.1 et 2.2]). Sa relation avec les représentations  $\ell$ -adiques est expliquée en [Ser68, II 2.3].

**Théorème 5.8** ([Ser68]). *Soit  $\chi$  un caractère de Hecke algébrique de  $F$  dans  $E_\lambda$ , pour  $E_\lambda$  une extension finie de  $\mathbb{Q}_\ell$ . Il existe alors un (et un seul) homomorphisme  $\chi_\lambda : \text{Gal}(\bar{F}/F)^{\text{ab}} \rightarrow E_\lambda$ , tel que*

- (i)  $\chi_\lambda$  est non ramifié en dehors du conducteur  $\mathfrak{f}$  de  $\chi$  et de  $\ell$ .
- (ii) Pour  $\mathfrak{p}$  un idéal premier de  $F$  premier à  $\mathfrak{f}$  et à  $\ell$ , et  $F_{\mathfrak{p}} \in \text{Gal}(\bar{F}/F)^{\text{ab}}$  le Frobenius géométrique en  $\mathfrak{p}$ , on a

$$\chi_\lambda(F_{\mathfrak{p}}) = \chi(\mathfrak{p}).$$

## 5.9

Dans la fin de ce paragraphe, nous donnerons un critère pour qu'une représentation  $\lambda$ -adique provienne ainsi d'un caractère de Hecke, et, au paragraphe suivant, nous l'appliquerons aux sommes de Jacobi. Nous retrouverons ainsi, un peu généralisés des résultats de Weil [Wei52, Wei74b], avec la seconde partie de la démonstration de Weil remplacée par un argument de cohomologie  $\ell$ -adique.

**Théorème 5.10.** *Soient  $F$  de  $k$  deux corps de nombres,  $\lambda$  une place de  $k$  de caractéristique  $\ell$ , et  $\chi_\lambda : \text{Gal}(\bar{F}/F)^{\text{ab}} \rightarrow k_\lambda^\times$  un homomorphisme, non ramifié en dehors de  $\ell$  et d'un ensemble fini  $S$  de places. On suppose qu'il existe un ensemble  $T$  de places (contenant  $S$  et les places au-dessus de  $\ell$ ), de densité 0, et un homomorphisme algébrique  $\chi_0 : F^\times \rightarrow k^\times$  tels que*

- (i) Pour  $\bar{k}$  une clôture algébrique de  $k$ ,  $\chi_0 : F^\times \rightarrow k^\times \hookrightarrow \bar{k}^\times$  est du type considéré en 5.5, de poids  $N$ ;
- (ii) Pour  $\mathfrak{p}$  premier  $\notin T$ ,  $\chi_\lambda(F_{\mathfrak{p}})$  est dans  $k^\times$ ,  $(\chi_\lambda(F_{\mathfrak{p}})) = \chi_0(\mathfrak{p})$ , et tous les conjugués complexes de  $\chi_\lambda(F_{\mathfrak{p}})$  sont de valeur absolue  $(N\mathfrak{p})^{N/2}$ .

Alors,  $\chi_\lambda$  est défini (5.8) par un caractère de Hecke algébrique de  $F$  à valeurs dans  $k$ , de partie algébrique  $\chi_0$ .

Soit  $\chi'$  un caractère de Hecke algébrique à valeurs dans une extension galoisienne finie  $k'$  de  $k$ , de partie algébrique  $\chi_0$  (5.5). Quitte à agrandir  $T$ , on peut supposer que le conducteur de  $\chi'$  est à support dans  $T$ . Soient  $\lambda'$  une place de  $k'$  au-dessus de  $\lambda$ ,  $\chi_{\lambda'}$  le composé  $\text{Gal}(\bar{F}/F)^{\text{ab}} \rightarrow k_\lambda^\times \rightarrow k_{\lambda'}^\times$ , et  $\chi'_{\lambda'} : \text{Gal}(\bar{F}/F)^{\text{ab}} \rightarrow k_{\lambda'}^\times$  défini par  $\chi'$  (5.8). Posons  $\varepsilon = \chi_{\lambda'} \cdot \chi'_{\lambda'}^{-1}$ .

L'hypothèse (ii), et 5.5, 5.6, 5.8 assurent que pour  $\mathfrak{p} \notin T$ , on a  $\varepsilon(F_{\mathfrak{p}}) \in k'^\times$ , et que, dans tous les complétés de  $k'$ , ce nombre est de norme 1. Il en résulte que  $\varepsilon(F_{\mathfrak{p}})$  appartient au groupe (fini)  $\mu$  racines de l'unité de  $k'$ . D'après le théorème de densité de Cebotarev, et l'hypothèse de densité faite sur  $T$ , les  $F_{\mathfrak{p}}$  ( $\mathfrak{p} \notin T$ ) sont denses dans  $\text{Gal}(\bar{F}/F)^{\text{ab}}$ , de sorte que  $\varepsilon(\sigma) \in \mu$  pour tout  $\sigma \in \text{Gal}(\bar{F}/F)^{\text{ab}}$  : le caractère  $\varepsilon$  est un caractère d'ordre fini  $\text{Gal}(\bar{F}/F)^{\text{ab}} \rightarrow \mu$ . D'après la théorie du corps de classes, il correspond à un caractère d'ordre fini du groupe des classes d'idèles de  $F$ , i.e. à un caractère de Hecke algébrique de partie algébrique triviale. Corrigeant  $\chi'$  par ce caractère, on se ramène à supposer que  $\chi_{\lambda'} = \chi'_{\lambda'}$ , et il reste à montrer que  $\chi'$ , à priori à valeurs dans  $k'$ , est en fait à valeurs dans  $k$ . Si  $\sigma \in \text{Gal}(k'/k)$ ,  $\chi'$  et  $\chi'^\sigma$  coïncident sur tout idéal premier  $\mathfrak{p} \notin T$ , puisque  $\chi'(\mathfrak{p}) = \chi'_{\lambda'}(F_{\mathfrak{p}}) = \chi_{\lambda'}(F_{\mathfrak{p}}) \in k^\times$ . Les caractères  $\chi'_{\lambda'}$ , et  $\chi'_{\lambda'}^\sigma$ , coïncident donc sur une partie dense de  $\text{Gal}(\bar{F}/F)^{\text{ab}}$ , donc sont égaux, de sorte que  $\chi' = \chi'^\sigma$  :  $\chi'$  est à valeurs dans  $k$ .

## 6 Les caractères de Hecke définis par les sommes de Jacobi

L'idée de ce paragraphe est la suivante. Soit une somme de Gauss  $\tau_{\mathbb{F}_q}(\chi, \psi)$ . Elle-même, et le faisceau correspondant  $\mathcal{F}(\chi^{-1}\psi)$  sont deux fois liés à la caractéristique  $p$ , et au corps de base  $\mathbb{F}_q$  :

- a) car il y apparaît le caractère additif  $\psi$ , et le faisceau  $(\psi)$ ;
- b) car  $\mathcal{F}(\chi)$  est défini à partir de la suite exacte de Lang

$$0 \longrightarrow k^\times \longrightarrow V^* \longrightarrow V^* \longrightarrow 0.$$

Deux difficultés si on veut relever sur un corps de nombres  $F$  les constructions cohomologiques correspondantes, et trouver des représentations  $\ell$ -adiques de  $\text{Gal}(\bar{F}/F)$  où les valeurs propres de Frobenius soient des sommes de Gauss.

Si  $\chi$  est trivial sur  $\mathbb{F}_q^\times$ , la somme  $\tau_{\mathbb{F}_q}(\chi, \psi)$  est indépendante de  $\psi$ , et  $q$  fois une somme de Jacobi. Celle-ci est liée à la cohomologie de  $W^*/\mathbb{G}_m$ , à valeurs dans un faisceau déduit de  $\chi : \psi$ , et la difficulté a), ont disparu. Pour résoudre b), il suffit de décrire les faisceaux utilisés à l'aide de suites exactes de Kummer (qui ont un sens en toute caractéristique). C'est possible grâce à 4.9.

Une fois trouvées les représentations  $\ell$ -adiques, on utilise 5.10 et le théorème de Stickelberger pour montrer qu'elles proviennent de caractères de Hecke algébriques.

## 6.1

Si  $E$  est un corps, de clôture algébrique  $\bar{E}$ , et que  $\lambda$  est un caractère d'ordre divisant  $n$  de  $\mu_d(\bar{E})$ , on note  ${}_n\lambda$  le caractère de  $\mu_n(\bar{E})$  tel que  $\lambda$  et  ${}_n\lambda$  induisent le même caractère de  $\widehat{\mathbb{Z}}(1)_{\bar{E}} = \varinjlim \mu_n(\bar{E})$ . De même pour  $\lambda$  un caractère de  $\widehat{\mathbb{Z}}(1)_{\bar{E}}$ .

Soient  $F$  et  $k$  deux corps de nombres,  $\bar{F}$  un clôture algébrique de  $F$ ,  $I$  un ensemble fini muni d'une action de  $\text{Gal}(\bar{F}/F)$  et  $\lambda = (\lambda_i)_{i \in I}$  une famille de caractères  $\lambda_i : \widehat{\mathbb{Z}}(1)_{\bar{F}} \rightarrow k^\times$ . On suppose que  $\lambda_i \neq 1$  ( $i \in I$ ), que le produit des  $\lambda_i$  est trivial et que la famille  $\lambda$  est défini sur  $F$ , i.e. que pour tout  $\sigma \in \text{Gal}(\bar{F}/F)$ , on a  $\lambda_{\sigma(i)} = \lambda_i \circ \sigma^{-1}$ .

L'ensemble galoisien  $I$  est l'ensemble des homomorphismes dans  $\bar{F}$  d'une algèbre  $E$  séparable sur  $F$ . Si  $C$  est l'ensemble des orbites de  $\text{Gal}(\bar{F}/F)$  dans  $I$ , on a une décomposition de  $E$  en produit de corps  $E = \prod_{\alpha \in C} E_\alpha$ , où  $\alpha$  s'identifie à l'ensemble des plongements de  $E_\alpha$  dans  $\bar{F}$ . Si les caractères  $\lambda_i$ , pour  $i \in \alpha$ , sont d'ordre  $d_\alpha$ , le corps  $E_\alpha$  contient les racines  $d_\alpha$ -ièmes de 1 et il existe  $\lambda_\alpha : \mu_{d_\alpha}(E_\alpha) \hookrightarrow k^\times$  tel que, si  $i \in \alpha$  correspond au plongement  $\sigma_i$  de  $E_\alpha$  dans  $\bar{F}$ , on ait  ${}_{d_\alpha}\lambda_i = \lambda_\alpha \sigma_i^{-1}$ .

## 6.2

Soient  $n > 0$  un multiple des  $d_\alpha$ ,  $\Sigma$  l'ensemble des places de  $F$  où  $E/F$  se ramifie ou qui divisent  $n$ ,  $\mu$  une place de  $k$  de caractéristique résiduelle  $\ell$ , et  $A$  l'anneau des éléments de  $F$  entiers en dehors de  $\Sigma$  et  $\ell$ . La clôture intégrale  $M$  de  $A$  est finie étale de rang  $N = |I|$  sur  $A$ . Avec les notations de 4.6, 4.8, les  ${}_n\lambda_i$  définissent

$${}_n\lambda : (V^*/\mathbb{G}_m)_n \rightarrow k^\times \subset k_\mu^\times.$$

Soit  $a$  la projection de  $W^*/\mathbb{G}_m$  sur  $\text{Spec}(A)$ . D'après 4.20, le faisceau  $R^{N-2}a_!\mathcal{K}_n({}_n\lambda)$  est lisse de rang un ; il définit une représentation  $\ell$ -adique

$$j_\mu[\lambda] : \text{Gal}(\bar{F}/F)^{\text{ab}} \rightarrow k_\mu^\times$$

(ou simplement  $j_\mu$ ) nono ramifiée en dehors de  $\sigma$  et  $\ell$ .

## 6.3

Calculons  $j_\mu(F_{\mathfrak{p}})$ . D'après 4.20, il suffit de le faire après réduction modulo  $\mathfrak{p}$ . Soient donc  $f = A/\mathfrak{p}$ ,  $e = M/\mathfrak{p}M$ , et  $\bar{f}$  la clôture algébrique de  $f$  définie par une place de  $\bar{F}$  au-dessus de  $\mathfrak{p}$ . On a encore  $I = \text{hom}_f(e, \bar{f})$ . Après réduction,  ${}_n\lambda$  admet encore une description 6.1 :

a) Soit  $D$  l'ensemble des orbites de  $\text{Gal}(\bar{f}/f)$  dans  $I$ . La décomposition de  $e$  en produit de corps s'écrit  $e = \prod_{\beta \in D} e_\beta$ , où les  $\sigma_i$  ( $i \in \beta$ ) s'identifient aux plongements de  $e_\beta$  dans  $F$ . Pour  $\beta \in D$ , on note  $\alpha(\beta)$  l'élément de  $C$  contenant  $\beta$  et  $d_\beta = d_{\alpha(\beta)}$ . Soit

$$\lambda_\beta : \mu_{d_\beta}(e_\beta) \xleftarrow{\sim} \mu_{d_\beta}(E_{\alpha(\beta)}) \xrightarrow{\lambda_{d(\beta)}} k^\times.$$

b) Si  $i \in I$  correspond au plongement  $\sigma_i$  de  $e_\beta$  dans  $\bar{f}$ , la réduction  ${}_{d_\beta}\bar{\lambda}_i : \mu_{d_\beta}(\bar{f}) \rightarrow k^\times$  de  ${}_{d_\beta}\lambda_i$  de  ${}_{d_\beta}\lambda_i$  est  $\lambda_\beta \circ \sigma_i^{-1}$ .

Soient  $q_\beta$  le nombre d'éléments de  $e_\beta$ ,  $\chi_\beta =_{(q_\beta-1)} \lambda_\beta$ , et  $\chi : e^\times \rightarrow k^\times$  de coordonnées les  $\chi_\beta$ . Sur l'espace affine sur  $A/\mathfrak{p}$  défini par  $e$  (4.6), ou plutôt sur le tore  $e_\beta^\times$ , on a des isomorphismes  $\mathcal{K}_n((\bar{\lambda}_i)_{i \in \beta}) = \mathcal{K}_{d_\beta}((\lambda_\beta \circ \sigma_i^{-1})_{i \in \beta}) = \mathcal{K}_{q_\beta-1}((\chi_\beta \circ \sigma_i^{-1})_{i \in I}) = \mathcal{F}(\chi_\beta)$  (4.9). Sur  $e^\times$ , on a donc  $\mathcal{K}_n((\bar{\lambda}_i)_{i \in \beta}) = \mathcal{F}(\chi)$  et cet isomorphismes se descend à la réduction mod  $\mathfrak{p}$  de  $V^*/\mathbb{G}_m$ . Dès lors

**Proposition 6.4.** *Avec les notations de 6.2 et 6.3,  $j_\mu(F_\mathfrak{p})$  est la somme de Jacobi  $J(\chi)$ .*

Récrivons les formules liant  $(\lambda_i)_{i \in I}$  à  $(\chi_\beta)_{\beta \in B}$  : pour  $i \in \beta \subset \alpha$ ,

$$\begin{aligned} d_\alpha \lambda_i &= \lambda_\alpha \circ \sigma_i^{-1} & \lambda_\alpha &: \mu_{d_\alpha}(E_\alpha) \rightarrow k^\times \\ \lambda_\beta &= \text{réduction de } \lambda_\alpha & &: \mu_{d_\alpha}(e_\beta) \rightarrow k^\times \\ \chi_\beta &=_{q_\beta-1} \lambda_\beta : x \mapsto \lambda_\beta(x^{(q_\beta-1)/d_\alpha}) & &: e_\beta^\times \rightarrow k^\times \end{aligned}$$

**Théorème 6.5.** *La représentation  $j_\mu$  est définie par un caractère de Hecke algébrique de  $F$  à valeurs dans  $k^\times$ .*

Nous le vérifierons à l'aide de 5.10. On rejoint ici la démonstration de Weil [Wei52, Wei74b], par l'usage du théorème de Stickelberger, et je ne donnerai que quelques indications.

## 6.6

Etant donné  $j : \text{Gal}(\bar{F}/F) \rightarrow k_\lambda^\times$ , et une extension finie  $F'/F$ , on vérifie à l'aide de 5.10 que  $j$  est défini par un caractère de Hecke si et seulement si  $j|_{\text{Gal}(\bar{F}/F')}$  l'est. Cette remarque permet dans 6.5 de se réduire au cas où Galois agit trivialement sur  $I$ , et où  $F$  contient les racines  $n$ -ièmes de l'unité. On peut ensuite se réduire au cas où  $F = \mathbb{Q}(\sqrt[n]{1})$ , puis prendre  $k = F$ . Dans ce cas, chaque  ${}_n\lambda_i$  est défini par  $a_i \in \mathbb{Z}/n$  : c'est  $x \mapsto x^{a_i} : \mu_n \rightarrow k^\times$ . On a  $\sum a_i = 0$ , et  $a_i \neq 0$ .

## 6.7

Dans un corps de nombres, les places de degré 1 forment toujours un ensemble de densité 0. En appliquant 5.10, on peut donc négliger les autres, et n'utiliser Stickelberger que pour un corps premier. Soient donc  $p$  premier,  $0 < a < p-1$ ,  $\tilde{x} : \mathbb{F}_p^\times \rightarrow \mathbb{Q}_p^\times$  le caractère "relèvement multiplicatif" et  $g = -\sum_{x \in \mathbb{F}_p^\times} \tilde{x}^{-a} \zeta^x \in \mathbb{Q}_p(\zeta)$ , pour  $\zeta$  une racine  $p$ -ième de 1. Notons encore  $x$  l'entier dans  $[0, p-1]$  relevant  $x$ , et développons  $\zeta^x = (1+\pi)x$  par la formule du binôme. On trouve  $g = -\sum_{i=0}^{p-1} A_i \pi^i$  avec  $A_i \in \mathbb{Z}_p$ , de réduction mod  $p$  la somme  $\sum_{x \in \mathbb{F}_p^\times} x^{-a} \binom{x}{i}$ . Pour  $b$  non divisible par  $p-1$ , on a  $\sum_{x \in \mathbb{F}_p^\times} x^b = 0$ . Si  $i < a$ ,  $\binom{x}{i}$  est un polynôme en  $x$  de degré  $i < a$ , d'où  $A_i \equiv 0 \pmod{p}$ . De même,  $A_a \equiv \frac{p-1}{a!} \pmod{p}$ , et  $g \sim \frac{\pi^a}{a!}$  : la valuation de  $g$  est donnée par  $v(g)/v(p) = \frac{a}{p-1}$ .

## 6.8

Soit  $\sigma_i$  ( $i \in (\mathbb{Z}/n)^\times$ ) l'élément de  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\sqrt[n]{1})/\mathbb{Q})$  tel que  $\sigma_i(\zeta) = \zeta^i$  pour  $\zeta^n = 1$ , et notons additivement le groupe des homomorphismes algébriques  $\mathbb{Q}(\sqrt[n]{1})^\times \rightarrow \mathbb{Q}(\sqrt[n]{1})^\times$ . Pour  $\lambda$  comme en 6.6, défini par une famille  $(a_i)_{i \in I}$  d'entiers mod  $n$ , non nuls et de somme nulle 5.10, (4.15.1) et 6.7 montrent que  $j_\mu[\lambda]$  st défini par un caractère de Hecke algébrique  $j[a]$  et que, si  $N$  est la norme, sa partie algébrique est donnée par

$$(Nj[a])_{\text{alg}} = \sum_{i \in (\mathbb{Z}/n)^\times} \sum_{j \in I} \left\lfloor \frac{ia_j}{n} \right\rfloor \sigma_i^{-1} \quad (6.8.1)$$

où  $\lfloor \cdot \rfloor$  est la partie fractionnaire.

## 6.9

Le cas le plus intéressant est celui où  $F \subset \mathbb{Q}(\sqrt[n]{1})$ , et où la famille des  ${}_n\lambda_i$  est construite comme suite :



a) On prend une famille finie  $(A_j)_{j \in J}$  d'orbites de  $\text{Gal}(\sqrt[n]{1}/F) = H \subset (\mathbb{Z}/n)^\times$  dans  $\mathbb{Z}/n$ . On suppose que  $A_j \neq \{0\}$  et que  $\sum_{j \in J} \sum_{a \in A_j} a = 0$ .

b) On prend  $I = \sqcup_{j \in J} A_j$ ; Galois agit sur chaque  $A_j$ .

c) On prend  $\bar{F} \supset \mathbb{Q}(\sqrt[n]{1})$ ,  $k = \mathbb{Q}(\sqrt[n]{1})$  et, si  $i \in I$  correspond à  $a \in A_j \subset (\mathbb{Z}/n)^\times$ ,  $n\lambda_i(x) = x^a$ .

On vérifie à l'aide de 4.20 qu'un  $j_\mu$  général (relatif à  $F_1$ ) se déduit d'un  $j_\mu$  comme ci-dessus (pour  $F \subset \mathbb{Q}(\sqrt[n]{1})$ ,  $F_1$  extension de  $F$ ) par restriction à  $\text{Gal}(\bar{F}/F_1)$  et multiplication par un caractère d'ordre deux.

Pour  $a \in \text{Gal}(k/\mathbb{Q}) = (\mathbb{Z}/n)^\times$ ,  $a$  transforme la famille des  $A_j$  en celle des  $aA_j$ . Si  $a \in H$ , la famille des  $A_j$  est donc préservée, et les  $j_\mu(F_p)$  sont invariant par  $H$  :

**Proposition 6.10.** *Sous les hypothèses de 6.9,  $j_\mu$  est défini par un caractère de Hecke algébrique de  $F$  à valeurs dans  $F$ .*

Faisons à nouveau  $F = \mathbb{Q}(\sqrt[n]{1})$ , et considérons les caractères de Hecke  $j[a]$  définis par une famille  $(a_i)_{i \in I}$ ,  $i \in \mathbb{Z}/n$ ,  $a_i \neq 0$ ,  $\sum a_i = 0$ . Le théorème suivant a été obtenu indépendamment par Vishik.

**Théorème 6.11.** *Tout caractère de Hecke algébrique de  $\mathbb{Q}(\sqrt[n]{1})$ , a une puissance dans le groupe engendré par les  $j[a]$  et la norme.*

Puisqu'on travaille "à torsion près," seule compte la partie algébrique des caractères de Hecke considérés. Appliquant (6.8.1) aux  $j[a]$ , avec  $a =$  un élément de  $\mathbb{Z}/n$  répété  $n$  fois, on se ramène au lemme suivant.

**Lemme 6.12.** *Notons  $\sum x_j \sigma_j$  les éléments de l'algèbre de groupe  $\mathbb{Q}[(\mathbb{Z}/n)^\times]$ , et soit  $x$  le sous-groupe de ceux tels que  $x_j + x_{-j} = C^{te}$ . Alors,  $X$  est engendré sur  $\mathbb{Q}$  par  $N = \sum \sigma_j$  et par les  $g_a = \sum \lfloor \frac{ia}{n} \rfloor \sigma_i i^{-1}$  ( $a \in \mathbb{Z}/n$ ,  $a \neq 0$ ).*

Tant  $X$  que  $Y = \langle N, (g_a) \rangle$  sont des idéaux de l'algèbre du groupe, et il suffit de vérifier qu'ils sont annulés par les mêmes caractères complexes  $\chi$  de  $(\mathbb{Z}/n)^\times$ . Ceci revient à dire qu'un caractère impair ( $\chi(j) = -\chi(-j)$ ) n'annule jamais tous les  $g_a$ . Si  $\chi$  est primitif, on a

$$\chi(g_1) = \sum \frac{i}{n} \chi^{-1}(i) = -L(\chi, 0) \neq 0.$$

Dans le cas général, si  $\chi$  provient d'un caractère primitif de  $(\mathbb{Z}/n)^\times$ ,  $\chi(g_{n/d})$  se ramène à une somme analogue sur  $(\mathbb{Z}/n)^\times$ , d'où le lemme.

## 7 Sommes de Kloosterman généralisées

### 7.1

Soient  $\mathbb{F}_q$  un corps fini à  $q$  éléments, et  $\psi$  un caractère additif non trivial. Dans ce paragraphe, nous faisons une étude cohomologique des sommes de Kloosterman généralisées

$$K_{n,a} = \sum_{x_1 \cdots x_n = a} \psi(x_1 + \cdots + x_n) \quad (n \geq 1). \quad (7.1.1)$$

Pour  $a = 0$ , cette somme est élémentaire (cf. 7.7) :

$$K_{n,0} = (-1)^{n-1}. \quad (7.1.2)$$

La cas intéressant est celui où  $a \neq 0$ . Les  $x_i$  sont alors dans  $\mathbb{F}_q^\times$ . Nous prouverons dans ce cas une majoration

$$|K_{n,a}| \leq nq^{\frac{n-1}{2}}. \quad (7.1.3)$$

Nous outils essentiels seront les énoncés cohomologiques de reflet les identités suivantes

$$K_{n,a} = \sum_{x_1} \psi(x_1) \sum_{x_2 \cdots x_n = a/x_1} \psi(x_2 + \cdots + x_n) \quad (7.1.4)$$

$$= \sum_{x \in \mathbb{F}_q^\times} \psi(x) K_{n-1, a/x} \quad (a \neq 0, n \geq 2)$$

$$\sum_a K_{n,a} = \sum_a \sum_{x_1 \cdots x_n = a} \psi\left(\sum x_i\right) = \sum_{x_1, \dots, x_n} \psi\left(\sum x_i\right) = 0 \quad (7.1.5)$$

Pour  $\chi$  un caractère non trivial de  $\mathbb{F}_q^\times$ ,

$$\sum \chi(a) K_{n,a} = \sum_{x_1, \dots, x_n} \chi \left( \prod x_i \right) \cdot \psi \left( \sum x_i \right) = (-\tau(\chi^{-1}, \psi))^n \quad (7.1.6)$$

(somme de Gauss).

## 7.2

Soient  $k$  un algèbre étale de degré  $n$  sur  $\mathbb{F}_q$ , et  $\varepsilon(k)$  comme en (4.5.1). Posons

$$K_{k,a} = \sum_{N_{k/\mathbb{F}_q}(x)=a} \psi \operatorname{Tr}(x).$$

On a encore

$$K_{k,0} = (-1)^{n-1} \cdot \varepsilon(k) \quad (7.2.1)$$

$$\sum_a K_{k,a} = 0 \quad (7.2.2)$$

$$\sum_a \chi(a) K_{k,a} = (-1)^n \tau_{\mathbb{F}_q}(\chi^{-1} \circ N_{k/\mathbb{F}_q}, \psi). \quad (7.2.3)$$

Par inversion de Fourier sur  $\mathbb{F}_q^\times$ , on en déduit une expression de  $K_{k,a}$  en terme de sommes de Gauss :

$$\begin{aligned} K_{k,a} &= \frac{1}{q-1} \sum_{\chi} \chi(a) \sum_{b \in \mathbb{F}_q^\times} \chi^{-1}(b) K_{k,b} \\ (-1)^n K_{k,a} &= \frac{1}{q-1} \left( \varepsilon(k) + \sum_{\chi \neq 1} \chi(a) \tau_{\mathbb{F}_q}(\chi \circ N_{k/\mathbb{F}_q}, \psi) \right). \end{aligned} \quad (7.2.4)$$

L'identité de Hasse-Davenport permet maintenant de comparer  $K_{k,a}$  à  $K_{n,a} = K_{\mathbb{F}_{q^n},a}$  :

$$K_{k,a} = \varepsilon(k) K_{n,a}. \quad (7.2.5)$$

Je ne connais pas d'interprétation cohomologique de (7.2.4), mais j'en donnerai une de (7.2.5). Revenons aux sommes  $K_{n,a}$ .

## 7.3

Soit  $\mathbb{F}$  un clôture algébrique de  $\mathbb{F}_q$  et, pour  $a \in \mathbb{F}$ , soit  $V_a^{n-1}$ , ou simplement  $V_a$ , l'hypersurface de  $\mathbb{A}^n$  d'équation  $x_1 \cdots x_n = a$ . Comme d'habitude, nous regarderons  $\psi$  comme étant à valeurs  $\ell$ -adiques plutôt que complexes. Avec la notation 1.8(ii), (7.1.3) se déduit du

**Théorème 7.4.** *La cohomologie de  $V_a^{n-1}$  à valeurs dans  $\mathcal{F}(\psi(\sum x_i))$  vérifie*

- (i)  $H_c^i = 0$  pour  $i \neq n-1$  ;
- (ii)  $H_c^\bullet \xrightarrow{\sim} H^\bullet$  ;
- (iii) pour  $a \neq 0$ ,  $\dim H_c^{n-1} = n$  ;
- (iv) pour  $a = 0$ ,  $H_c^{n-1}$  est canoniquement isomorphe à  $E_\lambda$ .

## 7.5

Comme d'habitude, ce théorème contrôle aussi la dépendance de  $K_{n,a}$  en  $q$  : pour chaque  $a \in \mathbb{F}_q^\times$ , il existe  $n$  valeurs propres de Frobenius  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ , de valeur absolue complexe  $q^{\frac{n-1}{2}}$ , telles que

$$\sum_{\substack{x_1 \cdots x_n = a \\ x_i \in \mathbb{F}_{q^m}}} \psi \circ \text{Tr} \left( \sum x_i \right) = (-1)^{n-1} (\alpha_1^m + \cdots + \alpha_n^m).$$

Pour  $n$  pair,  $x \mapsto -x$  est une involution de  $V_a$ , qui transforme  $\mathcal{F}(\psi)$  en son dual. Raisonnant comme en 3.6, on en déduit une forme alternée non dégénérée canonique sur  $H_c^{n-1}(V_a, \mathcal{F}(\psi))$ , à valeurs dans  $\mathbb{Q}_\ell(-(n-1))$  et le

**Corollaire 7.6.** *Avec les notations de 7.5, si  $n$  est pair, les  $\alpha_i$  se groupent en  $\frac{n}{2}$  paires de racines  $\alpha, \bar{\alpha}$  de produit égal à  $q^{n-1}$ .*

## 7.7

Vérifions le cas  $a = 0$  de 7.5. L'hypersurface  $V_0$  est la réunion des hyperplans de coordonnée  $x_i = 0$ . Calculons la suite spectrale de Leray (2.6.1\*) de ce recouvrement de  $V_0$ , pour la cohomologie avec ou sans support à coefficient dans  $\mathcal{F}(\psi)$ . D'après 2.7\*, tout les termes initiaux sont nuls, sauf la cohomologie de l'intersection  $\{0\}$  de tous les hyperplans de coordonnée. Là subsiste un isomorphisme  $H_c^0 \xrightarrow{\sim} H^0 = E_\lambda$  qui justifie 7.4.

Nous prouverons 7.4 et 7.8 ci-dessous par une récurrence simultanée sur  $n$ , et nous appuyant sur la suite spectrale dont (7.1.4) est le reflet. Ceci exige un contrôle de la dépendance en  $a$  de  $K_{n,a}$ .

Soit  $\pi : \mathbb{A}^n \rightarrow \mathbb{A}$  l'application "produit des coordonnées," et  $\sigma$  la somme des coordonnées. Les hypersurfaces  $V_a$  sont les fibres de  $\pi$ .

**Théorème 7.8.** (i) *Le faisceau  $R^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)$  est lisse de rang  $n$  sur  $\mathbb{A}^1 \setminus \{0\}$ .*

(ii) *son prolongement par 0 sur  $\mathbb{P}^1$  est l'image directe de sa restriction à  $\mathbb{A}^1 \setminus \{0\}$ .*

(iii) *en 0, la monodromie est unipotente, avec un seul bloc de Jordan*

(iv) *en  $\infty$ , l'inertie sauvage agit sans point fixe  $\neq 0$ , et le conducteur de Swan vaut 1,*

(v) *on a  $R^i\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma) \xrightarrow{\sim} R^i\pi_*\mathcal{F}(\psi\sigma)$  (nul pour  $i \neq n-1$ ).*

*Preuve.* de ce que 7.4 (pour une valeur donnée de  $n$ ) implique 7.8 (pour la même valeur de  $n$ ).

La fibre de  $R^i\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)$  en  $a$  est  $H_c^i(V_a, \mathcal{F}(\psi\sigma))$ , et sur l'ouvert dense  $\mathbb{A}^1$  où les  $R^i\pi_!\mathcal{F}(\psi^{-1}\sigma)$  sont localement constants celle de  $R^i\pi_*\mathcal{F}(\psi\sigma)$  est  $H^i(V_a, \mathcal{F}(\psi\sigma))$  (Th. Finitude 2.1). L'hypothèse 7.4(n) nous fournit donc le

**Lemme 7.9.** (i)  *$R^i\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma) = 0$  pour  $i \neq n-1$ .*

(ii) *Pour  $i = n-1$ , la fibre de ce faisceau en tout point  $a \neq 0$  est de rang constant  $n$ . En 0, elle est de rang 1.*

(iii) *Sur un ouvert dense  $U$ , on a  $R^i\pi_!\mathcal{F}(\psi) \xrightarrow{\sim} R^i\pi_*\mathcal{F}(\psi)$ .*

## 7.10

Nous allons maintenant utiliser la suite spectrale de Leray de  $\pi$ , pour la cohomologie avec ou sans support, à coefficients dans  $\mathcal{F}(\psi\sigma)$ . L'aboutissement est connu :  $H_c^\bullet(\mathbb{A}^n, \mathcal{F}(\psi\sigma)) = H^\bullet(\mathbb{A}^n, \mathcal{F}(\psi\sigma)) = 0$  (2.7\*). En cohomologie à support propre, 7.9(i) assure que  $E_2^{pq} = 0$  pour  $q \neq n-1$ . Les termes  $E_2$  sont donc tous nuls :

$$H_c^p(\mathbb{A}^1, R^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)) = 0. \quad (7.10.1)$$

Pour  $p = 0$ , ceci signifie que  $R^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)$  est sans section à support ponctuel. Vu la constance de rang 7.9(ii), on en déduit

$$\begin{aligned} &\text{Le faisceau } R^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma) \text{ sur } \mathbb{A}^1 \text{ est lisse sur } \mathbb{A}^1 \setminus \{0\}, \text{ et est} \\ &\text{un sous-faisceau de l'image directe } \mathcal{G} \text{ de sa restriction à } \mathbb{A}^1 \setminus \{0\}. \end{aligned} \quad (7.10.2)$$

La suite exacte longue de cohomologie de

$$0 \longrightarrow \mathbb{R}^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma) \longrightarrow \mathcal{G} \longrightarrow \mathcal{Q} \longrightarrow 0.$$

où le support de  $\mathcal{Q}$  est concentré en 0, donne

$$H_c^0(\mathbb{A}^1, \mathcal{G}) \longrightarrow \mathcal{Q}_0 \longrightarrow H_c^1(\mathbb{A}^1, \mathbb{R}^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)).$$

Les termes extrêmes étant nuls,  $\mathcal{Q} = 0$  et

$$\mathbb{R}^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma) \text{ est l'image directe de sa restriction à } \mathbb{A}^1 \setminus \{0\}. \quad (7.10.3)$$

Soit  $j$  l'inclusion de  $\mathbb{A}^1$  dans  $\mathbb{P}^1$ . La version "catégorie dérivée" des suites spectrales de Leray est

$$\begin{aligned} H^\bullet(\mathbb{P}^1, j_!\mathbb{R}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)) &= H_c^\bullet(\mathbb{A}^1, \mathbb{R}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)) = H_c^\bullet(\mathbb{A}^n, \mathcal{F}(\psi\sigma)) = 0 \\ H^\bullet(\mathbb{P}^1, \mathbb{R}j_*\mathbb{R}\pi_*\mathcal{F}(\psi\sigma)) &= H^\bullet(\mathbb{A}^1, \mathbb{R}\pi_*\mathcal{F}(\psi\sigma)) = H^\bullet(\mathbb{A}^n, \mathcal{F}(\psi\sigma)) = 0. \end{aligned}$$

Soit  $\Delta$  le mapping cylinder de  $j_!\mathbb{R}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma) \rightarrow \mathbb{R}j_*\mathbb{R}\pi_*\mathcal{F}(\psi\sigma)$ . D'après 7.9(iii), les faisceaux de cohomologie de ce complexe de faisceaux sont à support fini. D'autre part, la suite exacte longue de cohomologie du triangle  $(j_!\mathbb{R}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma), \mathbb{R}j_*\mathbb{R}\pi_*\mathcal{F}(\psi\sigma), \Delta)$  montre que  $H^\bullet(\mathbb{P}^1, \Delta) = 0$ . On a  $H^\bullet(\mathbb{P}^1, \Delta) = H^0(\mathbb{P}^1, \mathcal{H}^\bullet(\Delta))$ , et finalement  $\Delta = 0$  :

$$j_!\mathbb{R}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma) \xrightarrow{\sim} \mathbb{R}j_*\mathbb{R}\pi_*\mathcal{F}(\psi\sigma).$$

En particulier,  $\mathbb{R}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma) \xrightarrow{\sim} \mathbb{R}\pi_*\mathcal{F}(\psi\sigma)$  et, ces complexes de faisceaux n'ayant qu'un faisceau de cohomologie non nul,

$$j_!\mathbb{R}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma) \xrightarrow{\sim} j_*\mathbb{R}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma). \quad (7.10.4)$$

Ceci complète la preuve de (i) (ii) (v).

## 7.11

Soient  $\text{Sw}_0$  et  $\text{Sw}_\infty$  les conducteurs de Swan en 0 et en  $\infty$  de  $\mathbb{R}^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)$ . On a  $\chi_c(\mathbb{R}^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)) = 0$  (7.10.1) et la formule d'Euler-Poincaré (3.2.1) se réduit à

$$\text{Sw}_0 + \text{Sw}_\infty = 1 : \quad (7.11.1)$$

un de ces conducteurs vaut 0 (ramification modérée), l'autre vaut 1.

## 7.12

Soit  $\mathcal{G}$  un faisceau de rang 1 sur  $\mathbb{G}_m$ , de type kummérien 4.7 ( $\mathcal{G} = \mathcal{K}_n(\chi)$ ) et non constant ( $\chi \neq 1$ ). Le faisceau  $\mathcal{F}(\psi\sigma) \otimes \pi^*\mathcal{G}$  sur  $V^* = \pi^{-1}(\mathbb{G}_m) = \mathbb{A}^n \setminus \pi^{-1}(0)$  est alors du type rencontré dans l'étude des sommes de Gauss, et 4.11(ii) nous donne

$$H_c^\bullet(V^*, \pi^*\mathcal{G} \otimes \mathcal{F}(\psi\sigma)) \xrightarrow{\sim} H^\bullet(V^*, \pi^*\mathcal{G} \otimes \mathcal{F}(\psi\sigma)). \quad (7.12.1)$$

La suite spectrale de Leray de  $\pi$  transforme cet énoncé en

$$H_c^\bullet(\mathbb{G}_m, \mathcal{G} \otimes \mathbb{R}^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)) \xrightarrow{\sim} H^\bullet(\mathbb{G}_m, \mathcal{G} \otimes \mathbb{R}^{n-1}\pi_*\mathcal{F}(\psi\sigma)). \quad (7.12.2)$$

Soit  $i$  l'inclusion de  $\mathbb{G}_m$  dans  $\mathbb{P}^1$ , et  $\Delta$  le mapping cylinder de  $\delta : i_!(\mathcal{G} \otimes \mathbb{R}^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)) \rightarrow Ri_*(\mathcal{G} \otimes \mathbb{R}^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma))$  (où  $\mathbb{R}^{n-1}\pi_! = \mathbb{R}^{n-1}\pi_*$ ). Raisonnant comme en 7.10, on déduit de (7.12.2) que  $\Delta = 0$ . En particulier

$$\text{En } 0 \text{ et en } \infty, \text{ l'inertie agit sans point fixe } \neq 0 \text{ sur } \mathcal{G} \otimes \mathbb{R}^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma). \quad (7.12.3)$$

En  $\infty$ , ceci vaut même si  $\mathcal{G}$  est trivial (7.10.4), de sorte que l'inertie sauvage agit sans point fixe. En particulier, la ramification est sauvage : d'après 7.11, on a  $\text{Sw}_\infty = 1$ , et la ramification en 0 est modérée.

En 0, (7.12.3) impose à la ramification – modérée – de  $\mathbb{R}^{n-1}\pi_!\mathcal{F}(\psi\sigma)$  être unipotente. D'après (7.10.3) et 7.9(ii), on a seul bloc de Jordan. Ceci achève la preuve de 7.8(n).

### 7.13

Pour  $n = 1$ , 7.4 est trivial. Pour achever la preuve de 7.4 et 7.8, il nous reste à prouver que 7.8, pour une valeur donnée de  $n$ , implique 7.4, pour  $n + 1$ . Le cas  $a = 0$  ayant été traité (7.7), on suppose que  $a \neq 0$ . On écrira  $x_0, \dots, x_n$  pour les coordonnées de  $\mathbb{A}^{n+1}$ . Soient  $g = x_0 : V_a \rightarrow \mathbb{G}_m$ ,  $\tau$  l'involution  $x \mapsto ax^{-1}$  de  $\mathbb{G}_m$ , et soit comme plus haut  $\pi$  le produit des coordonnées :  $\mathbb{A}^{n+1} \rightarrow \mathbb{A}^1$ , et  $\sigma$  leur somme. On notera  $\mathcal{F}(\psi\sigma)$  le faisceau  $\mathcal{F}(\psi(\sum x_i))$  tant sur  $\mathbb{A}^{n+1}$  que sur  $\mathbb{A}^n$ .

### 7.14

Écrivons la suite spectrale de Leray de  $g$ . Le faisceau  $\mathcal{F}(\psi\sigma)$  sur  $\mathbb{A}^{n+1}$  étant produit tensoriel externe des faisceaux  $\mathcal{F}(\psi)$  sur  $\mathbb{A}^1$  et  $\mathcal{F}(\psi\sigma)$  sur  $\mathbb{A}^n$ , on trouve (cf. (7.1.4)).

$$\begin{aligned} {}'E_2^{pq} &= H_c^p(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\psi) \otimes \tau^* R^q \pi_! \mathcal{F}(\psi\sigma)) \Rightarrow H_c^{p+q}(V_a, \mathcal{F}(\psi\sigma)) \\ {}''E_2^{pq} &= H^p(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\psi) \otimes \tau^* R^q \pi_* \mathcal{F}(\psi\sigma)) \Rightarrow H^{p+q}(V_a, \mathcal{F}(\psi\sigma)). \end{aligned}$$

Par hypothèse,  $R^q \pi_! \mathcal{F}(\psi\sigma) \xrightarrow{\sim} R^q \pi_* \mathcal{F}(\psi\sigma)$ , et ce faisceau est nul pour  $q \neq n - 1$ . Le faisceau  $\mathcal{F}(\psi)$  sur  $\mathbb{G}_m$  est sauvagement ramifié en  $\infty$  et non ramifié en 0, tandis que  $\tau^* R^q \pi_! \mathcal{F}(\psi\sigma)$  est sauvagement ramifié en 0 (sans invariant sous l'inertie sauvage, de conducteur de Swan 1) et modérément ramifié en  $\infty$ . Leur produit tensoriel est donc

- a) sauvagement ramifié en 0 et  $\infty$ , sans invariant sous l'inertie sauvage ;
- b) de conducteur de Swan 1 en 0 et  $n$  (le rang de  $R^q \pi_! \mathcal{F}(\psi)$ ) en  $\infty$ .

On a  $'E_2^{pq} \xrightarrow{\sim} {}''E_2^{pq}$ , et  $'E_2^{pq} = 0$  sauf pour  $p = 1$  et  $q = n - 1$ . La formule d'Euler-Poincaré donne enfin

$$\dim {}'E_2^{pq} = 1 + n ;$$

ceci achève la démonstration. □

### 7.15 Remarque

L'isomorphisme obtenu en 7.14

$$H_c^n(V_a^n, \mathcal{F}(\psi\sigma)) = H_c^1(\mathbb{G}_m, \mathcal{F}(\psi) \otimes \tau^* R^{n-1} \pi_! \mathcal{F}(\psi\sigma)) \quad (7.15.1)$$

permet, avec les notations de 7.5, de calculer le produit  $\det(F)$  des valeurs propres  $\alpha_i$  de Frobenius. Le formalisme de [Del73] s'applique, puisque  $\mathcal{F}(\psi)$  et  $R^{n-1} \pi_! \mathcal{F}(\psi\sigma)$  appartiennent à des systèmes compatibles infinis de représentations  $\ell$ -adiques. Ceci nous ramène à des problèmes locaux, qu'on peut simplifier en notant que (cf. [Del73, 9.5])

- a) les constantes globales pour  $\mathcal{F}(\psi)$  et  $\tau^* R^{n-1} \pi_! \mathcal{F}(\psi\sigma)$  sont aisées à calculer, la cohomologie de ces faisceaux étant de nature triviale.
- b) en tout point, pour l'un ou l'autre de ces faisceaux, la représentation  $\ell$ -adique correspondante du groupe de décomposition a une semi-simplifiée non ramifiée.

La résultat, pour la somme à  $n$  variables, est que

$$\det(F, H_c^{n-1}(V_a^{n-1}, \mathcal{F}(\psi))) = q^{\frac{n(n-1)}{2}}. \quad (7.15.2)$$

### 7.16 Remarque

Pour  $p = 2$ , le faisceau  $(\psi)$  est orthogonal. Pour  $a \neq 0$  et  $n$  impair, on en déduit par 7.4(ii) et dualité de Poincaré une forme bilinéaire symétrique sur  $H_c^{n-1}(V_a^{n-1}, \mathcal{F}(\psi))$ , à valeurs dans  $\mathbb{Q}_\ell(1 - n)$ . Relativement à cette forme,  $F$  est une similitude orthogonale de multiplicateur  $q^{n-1}$ , et  $q^{\frac{1-n}{2}} F$  appartient au groupe spécial orthogonal, d'après (7.15.2). Une des valeurs propres de  $F$  est donc  $q^{\frac{1-n}{2}}$ , et les autres se rangent par paires de racines  $\alpha, \bar{\alpha}$  de produit  $q^{n-1}$ .

Pour  $n = 3$ , L. Carlitz [Car69] a obtenu un résultat plus précis, équivalent à la proposition suivante.

**Proposition 7.17.** *Pour  $p = 2$ , et  $\psi(x) = (-1)^{\text{Tr}_{\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_q}(x)}$ , on a un isomorphisme*

$$H_c^2(V_a^2, \mathcal{F}(\psi\sigma)) = \text{Sym}^2 H_c^1(V_a^1, \mathcal{F}(\psi\sigma)).$$

La puissance tensorielle seconde de  $H_c^1(V_a^1, \mathcal{F}(\psi\sigma))$  est  $H_c^1(V_a^1 \times V_a^1, \mathcal{F}(\psi\sigma) \boxtimes \mathcal{F}(\psi\sigma))$  (Künneth), la symétrie  $x \otimes y \mapsto y \otimes x$  se représentant géométriquement comme  $-\tau^*$ , où  $\tau$  est l'automorphisme  $(x, y) \mapsto (y, x)$  de  $V_a \times V_a$ . Si  $X'$  est le quotient de  $V_a^1 \times V_a^1$  par  $\{\text{id}, \tau\}$  et  $\pi$  est la projection de  $V_a^1 \times V_a^1$  sur  $X'$ , le groupe  $\text{Sym}^2 H_c^1(V_a^1, \mathcal{F}(\psi\sigma))$  s'identifie donc à la cohomologie de  $X'$  à coefficient dans la partie antiinvariante par  $\tau$  de  $\pi_*(\mathcal{F}(\psi\sigma) \boxtimes \mathcal{F}(\psi\sigma))$ . Notons  $s$  la fonction sur  $X'$  telle que  $s\pi = \sigma\text{pr}_1 + \sigma\text{pr}_2$ . On a  $\mathcal{F}(\psi\sigma) \boxtimes \mathcal{F}(\psi\sigma) = \mathcal{F}(\psi(\sigma\text{pr}_1 + \sigma\text{pr}_2)) = \mathcal{F}(\psi s\pi) = \pi^* \mathcal{F}(\psi s)$  (isomorphisme compatible à  $\tau$ ). Sur l'image  $\pi(\Delta)$  de la diagonale, le faisceau d'antiinvariants cherchés est donc nul, tandis que sur le complément  $X = X' \setminus \pi(\Delta)$ , c'est le produit tensoriel de  $\mathcal{F}(\psi s)$  par  $\varepsilon(P)$ , pour  $\varepsilon$  l'unique caractère d'ordre 2 de  $\{1, \tau\}$ , et  $P$  le  $\{1, \tau\}$ -torseur sur  $X$  qu'est le revêtement double induit par  $V_a^1 \times V_a^1$ . On a

$$\text{Sym}^2 H_c^1(V_a^1, \mathcal{F}(\psi\sigma)) = H_c^2(X, \mathcal{F}(\psi\sigma) \otimes \varepsilon(P)). \quad (7.17.1)$$

Calculons  $X$ ,  $s$  et  $\varepsilon(P)$ . Sur  $V_a^1 \times V_a^1$ , posons  $x_1 = x_1 \circ \text{pr}_1$ ,  $x_2 = x_2 \circ \text{pr}_2$ ,  $x'_1 = x_1 \circ \text{pr}_2$ ,  $x'_2 = x_2 \circ \text{pr}_1$ . On a  $x_1 x_2 = x'_1 x'_2 = a$ . Identifions fonctions sur  $X'$  et fonctions sur  $X$  invariante par  $\tau$ . Soient  $s_1 = x_1 + x'_1$ ,  $s_2 = x_2 + x'_2$ ,  $p_1 = x_1 x'_1$ ,  $p_2 = x_2 x'_2$ . On a  $s_1 p_2 = a s_2$ ,  $s_2 p_1 = a s_1$  et  $X$  est défini dans  $X'$  par  $s_1 \neq 0$ ,  $s_2 \neq 0$ . Sur  $X$ , on a donc  $p_1 = a s_1 s_2^{-1}$ , et  $(s_1, s_2)$  identifie  $x$  à  $\mathbb{G}_m \times \mathbb{G}_m$ . Sur  $X$ , le revêtement  $P$  admet pour équation  $T^2 - s_1 T + a s_1 s_2^{-1}$  (prendre pour  $T$  la coordonnée  $x_1$ ). Si  $T = s_1 t$ , cela se réécrit  $t^2 - t + a s_1^{-1} s_2^{-1}$ . On a donc  $\varepsilon(P) = \mathcal{F}(\psi(a s_1^{-1} s_2^{-1}))$ . Puisque  $s = s_1 + s_2 - 2$ , on a  $\mathcal{F}(\psi s) \otimes \varepsilon(P) = \mathcal{F}(\psi(s_1 + s_2 + a s_1^{-1} s_2^{-1}))$  et le second membre de (7.17.1) s'identifie au premier membre de 7.17.

**Remarque**  $H_c^1(V_a^1, \mathcal{F}(\psi\sigma))$  est aussi le premier groupe de cohomologie de la courbe elliptique complétée de la courbe affine d'équation

$$\begin{aligned} y^2 - y &= x_1 + x_2 \\ x_1 x_2 &= a; \end{aligned}$$

son invariant modulaire est  $j = a^{-2}$ .

## 7.18 Remarque

Pour  $\chi$  un caractère multiplicatif de  $\mathbb{F}_q^\times$ , et  $a \neq 0$ , la méthode de 7.14 s'applique à l'étude de la somme

$$s = \sum_{x_0 \cdots x_n = a} \chi(x_0) \psi(x_0 + \cdots + x_n)$$

(remplacer le faisceau  $\mathcal{F}(\psi)$  sur  $\mathbb{G}_m$  par  $\mathcal{F}(\chi \cdot \psi)$ ). On trouve encore une cohomologie de dimension  $n + 1$ , et  $|S| \leq (n + 1)q^{n/2}$ . De telles sommes ont été considérées par Salie et Mordell [Mor73].

On peut espérer que nos méthodes permettent d'étudier les sommes

$$S_{k, \chi, a} = \sum_{N(x)=a} \chi(x) \psi \text{Tr}(x)$$

( $k$  algèbre étale sur  $\mathbb{F}_q$ ,  $a \in \mathbb{F}_q^\times$ ,  $\chi$  caractère de  $k^\times$ ). L'analogie de 7.4 (pour  $a \neq 0$ ) devrait être vrai.

## 7.19

Le groupe symétrique  $S_n$  agit sur  $\mathbb{A}^n$  en respectant  $V_a$  et l'application  $\sigma$ , donc aussi le faisceau  $(\psi\sigma)$ , image réciproque par  $\sigma$  du faisceau  $(\psi)$  sur  $\mathbb{G}_a$ . Il s'agit donc sur  $H_c^{n-1}(V_a, \mathcal{F}(\psi\sigma))$ . La formule (7.2.5) admet l'interprétation cohomologique suivante

**Proposition 7.20.** *L'action de  $S_n$  sur  $H_c^{n-1}(V_a, \mathcal{F}(\psi\sigma))$  est la multiplication par le caractère signe.*

Ceci revient à montrer qu'une transposition  $\tau$  agit par multiplication par  $-1$ . Puisque  $\tau^2 = 1$ ,  $\tau$  ne peut avoir pour valeur propres que  $\pm 1$ . Soit  $V_a/\tau$  le quotient de  $V_a$  pour  $\{\text{id}, \tau\}$ . L'application  $\sigma$ , donc le faisceau  $(\psi\sigma)$ , passent au quotient, et le sous-espace de  $H_c^{n-1}(V_a, \mathcal{F}(\psi))$  fixe par  $\tau$  est  $H_c^{n-1}(V_a/\tau, \mathcal{F}(\psi\sigma))$ . Il nous faut prouver que cette cohomologie est nulle.

Supposons que  $a \neq 0$ . Pour  $\tau = (1, 2)$  le quotient  $V_a/\tau$  s'identifie à  $\mathbb{G}_a \times \mathbb{G}_m^{n-2}$ , avec pour application de passage au quotient  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \mapsto (x_1 + x_2, x_3, \dots, x_n)$ . En effet,  $x_1$  et  $x_2$  sont déterminés à l'ordre près par  $x_1 + x_2$  et  $x_1 x_2 = a/x_3 \cdots x_n$ . En ces coordonnées  $(t, x_3, \dots, x_n)$ , le faisceau s'écrit  $\mathcal{F}(\psi(t + x_3 + \cdots + x_n)) = \mathcal{F}(\psi(t)) \otimes \mathcal{F}(\psi(x_3 + \cdots + x_n))$ . La formule de Künneth, et  $H_0^*(\mathbb{G}_a, \mathcal{F}(\psi)) = 0$ , fournissent donc la nullité demandée.

Pour  $a = 0$ , on peut déduire 7.20 de calcul 7.7.

## 7.21

Les sommes  $K_{n,a}$  de ce paragraphe ont été étudiées par S. Sperber, dans sa thèse, et dans [Spe77] par des méthodes  $p$ -adiques inspirées de Dwork et de l'article de Bombieri [Bom66]. Pour  $p \neq 2$ , ces méthodes lui donnent la dépendance en  $q$  7.5, l'équation fonctionnelle  $\alpha_i = q^{n-1} \beta_i^{-1}$  entre les valeurs propres de Frobenius pour les sommes  $K_{n,a}$  et  $K_{n,b}$  si  $b = (-1)^n a$  (cf. 7.6), et la valeur 7.15 du produit des racines. Pour  $p \geq n+3$ , il détermine de plus les valuations  $p$ -adiques des racines. Le résultat est très beau : si on range les racines  $\alpha_i$  dans un ordre convenable, avec  $0 \leq i \leq n$ , les  $\alpha_i q^{-i}$  sont des unités. Les restrictions sur  $p$  ne sont sans doute pas essentielles.

## 8 Autres applications

### 8.1

L'identité 1.9.4 peut parfois être utilisée pour calculer le nombre de points rationnels d'une variété algébrique sur  $\mathbb{F}_q$ . Dans la plupart des cas où un résultat exact a été obtenu, la cohomologie s'exprime en terme de cycles algébriques ; tel est le cas pour les surfaces rationnelles, les quadriques, les intersections lisses de deux quadriques de dimension impaire, les variétés de drapeaux. ... Ce n'est toutefois pas toujours le cas ; dans le très bel article de Lusztig : [Lus77], les cycles algébriques n'apparaissent pas.

### 8.2

Pour les groupes réductifs, la cohomologie peut se calculer en se relevant en caractéristique 0 : si  $B$  est un sous-groupe de Borel de  $G$ ,  $G$  est un  $B$ -torseur sur  $G/B$  ; la cohomologie de la variété projective et lisse  $G/B$  est invariant pour spécialisation, et on utilise la suite spectrale de Leray de  $G \rightarrow G/B$  pour prouver le même résultat pour  $G$ . Elle s'exprime commodément en terme du tore maximal  $T$  de  $G$  et de l'action du groupe de Weil  $W$  sur  $T$  (pour la définition du tore maximal, cf. [Bou05, VIII §2 Rem.2] ou [DL76, p.105]). C'est l'algèbre extérieure de sa partie primitive, qui coïncide à un décalage près avec le quotient  $I(H^\bullet(BG, \mathbb{Q}_\ell))$  de la cohomologie de  $BG$  formé des "éléments indécomposables," et  $H^\bullet(BG, \mathbb{Q}_\ell) = H^\bullet(BT, \mathbb{Q}_\ell)^W$ . Si  $X$  est le groupe des caractères de  $T$ , on a au total

$$H^\bullet(G, \mathbb{Q}_\ell) = \bigwedge (I(\text{Sym}^\bullet(X \otimes \mathbb{Q}_\ell(-1))^W) [-1]).$$

Si  $G$  est défini sur un corps fini  $\mathbb{F}_q$ ,  $\text{Gal}(\mathbb{F}/\mathbb{F}_q)$  agit sur  $X$  et cet isomorphisme est compatible à Galois. Passant de là à la cohomologie à supports propres, on trouve les formules classiques pour la nombre de points rationnels de  $G$ . Si  $F^* : X \rightarrow X$  est défini par le morphisme de Frobenius  $F : T \rightarrow T$ , et que  $\deg_G(F)$  est le degré  $q^{\dim G}$  de  $F : G \rightarrow G$ , on a

$$|G_0(\mathbb{F}_q)| = \deg_G(F) \cdot \det \left( 1 - F^{*-1}, I(\text{Sym}^\bullet(X \otimes \mathbb{Q})^W) \right). \quad (8.2.1)$$

La même formule vaut pour les groupes de Ree et de Suzuki ; ces groupes sont de la forme  $G^F$  ( $G$  réductif,  $F^2$  un Frobenius), et il suffit de vérifier que la formule des traces de Lefschetz est vraie pour  $F$  agissant sur  $G$ . Si  $B$  est un sous-groupe de Borel stable par  $F$ , on le vérifie directement pour  $F$  agissant sur  $B$ , et pour l'action sur  $G/B$ , propre et lisse, on peut invoquer les théorèmes généraux.

### 8.3

La formule des traces a été utilisée par Deligne-Lusztig [DL76], Kazhdan [Kaz77] et Springer [Spr76] dans l'étude des représentations complexes des groupes finis  $G_0(\mathbb{F}_q)$ , pour  $G_0$  réductif sur  $\mathbb{F}_q$ . Les travaux de Kazhdan et Springer contiennent des exemples admirables de comment la formule des traces permet le “prolongement analytique” d’une situation déployée à une situation non déployée (cf. 1.13).



# Chapitre 7

## Théorèmes de finitude en cohomologie $\ell$ -adique

### 1 Énoncé des théorèmes

Dans tout cet exposé,  $S$  sera un schéma noethérien et  $A$  un anneau noethérien à gauche, de torsion annulée par un entier inversible sur  $S$ . Notre résultat principal est le suivant.

**Théorème 1.1.** *On suppose  $S$  régulier de dimension 0 ou 1. Soient  $f : X \rightarrow Y$  un morphisme de  $S$ -schémas de type fini et  $\mathcal{F}$  un faisceau constructible de  $A$ -modules à gauche sur  $X$ . Alors, les faisceaux  $R^i f_* \mathcal{F}$  sont constructibles.*

La preuve sera donnée au paragraphe 2 et en 3.10.

#### 1.2 Remarque

En caractéristique 0, ce résultat est moins général que [AGV72, XIX paragraphe 5], qui prouve la conclusion du théorème pour tout morphisme de type fini de schémas excellents de caractéristique 0. La démonstration de [AGV72, XIX] utilise d’une part la résolution des singularités, d’autre part que les schémas soient d’égale caractéristique (pour pouvoir déduire de la résolution le “théorème de pureté”).

#### 1.3 Remarque

Nous dirons qu’un complexe  $K \in \text{Ob } D(X, A)$  est *constructible* si ses faisceaux de cohomologie sont constructibles et nous noterons avec un indice  $c$  la sous-catégorie de  $D(X, A)$  (ou  $D^+$ ,  $D^-$ ,  $D^b$ ) formée des complexes constructibles. Dans le langage des catégories dérivées, que nous utiliserons librement, 1.1 dit que  $Rf_* : D^+(X, A) \rightarrow D^+(Y, A)$  envoie  $D_c^+$  dans  $D_c^+$ . Explicitons :

- a) Pour  $K$  réduit à un faisceau  $\mathcal{F}$  en degré 0, on a  $\mathcal{H}^i Rf_* K = R^i f_* \mathcal{F}$  ; l’énoncé dérivé implique donc le théorème.
- b) Dans l’autre sens, on invoque la suite spectrale

$$E_1^{pq} = R^q f_* \mathcal{H}^p(K) \Rightarrow \mathcal{H}^{p+q} Rf_* K.$$

Parler le langage des catégories dérivées à l’avantage de remplacer par une simple formule de transitivité  $R(fg)_* = Rf_* Rg_*$  une suite spectrale de Leray  $E_2^{pq} = R^p f_* R^q g_* \Rightarrow R^{p+q}(fg)_*$ .

Sous les hypothèses de 1.1, il résulte de [AGV72] que  $Rf_*$  est de dimension cohomologique finie. Cela permet ci-dessus de remplacer  $D^+$  par  $D$ ,  $D^-$  ou  $D^b$ .

### 1.4 Les idées de la démonstration

- a) La dualité de Poincaré permet de traiter le cas où  $X$  est lisse,  $\mathcal{F}$  localement constant, et  $Y = S$ . L'hypothèse de dimension apparaît par calculer des  $R\mathcal{H}om$  sur  $S$ .
- b) On factorise  $f$  en  $gj : g$  propre et  $j$  plongement ouvert. On a  $Rf_* = Rg_*Rj_*$  et le théorème de finitude pour les morphismes propres contrôle  $Rg_*$ . Dévissant, on se ramène à supposer  $x$  lisse,  $\mathcal{F}$  localement constant,  $f$  un plongement ouvert et  $Y$  propre sur  $S$ .
- c) Une récurrence sur  $\dim X$  (avec changement de  $S$ ) permet, grosso modo, de supposer le théorème vrai en dehors d'une partie de  $Y$  finie sur  $S$ . Notant  $a : X \rightarrow S$  et  $b : Y \rightarrow S$  les morphismes structuraux, on montre alors que si le théorème était faux pour  $\mathcal{F}$  et  $Rf_*$ , il le serait aussi pour  $\mathcal{F}$  et  $Rb_*Rf_* = Ra_*$  : contradiction.

**Corollaire 1.5.** *Sous les hypothèses du théorème, les catégories  $D_c(X, A)$  et  $D_c(Y, A)$  sont transformées l'une en l'autre par les 4 opérations  $Rf_*$ ,  $Rf_!$ ,  $f^*$ ,  $Rf^!$ .*

$Rf_*$  est traité ci-dessus,  $Rf_!$  en [AGV72, XVII 5.3],  $f^*$  est clair. Reste  $Rf^!$ . Le problème est local, ce qui permet de supposer que  $f$  se factorise en  $X \xrightarrow{i} Z \xrightarrow{g} Y$  ( $i$  plongement fermé et  $g$  lisse, purement de dimension relatif  $n$ ). La dualité de Poincaré  $Rg_!K(n)[2n]$  et la transitivité  $Rf^! = Ri^!Rg^!$  nous ramènent à prouver 1.5 pour  $i$ . Pour tout  $L \in D(Z, A)$ , si  $j$  est l'inclusion dans  $Z$  de  $U = Z \setminus X$ ,  $i_*Ri^!L$  est le mapping cylinder de  $K \rightarrow Rj_*j^*K$  et 1.5 pour  $i$  résulte de 1.1 pour  $j$ .

**Corollaire 1.6.** *Soit  $X$  comme dans le théorème, et supposons  $A$  commutatif. Alors, si  $\mathcal{F}$  et  $\mathcal{G}$  sont des faisceaux constructibles de  $A$ -modules sur  $X$ , les  $\mathcal{E}xt_A^i(\mathcal{F}, \mathcal{G})$  sont constructibles :  $R\mathcal{H}om$  envoie  $D_c^-(X, A) \times D_c^+(X, A)$  dans  $D_c^+(X, A)$ .*

Par dévissage de  $\mathcal{F}$ , on se ramène à supposer  $\mathcal{F}$  de la forme  $j_!\mathcal{F}_1$  ( $j : Y \hookrightarrow X$ ) un plongement localement fermé et  $\mathcal{F}_1$  localement constant sur  $Y$ ). On a alors

$$R\mathcal{H}om(j_!\mathcal{F}_1, \mathcal{G}) = Rj_*\mathcal{H}om(\mathcal{F}_1, Rj^!\mathcal{G}) :$$

d'après 1.3, nous sommes ramenés au cas où  $\mathcal{F}$  est localement constant – voire constant puisque le problème est local. Pour  $\mathcal{F}$  localement constant constructible, on a  $\mathcal{H}om(\mathcal{F}, \mathcal{G})_x = \text{hom}(\mathcal{F}_x, \mathcal{G}_x)$ , et de même pour  $R\mathcal{H}om$ . Pour  $\mathcal{F}$  constant, on peut donc calculer les  $\mathcal{E}xt_A^i$  à l'aide d'une résolution projective de type fini de sa valeur constante, et les  $\mathcal{E}xt_A^i$  sont constructibles si  $\mathcal{G}$  l'est – d'où le corollaire.

### 1.7 Remarque

Puisque  $Rf_*$  est de dimension cohomologique finie, il transforme complexes de tor-dimension finie (resp.  $\leq d$ ) en complexes de tor-dimension finie (resp.  $\leq d$ ) [AGV72, XVII 5.2.11]. [AGV72, XVII 5.2.10] et la preuve de 1.5 montrent alors que la tor-dimension finie est stable par les 4 opérations  $Rf_*$ ,  $Rf_!$ ,  $f^*$ ,  $Rf^!$ . Une variante de celle de 1.6 (dévisser  $K$  selon une partition de  $x$  pour supposer les faisceaux de cohomologie localement constants, puis se localiser pour remplacer  $K$  par un complexe fini de faisceaux localement libres de type fini) montre alors que, pour  $A$  commutatif,  $R\mathcal{H}om$  induit

$$R\mathcal{H}om : D_{\text{ctf}}^b(X, A) \times D_{\text{tf}}^b(X, A) \rightarrow D_{\text{tf}}^+(X, A)$$

(t.f. : tor-dimension finie).

### 1.8

Sous les hypothèses du théorème, la même méthode nous permet de prouver un théorème de bidualité locale  $K \xrightarrow{\sim} DDK$  (paragraphe 4). Nous prouvons aussi un théorème de finitude pour les faisceaux de cycles évanescents. Pour  $S$  quelconque, on obtient encore un théorème “générique” :

**Théorème 1.9.** *Soit  $f : X \rightarrow Y$  un morphisme de  $S$ -schémas de type fini et  $\mathcal{F}$  un faisceau constructible de  $A$ -modules sur  $X$ . Il existe un ouvert dense  $U$  de  $S$  tel que*

- (i) *Au-dessus de  $U$ , les  $R^if_*\mathcal{F}$  sont constructibles, et nuls sauf un nombre fini d'entre eux.*

(ii) La formation des  $R^i f_* \mathcal{F}$  est compatible à tout changement de base  $S' \rightarrow U \subset S$ .

Pour  $S$  le spectre d'un corps, on a  $U = S$ .

Si  $S$  est le spectre d'un corps, un argument de passage à la limite fournit la compatibilité aux  $S$ -changements de base des  $R^i f_*$  pour tout morphisme quasi-compact quasi-séparé de  $S$ -schémas et tout faisceau  $\mathcal{F}$ .

**Corollaire 1.10.** Soient  $x$  un schéma de type fini sur  $k$  séparablement clos et  $\mathcal{F}$  un faisceau constructible de  $A$ -modules. Alors, les  $H^i(X, \mathcal{F})$  sont de type fini.

C'est le cas particulier  $S = \text{Spec}(k)$ ,  $Y = S$ .

**Corollaire 1.11.** Soient  $X$  et  $Y$  deux schémas de type fini sur  $k$  séparablement clos et  $K \in \text{Ob } D^-(X, A^\circ)$ ,  $L \in \text{Ob } D^-(Y, A)$  des complexes de faisceaux de modules à droite et à gauche. La flèche de Künneth

$$R\Gamma(X, K) \otimes^L R\Gamma(Y, L) \rightarrow R\Gamma(X \times Y, \text{pr}_1^* K \otimes^L \text{pr}_2^* L)$$

est un isomorphisme.

On procède comme en [AGV72, XVII 5.4.3] :

$$\begin{array}{ccc} X \times Y & \xrightarrow{\text{pr}_1} & X \\ \downarrow \text{pr}_2 & & \downarrow a \\ Y & \xrightarrow{b} & \text{Spec}(k) \end{array}$$

changeant de base par  $b$ , on trouve que  $R\text{pr}_{2,*} \text{pr}_1^* K$  est  $b^* R\Gamma(X, K)$ . On a alors (cf. [AGV72, XVII 5.2.11] et preuve)

$$\begin{aligned} R\Gamma(X \times Y, \text{pr}_1^* K \otimes^L \text{pr}_2^* L) &= R\Gamma(Y, R\text{pr}_{2,*}(\text{pr}_1^* K \otimes^L \text{pr}_2^* L)) \\ &= R\Gamma(Y, (R\text{pr}_{2,*} \text{pr}_1^* K) \otimes^L L) \\ &= R\Gamma(Y, b^* R\Gamma(X, K) \otimes^L L) \\ &= R\Gamma(X, K) \otimes^L R\Gamma(Y, L) \end{aligned}$$

## 1.12

Enfin, comme contre-partie locale de 1.9(ii), nous prouverons un théorème d'acyclicité locale générique (2.13).

## 2 Théorèmes génériques

Dans ce paragraphe, nous prouvons 1.9 et le théorème d'acyclicité locale générique 2.13. Pour prouver 1.9, on se ramène aussitôt à supposer  $S$  intègre. Soit  $\eta$  son point générique.

### 2.1

Nous commencerons par prouver 1.9 sous les hypothèses additionnelles suivantes :  $X$  est lisse sur  $S$ , purement de dimension relative  $n$ ,  $A = \mathbb{Z}/m$ ,  $\mathcal{F}$  est localement constant et  $Y = S$ . Soit  $\mathcal{F}' = \mathcal{H}om(\mathcal{F}, \mathbb{Z}/m)$ . Nous allons montrer que si les  $R^i f_! \mathcal{F}'$  sont localement constants, les conclusions de 1.9 valent pour  $U = S$ . Rappelons que si  $\mathcal{L}$  est un faisceau localement constant constructible, les  $\mathcal{E}xt^i(\mathcal{L}, \mathcal{G})$  se calculent fibre par fibre, et sont constructibles si  $\mathcal{G}$  l'est. Rappelons aussi que  $\mathbb{Z}/m$  est un  $\mathbb{Z}/m$ -module injectif, et est le module dualisant, de sorte que  $\mathcal{F} = R\mathcal{H}om(\mathcal{F}', \mathbb{Z}/m)$ . La dualité de Poincaré

$$Rf_* R\mathcal{H}om(K, Rf^! L) = R\mathcal{H}om(Rf_! K, L),$$

pour  $K = \mathcal{F}'$ ,  $L = \mathbb{Z}/m$ ,  $Rf^!L = \mathbb{Z}/m[2n](n)$ , fournit donc

$$R^{2n-i}f_*\mathcal{F} = \mathcal{H}om(R^if_!\mathcal{F}', \mathbb{Z}/m)(-n).$$

Le faisceau au second membre est localement constant, de formation compatible à tout changement de base – d'où l'assertion.

## 2.2

Prouvons 1.9 sous les hypothèses additionnelles :  $X$  est lisse sur  $S$ ,  $\mathcal{F}$  est localement constant et  $Y = S$ .

- a) Décomposant  $X$  en composantes connexes, on se ramène à supposer qu'il est purement d'une dimension relative  $n$  sur  $S$ .
- b) Décomposant  $A$  en produit, on se ramène à supposer que  $\ell^m A = 0$ , avec  $\ell$  premier inversible sur  $S$  ; on filtre alors  $\mathcal{F}$  par les  $\ell^k \mathcal{F}$  pour se ramener, par la suite spectrale correspondante, au cas où  $\ell \mathcal{F} = 0$ . On peut alors remplacer  $A$  par  $A/\ell A$  et supposer que  $\ell A = 0$ .
- c) Remplaçant  $S$  par  $U$  convenable, on peut supposer qu'il existe un revêtement galoisien fini étale  $X_1/X$ , de groupe de Galois  $G$ , telle que l'image réciproque  $\mathcal{F}_1$  de  $\mathcal{F}$  sur  $X_1$  soit un faisceau constant, de valeur constante  $F$ . Notant  $f_1$  la projection de  $X_1$  sur  $S$ , on a alors

$$R^if_{1*}\mathcal{F}_1 = (R^if_{1*}\mathbb{Z}/\ell) \otimes_{\mathbb{Z}/\ell} F.$$

On dispose aussi de la suite spectrale de Hochschild-Serre (ou : de Leray pour le recouvrement  $X_1/X$ )

$$\underline{H}^p(G, R^q f_{1*}\mathcal{F}_1) \Rightarrow R^{p+q}f_*\mathcal{F}.$$

D'après 2.1, on peut supposer, quitte à rétrécir  $U$ , que les  $R^if_{1*}\mathbb{Z}/\ell$  sont localement constants, de formation compatible à tout changement de base. La même propriété vaut alors pour les  $R^if_*\mathcal{F}$ . Enfin, si  $\bar{\eta}$  est un point géométrique localisé au point générique  $\eta$  de  $S$ , les  $R^if_*\mathcal{F}$  sont presque tous nuls, car les  $(R^if_*\mathcal{F})_{\bar{\eta}} = H^i(X_{\bar{\eta}}, \mathcal{F})$  le sont.

## 2.3

Prouvons par récurrence sur  $n$  que

Les conclusions de 1.9 sont vraies lorsque  $\dim X_{\eta} \leq n$   
et que  $f$  est un plongement ouvert d'image dense. (\*<sub>n</sub>)

Pour  $n = 0$ , quitte à rétrécir  $S$ , on a  $X = Y$  : (\*<sub>0</sub>) est évident. Supposons (\*<sub>n-1</sub>), et prouvons (\*<sub>n</sub>). Dans (\*<sub>n-1</sub>), on peut remplacer “plongement ouvert” par “plongement” comme on le voit en factorisant en plongement ouvert et plongement fermé.

**Lemme 2.4.** *Quitte à rétrécir  $S$ , les conclusions de 1.9 valent au-dessus de  $Y' \subset Y$ , le complément  $Y_1$  de  $Y'$  étant fini sur  $S$ .*

L'assertion est locale sur  $Y$ , qu'on peut supposer affine :  $Y \subset \mathbb{A}_S^n$ . L'hypothèse de récurrence (\*<sub>n-1</sub>) s'applique à

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ & \searrow & \downarrow \text{pr}_i \\ & & \mathbb{A}_S^1 \end{array}$$

Il existe donc pour chaque  $i$  ouvert dense  $U_i$  de  $\mathbb{A}_S^1$  tel que les conclusions de 1.9 valent au-dessus de  $\text{pr}_i^{-1}(U_i)$  ; elle valent au-dessus de la réunion des  $\text{pr}_i^{-1}(U_i)$ , et 2.4 en résulte.

## 2.6

Prouvons  $(*_n)$  pour  $X$  lisse sur  $S$  et  $\mathcal{F}$  localement constant sur  $X$ . Le problème étant local sur  $Y$ , on peut supposer  $Y$  affine, puis projectif (remplacer  $Y$  par son adhérence dans un espace projectif). Soient  $i : Y_1 \hookrightarrow Y$  et  $j : Y' \rightarrow Y$  garantis par 2.4.

$$\begin{array}{ccccc} X & \hookrightarrow & Y & \xleftarrow{i} & Y_1 \\ & \searrow a & \downarrow b & \swarrow b_1 & \\ & & S & & \end{array}$$

quitte à rétrécir  $S$ , on sait que  $j^*Rf_*\mathcal{F}$  est constructible, de formation compatible à tout changement de base en  $S$ ; on sait aussi que  $Ra_*\mathcal{F} = Rb_*Rf_*\mathcal{F}$  est constructible, de formation compatible à tout changement de base.

Appliquons  $Rb_*$  au triangle défini par la suite exacte

$$0 \longrightarrow j_!j^*Rf_*\mathcal{F} \longrightarrow Rf_*\mathcal{F} \longrightarrow i_!i^*Rf_*\mathcal{F} \longrightarrow 0 : \quad (1)$$

on obtient un triangle

$$\longrightarrow Rb_*j_!j^*Rf_*\mathcal{F} \longrightarrow Ra_*\mathcal{F} \longrightarrow b_{1*}i^*Rf_*\mathcal{F} \longrightarrow \quad (2)$$

dans lequel les deux premiers termes sont constructibles, de formation compatible à tout changement de base en  $S$  (pour le 1er, d'après le théorème de finitude pour le morphisme propre  $b$ ). Il en va donc de même pour le troisième. Puisque  $b_1$  est fini, on en déduit que  $i^*Rf_*\mathcal{F}$  est constructible de formation compatible à tout changement de base en  $S$ , et de même pour  $Rf_*\mathcal{F}$  par (1).

## 2.7

Prouvons  $(*_n)$  en général. On commence par se ramener au cas où dans  $X$  existe un ouvert dense  $V$  lisse sur  $S$ . Pour  $S$  spectre d'un corps parfait, il suffit de remplacer  $X$  par  $X_{\text{red}}$  (et  $Y$  par  $Y_{\text{red}}$ ). En général, il faut rapetisser  $S$ , faire un changement de base fini radiciel et surjectif  $S' \rightarrow S$ , et remplacer  $X$  et  $Y$  par  $X_{\text{red}}$  et  $Y_{\text{red}}$ . La topologie étale étant insensible aux morphismes finis radiciels et surjectifs, ceci est innocent. Quitte à rétrécir  $V$ , on peut supposer  $\mathcal{F}$  localement constant sur  $V$

$$V \hookrightarrow X \xrightarrow{f} Y.$$

Définissons  $\Delta$  par le triangle

$$\longrightarrow \mathcal{F} \longrightarrow Rj_*j^*\mathcal{F} \longrightarrow \Delta \longrightarrow . \quad (1)$$

Les faisceaux de cohomologie de  $\Delta$  sont à support dans  $X \setminus V$ , et  $\dim(X \setminus V)_\eta < n$ . L'hypothèse de récurrence permet donc de supposer que  $Rf_*\Delta$  est constructible. Appliquons  $Rf_*$  au triangle (1); on trouve un triangle

$$\longrightarrow Rf_*\mathcal{F} \longrightarrow R(fj)_*j^*\mathcal{F} \longrightarrow Rf_*\Delta \longrightarrow$$

dans lequel deux des sommets sont constructibles de formation compatible à tout changement de base en  $S$ . Le troisième l'est donc également.

## 2.8

Prouvons 1.9. Le problème est local sur  $Y$ , qu'on peut supposer affine. Prenant un recouvrement affine de  $X$  et invoquant la suite spectrale de Leray, on se ramène à avoir  $X$  également affine. Tout ceci pour assurer qu'on puisse factoriser  $f$  en un plongement ouvert suivi d'un morphisme propre :  $f = gj$ , d'où  $Rf_* = Rg_*Rj_*$ . Le plongement ouvert est justiciable d'un  $(*_n)$ , le morphisme propre du théorème de finitude.

Les corollaires suivants se prouvent comme au paragraphe 1.

**Corollaire 2.9.** *Sous les hypothèses du théorème, pour  $K$  dans  $D_c^b(X, A)$  ou  $D_c^b(Y, A)$  respectivement, il existe un ouvert non vide  $U$  de  $S$  au-dessus duquel  $Rf_*K$ ,  $Rf_!K$ ,  $f^*K$ ,  $Rf^!K$  soient dans  $D_c^b(Y, A)$  ou  $D_c^b(X, A)$ , et de formation compatible à tout changement de base  $S' \rightarrow U \subset S$ .*

**Corollaire 2.10.** *Soit  $X$  comme dans le théorème, et supposons  $A$  commutatif. Alors, si  $\mathcal{F}$  et  $\mathcal{G}$  sont des faisceaux constructibles de  $A$ -modules sur  $X$ , au-dessus d'un ouvert dense  $U$  de  $S$ , les  $\mathcal{E}x_A^i(\mathcal{F}, \mathcal{G})$  sont encore constructibles, de formation compatible à tout changement de base  $S' \rightarrow U \subset S$ .*

## 2.11

Si  $x$  est un point géométrique d'un schéma  $X$ , nous noterons  $X_x$  l'hensélisé strict de  $X$  en  $x$ . Pour  $f : X \rightarrow S$  et  $t$  un point géométrique de  $S$ , nous noterons  $X_t$  la fibre géométrique de  $X$  en  $t$ . Enfin, pour  $x$  un point géométrique de  $X$ , et  $t$  un point géométrique de  $S_{f(x)}$ ,  $(X_x)_t$  est la fibre en  $t$  de  $X_x \rightarrow S_{f(x)}$ .

**Définition 2.12.** *Soient  $f : X \rightarrow S$  et  $K \in \text{Ob } D^+(X, A)$ . On dit que  $f$  est localement acyclique en  $x$ , res.  $K$ , si pour tout point géométrique  $t$  de  $S_{f(x)}$  on a  $K_x = R\Gamma(X_x, K) \xrightarrow{\sim} R\Gamma(X_{x,t}, K)$ . On dit que  $f$  est localement acyclique, rel.  $K$ , si c'est vrai pour tout  $x$ , et universellement localement acyclique, rel.  $K$ , si cela reste vraie après tout changement de base  $S' \rightarrow S$ .*

**Théorème 2.13.** *Soit  $f : X \rightarrow S$  un morphisme de type fini et  $\mathcal{F}$  constructible sur  $X$ . Il existe un ouvert dense  $U$  de  $S$  au-dessus duquel  $f$  est universellement localement acyclique, rel.  $\mathcal{F}$ .*

Nous admettrons le résultat suivant, prouvé dans l'appendice.

**Lemme 2.14.** *Soit  $X \xrightarrow{f} S_1 \xrightarrow{g} S_2$ . Si  $g$  est lisse, et  $f$  universellement localement acyclique rel.  $K$ , alors  $gf$  l'est aussi.*

On se ramène à supposer  $S$  intègre, de point générique  $\eta$ , et on procède par récurrence sur  $\dim X_\eta$ . On commence par déduire de l'hypothèse de récurrence que

$$\begin{aligned} &\text{Quitte à rétrécir } S, \text{ il existe } T \subset X, \text{ fini sur } S, \text{ tel que } f \\ &\text{soit universellement localement acyclique en dehors de } T. \end{aligned} \tag{A}$$

Cette question étant locale, on se localise sur  $X$  et on factorise  $f$  en  $X \xrightarrow{u} \mathbb{A}_S^1 \xrightarrow{S}$ . L'hypothèse de récurrence s'applique à  $u$  et on conclut par 2.14 et les arguments habituels.

Pour prouver le théorème, on peut supposer  $X$  propre, puisque le problème est local. On rétrécit  $S$  pour que les  $R^i f_* \mathcal{F}$  soient localement constants et que (A) soit applicable, et on utilise le lemme suivant.

**Lemme 2.15.** *Soient  $f : X \rightarrow S$ , propre, et  $\mathcal{F}$  constructible. On suppose que les  $R^i f_* \mathcal{F}$  sont localement constants et que, en dehors de  $T \subset X$  fini sur  $S$ ,  $f$  localement acyclique rel. à  $\mathcal{F}$ . Alors,  $f$  est localement acyclique rel. à  $\mathcal{F}$ .*

Soient  $s$  un point géométrique de  $S$ ,  $S_s$  le localisé strict de  $S$  en  $s$  et  $t$  un point géométrique de  $S_s$ . Soient  $X_{(s)}$  l'image réciproque de  $X$  sur  $S_s$ ,  $\tilde{j} : X_t \rightarrow X_{(s)}$  et  $i : X_s \hookrightarrow X_{(s)}$ . Notant encore  $\mathcal{F}$  l'image réciproque de  $\mathcal{F}$  sur  $X_{(s)}$  ou  $X_t$ , il faut prouver que  $i^* \mathcal{F} \xrightarrow{\sim} i^* R\tilde{j}_* \mathcal{F}$ . Soit  $\Delta$  le mapping cylinder de cette application. Ses faisceaux de cohomologie sont à support dans  $T_s$ . Pour prouver que  $\Delta = 0$ , il suffit donc de prouver que  $R\Gamma(X_s, \Delta) = 0$ . C'est là le mapping cylinder de  $(Rf_* \mathcal{F})_s = R\Gamma(X_s, \mathcal{F}) \rightarrow R\Gamma(X_s, i^* R\tilde{j}_* \mathcal{F}) = R\Gamma(X_{(s)}, R\tilde{j}_* \mathcal{F}) = R\Gamma(X_t, \mathcal{F}) = (Rf_* \mathcal{F})_t$ . Ce morphisme de spécialisation est par hypothèse un isomorphisme, et  $\Delta = 0$ .

**Corollaire 2.16.** *Pour  $S$  le spectre d'un corps, tout  $S$ -schéma  $X$  est universellement localement acyclique, rel.  $K$ , quel que soit  $K \in \text{Ob } D^+(X, A)$ .*

Se déduit de 2.13 par passage à la limite (possible, car  $U$  de 2.13 est toujours égal à  $S$ ).

### 3 Preuve de 1.1 et constructibilité des faisceaux de cycles évanescents

#### 3.1

Soit  $S$  un trait strictement local (le spectre d'un anneau de valuation discrète hensélien à corps résiduel séparablement clos). On note  $s$  et  $\eta$  ses points fermé et générique, et  $\bar{\eta}$  un point géométrique localisé et  $\eta$  (une clôture séparable de  $k(\eta)$ ). Soient  $X$  sur  $S$  et  $\mathcal{F}$  un faisceau sur  $X_\eta$ . Rappelons la définition des faisceaux de cycles évanescents  $R^i\Psi_\eta(\mathcal{F})$  (des faisceaux sur  $X_s$ , muni d'une action de  $\text{Gal}(\bar{\eta}/\eta)$ ). Soient  $i : X_s \hookrightarrow X$ ,  $j : X_\eta \hookrightarrow X$ , et  $\bar{j}$  le composé  $X_{\bar{\eta}} \rightarrow X_\eta \hookrightarrow X$  ; on a

$$R^i\Psi_\eta(\mathcal{F}) = i^*R^i\bar{j}_*(\bar{j}^*\mathcal{F}).$$

Voici le théorème principal de ce numéro. Il améliore [DGK73, XIII 2.3.1, 2.4.2].

**Théorème 3.2.** *On suppose que  $X$  de type fini sur  $S$  et  $\mathcal{F}$  constructible. Alors, les faisceaux de cycles évanescents  $R^i\Psi_\eta(\mathcal{F})$  sont constructibles.*

On procède par récurrence sur la dimension  $n$  de  $X_\eta$ . On peut par ailleurs supposer – et on suppose –  $X_\eta$  dense dans  $X$  (remplacer  $X$  par  $\bar{X}_\eta$  ne change pas les  $R^i\Psi$ , qui sont à support dans  $\bar{X}_\eta$ ).

**Lemme 3.3.** *Si 3.2 est vrai en dimension de  $X_\eta < n$ , et que  $\dim X_\eta = n$ , il existe des sous-faisceaux constructibles  $\mathcal{G}_i$  des  $R^i\Psi_\eta(\mathcal{F})$  tels que les supports des sections locales de  $R^i\Psi_\eta(\mathcal{F})/\mathcal{G}_i$  soient finis.*

Soit  $s'$  un point générique géométrique de la droite affine sur  $s$ , et soit  $S'$  le localisé strict en  $s'$  de la droite affine  $\mathbb{A}_S^1$  sur  $S$ . C'est encore un trait strictement local, et les uniformisants pour  $S$  sont des uniformisantes sur  $S'$ .

$$\begin{array}{ccccc}
 & \text{Spec}(k') & \xrightarrow{\quad} & (S', \eta', s') & \\
 \nearrow \bar{\eta}' & \downarrow & \searrow & \downarrow & \searrow \\
 & \bar{\eta}' & & \mathbb{A}_S^1 & \\
 & \downarrow & & \downarrow & \\
 & \bar{\eta} \hookrightarrow \bar{S} & \xrightarrow{\quad} & (S, \eta, s) & 
 \end{array}$$

Soit  $k' = k(\bar{\eta}) \otimes_{k(\eta)} k(\eta')$ . Si  $\bar{S}$  est le normalisé de  $S$  dans  $\bar{\eta}$ ,  $k'$  est le corps des fractions du localisé strict de  $\mathbb{A}_S^1$  en  $s'$  ; c'est donc un corps, et  $\text{Gal}(\bar{\eta}/\eta) = \text{Gal}(k'/\eta')$ . Soit  $\bar{\eta}'$  le spectre d'une clôture algébrique de  $k'$ . Le groupe de Galois  $P = \text{Gal}(\bar{\eta}'/k')$  est un pro- $p$ -groupe, pour  $p$  l'exposant caractéristique de  $k(s)$ .

**Lemme 3.4.** *Pour tout schéma  $X'$  sur  $S'$ , et tout faisceau  $\mathcal{F}$  sur  $X'_\eta = X'_{\eta'}$ , on a entre les faisceaux de cycles évanescents pour  $X'/S'$  et pour  $X'/S$  la relation  $R^i\Psi_\eta(\mathcal{F}) = R^i\Psi_{\eta'}(\mathcal{F})^P$ .*

Le diagramme suivant compare les morphismes utilisés dans la définition de  $R\Psi$  pour  $X'/S'$  et  $X'/S$  :

$$\begin{array}{ccccc}
 X_{\bar{\eta}'} & \xrightarrow{\quad} & X'_{\eta'} & \hookrightarrow & S' \\
 \downarrow & \nearrow & \parallel & \searrow & \\
 X_{\eta'} \times_{\eta'} \text{Spec}(k') & & X'_{\eta'} & \searrow & \\
 \parallel & & \parallel & \nearrow & \\
 X'_\eta & \xrightarrow{\quad} & X'_\eta & \nearrow & S
 \end{array}$$

et le lemme résulte de la suite spectrale de Hochschild-Serre, compte tenu de ce que  $P$  est un pro- $p$ -groupe, avec  $p$  inversible dans  $A$ .

Prouvons 3.3. La question est locale ; ceci permet de supposer  $X$  affine,  $X \subset \mathbb{A}_S^n$ . Soient  $f$  l'une des projection  $X \subset \mathbb{A}_S^n \rightarrow \mathbb{A}_S^1$ .  $X'$  le “localisé”  $X_{\mathbb{A}_S^1} S'$  de  $x$ , et  $\mathcal{F}'$  l'image inverse de  $\mathcal{F}$  sur  $x'$

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{F}' \text{ sur } X' & \longrightarrow & S' \\ \downarrow \lambda & & \downarrow \lambda \\ \mathcal{F} \text{ sur } X & \xrightarrow{f} & \mathbb{A}_S^1 \longrightarrow S. \end{array}$$

On a, sur  $X'_s = X'_{s'}$ ,

$$\lambda^* R^i \Psi_\eta(\mathcal{F}) = R^i \Psi_\eta(\mathcal{F}') = R^i \Psi_{\eta'}(\mathcal{F}')^P :$$

ce faisceau est constructible, car l'hypothèse de récurrence s'applique à  $X'/S'$ , et on utilise le lemme suivant appliqué à  $X_s \subset \mathbb{A}_S^n$  et aux faisceaux de cycles évanescents.

**Lemme 3.5.** *Soient  $\mathbb{A}^n$  l'espace affine type de dimension  $n$  sur un corps  $k$ ,  $X \subset \mathbb{A}^n$ ,  $]sF$  un faisceau de  $A$ -modules sur  $X$  et  $\bar{\eta}$  un point générique géométrique de  $\mathbb{A}^1$ . Soient  $X_{\bar{\eta},i}$  la fibre générique géométrique de  $X \subset \mathbb{A}^n \xrightarrow{\text{pr}_i} \mathbb{A}^1$  et  $\mathcal{F}_{\bar{\eta},i}$  la restriction de  $\mathcal{F}$  à  $X_{\bar{\eta},i}$ . Si les  $\mathcal{F}_{\bar{\eta},i}$  sont constructibles, il existe  $\mathcal{F}' \subset \mathcal{F}$ , constructible, tel que les sections locales de  $\mathcal{F}/\mathcal{F}'$  soient à support fini.*

Par passage à limite, pour chaque  $i$

- Il existe un voisinage étale  $U$  de  $\bar{\eta}$  et un faisceau constructible  $\mathcal{H}$  sur  $X_{U,i} = X \times_{\mathbb{A}^1, \text{pr}_i} U$  de restriction  $\mathcal{F}_{\bar{\eta},i}$  à  $X_{\bar{\eta},i}$ .
- Pour  $U$  convenable, l'isomorphisme  $\mathcal{H}_{\bar{\eta},i} \xrightarrow{\sim} \mathcal{F}_{\bar{\eta},i}$  provient de  $u : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{F}_{U,i}$  où  $\mathcal{F}_{U,i}$  est l'image réciproque de  $\mathcal{F}$  sur  $X_{U,i}$ . Soit  $\varphi : X_{U,i} \rightarrow X$ . Le morphisme  $u$  définit  $v_i : \varphi_* \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{F}$ , d'image  $\mathcal{F}'_i$ . On a  $(\mathcal{F}/\mathcal{F}'_i)_{\bar{\eta},i} = 0$  et on prend pour  $\mathcal{F}'$  la somme des  $\mathcal{F}'_i$ .

### 3.6

Prouvons 3.2 en dimension  $n$ . On peut supposer  $X$  affine (car le problème est local sur  $X_s$ ), puis projectif sur  $S$  (prendre l'adhérence de  $X$  dans un plongement projectif). On a alors une suite spectrale [DGK73, I 2.2.3] (la suite spectrale de Leray pour  $\bar{j}$ , compte tenu du théorème de changement de base pour le morphisme propre  $X \rightarrow S$ ).

$$E_2^{pq} = H^p(X_s, R^i \Psi_\eta(\mathcal{F})) \Rightarrow H^{p+q}(X_{\bar{\eta}}, \mathcal{F}). \quad (1)$$

Soit  $\mathcal{G}^q \subset R^q \Psi_\eta(\mathcal{F})$  comme en 3.3, et soit  $\mathcal{H}^q$  le faisceau quotient. On a  $H^i(X_s, \mathcal{H}^q) = 0$  pour  $i \neq 0$ , et pour que  $\mathcal{H}^q$ , donc  $R^q \Psi_\eta(\mathcal{F})$  soit constructible, il suffit que  $H^0(X_s, \mathcal{H}^q)$  soit de type fini.

Calculons (1) modulo modules de type fini (i.e. dans la catégorie quotient de celle des  $A$ -modules par la sous-catégorie épaisse des  $A$ -modules de type fini). La suite exacte longue de cohomologie déduit de  $0 \rightarrow \mathcal{G}^q \rightarrow R^q \Psi_\eta(\mathcal{F}) \rightarrow \mathcal{H}^q \rightarrow 0$  fournit, par 1.10 appliqué à  $\mathcal{G}^q$ , que  $E_2^{pq} \sim H^q(X_s, \mathcal{H}^q)$ . En particulier,  $E_2^{pq} \sim 0$  pour  $p \neq 0$ ,  $E_2^{0q} \sim H^q(X_{\bar{\eta}}, \mathcal{F}) \sim 0$ , et ceci achève la démonstration.

Des arguments parallèles fournissent le résultat suivant, qui améliore [DGK73, XIII 2.1.12, 2.4.2].

**Proposition 3.7.** *La formation des faisceaux de cycles évanescents est compatible aux changements de traits.*

Soient  $g : (S', \eta', s') \rightarrow (S, \eta, s)$  un morphisme (surjectif) de traits strictement locaux,  $X/S$ ,  $\mathcal{F}$  sur  $X_\eta$ , de torsion premier à la caractéristique résiduelle et  $(X', \mathcal{F}')$  leurs images réciproques sur  $S'$ . Notant encore  $g$  les morphismes parallèles à  $g$ , tels  $X'_{s'} \rightarrow X_s$ , il faut prouver que

$$g^* R \Psi_\eta(\mathcal{F}) \xrightarrow{\sim} R \Psi_{\eta'}(\mathcal{F}'). \quad (3.7.1)$$

Ce morphisme est défini par le diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccccc} X'_{s'} & \xhookrightarrow{i'} & X' & \xleftarrow{\bar{j}'} & X'_{\eta'} \\ \downarrow g & & \downarrow g & & \downarrow g \\ X_s & \xhookrightarrow{i} & X & \xleftarrow{\bar{j}} & X_{\bar{\eta}} \end{array}$$



Un passage à la limite ramène à supposer  $X$  de type fini sur  $S$ , et on procède par récurrence sur  $\dim X_\eta$ . La question étant locale, on peut supposer  $X$  affine, puis projectif. Supposons (3.7.1) pour  $\dim X_\eta < n$ . Pour  $\dim X_\eta = n$ , il résulte alors des deux assertions suivantes, où  $\Delta$  est le mapping cylinder de (3.7.1).

- (A) Le support des sections locales des faisceaux de cohomologie de  $\Delta$  est fini.
- (B)  $R\Gamma(X_s, \Delta) = 0$ , donc  $\Delta = 0$ , d'après (A).

### 3.8

La preuve de (A) est parallèle à celle de 3.3. On se localise sur  $X$  et on considère des applications  $X \rightarrow \mathbb{A}_S^1$ ; notant  $S(x)$  l'hensélisé stricte de  $\mathbb{A}_S^1$  au point générique de la fibre spéciale, on applique l'hypothèse de récurrence à  $X_1/S(x)$  ( $X_1 = X \times_{\mathbb{A}^1} S(x)$ ) et à  $S'(x)$ . Prenant les invariants par un pro- $p$ -groupe, on trouve que  $\Delta$  est nul sur la fibre générique géométrique de  $X_{s'} \rightarrow \mathbb{A}_s^1$ . Ceci étant vrai, localement sur  $X$  et pour tout projection, on a (A).

### 3.9

Pour (B), la propriété de  $X$  sur  $S$  assure que

$$R\Gamma(X'_{s'}, R\Psi_{\eta'}(\mathcal{F}')) = R\Gamma(X'_{\bar{\eta}}, \mathcal{F}')$$

et

$$R\Gamma(X_s, R\Psi_\eta(\mathcal{F})) = R\Gamma(X_{\bar{\eta}}, \mathcal{F}).$$

On a  $R\Gamma(X_s, R\Psi_\eta(\mathcal{F})) \xrightarrow{\sim} R\Gamma(X'_{s'}, g^* R\Psi_\eta(\mathcal{F}))$  (invariance par changement de corps séparablement clos de base);  $R\Gamma(X'_{s'}, \Delta)$  est donc le mapping cylinder de  $R\Gamma(X_{\bar{\eta}}, \mathcal{F}) \rightarrow R\Gamma(X'_{\bar{\eta}}, \mathcal{F}')$ , un isomorphisme par la même théorème d'invariance.

### 3.10

Prouvons 1.1. On se ramène à supposer  $S$  connexe, donc intègre. Si  $\dim S = 0$ , ( $S$  spectre d'un corps); on applique 1.9, 1.10. Si  $S$  est de dimension 1, le théorème 1.9 assure que les  $R^i f_* \mathcal{F}$  sont constructibles au-dessus du complément d'un ensemble fini  $T$  de points de  $S$ . Il reste à voir que leur restriction aux  $Y_t$  ( $t \in T$ ) sont constructibles. Il suffit de le voir après localisation en  $t$ : on peut supposer que  $S$  est un trait strictement local. Le cas essentiel est le suivant.

**Lemme 3.11.** *Soient  $X$  de type fini sur  $S$ ,  $j : X_\eta \hookrightarrow X$ ,  $i : X_s \hookrightarrow X$  et  $\mathcal{F}$  constructible sur  $X_\eta$ . Alors,  $i^* Rj_* \mathcal{F}$  est constructible.*

Soit  $I = \text{Gal}(\bar{\eta}/\eta)$  le groupe d'inertie. On sait que c'est une extension de  $\widehat{\mathbb{Z}}_{p'}(1)$  par un pro- $p$ -groupe  $P$  ( $p$  exposant caractéristique du corps résiduel). La suite spectrale de Hochschild-Serre donne

$$E_2^{pq} = \mathcal{H}^p(I, R^q \Psi_\eta(\mathcal{F})) \Rightarrow i^* R^{p+q} j_* \mathcal{F}.$$

Soit  $R_t^q = R^q \Psi_\eta(\mathcal{F})^P$  ( $t$  pour modéré). Si  $\sigma$  est un générateur de  $\widehat{\mathbb{Z}}_{p'}(1)$ , on a  $E_2^{0q} = \ker(\sigma - 1, R_t^q)$ ,  $E_2^{1q} = \text{coker}(\sigma - 1, R_t^q)$  et  $E_2^{pq} = 0$  pour  $p \neq 0, 1$ . Ces faisceaux sont constructibles, puisque les faisceaux de cycles évanescents le sont, et 3.11 en résulte.

### 3.12

Traitons le cas général,  $S$  étant toujours un trait strictement hensélien. Si  $X = X_\eta$ ,  $f$  est le composé  $X \rightarrow Y_\eta \rightarrow Y$  et on applique 1.9 et 3.11. Dans le cas général, soit  $j : X_\eta \hookrightarrow X$  et soit  $\Delta$  le mapping cylinder de  $\mathcal{F} \rightarrow Rj_* j^* \mathcal{F}$ . Ses faisceaux de cohomologie sont à support dans  $X_s$ ; d'après 1.9 appliqué à  $X_s \rightarrow Y_{s'}$ ,  $Rf_* \Delta$  est donc constructible. Le complexe  $Rf_* Rj_* j^* \mathcal{F} = R(fj)_* j^* \mathcal{F}$  l'est également, et on conclut par le triangle

$$\longrightarrow Rf_* \mathcal{F} \longrightarrow Rf_* Rj_* j^* \mathcal{F} \longrightarrow Rf_* \Delta \longrightarrow.$$

## 4 Bidualité locale

### 4.1

Soit  $S$  régulier de dimension 0 ou 1 et posons  $K_S = A$  (faisceau constant de valeur  $A$ ). Pour  $K \in \text{Ob } D_{\text{ctf}}^b(S, A)$ , on pose  $DK = R\mathcal{H}om(K, K_S) \in \text{Ob } D^+(S, A^\circ)$  (un complexe de faisceaux de  $A$ -modules à droites). On a encore  $DK \in \text{Ob } D_{\text{ctf}}^b(S, A^0)$ , et un calcul explicite, possible car  $S$  est de dimension 1 montre  $K \xrightarrow{\sim} DDK$  (pour  $A = \mathbb{Z}/n$ , Dualité 1.4).

### 4.2

On supposera que  $A$  est commutatif, hypothèse sans doute inutile. Pour  $a : X \rightarrow S$  de type fini sur  $S$ , on pose  $K_X = Ra^!K_S$ . Pour  $K \in \text{Ob } D_{\text{ctf}}^b(S, A)$ , on pose  $DK = R\mathcal{H}om(K, K_X) \in \text{Ob } D_{\text{ctf}}^b(X, A)$ . Notre résultat principal est le suivant

**Théorème 4.3.** *On a  $K \xrightarrow{\sim} DDK$  ( $K \in \text{Ob } D_{\text{ctf}}^b(X, A)$ ).*

**Lemme 4.4.** *Si  $a$  est propre, on a  $Ra_*K \xrightarrow{\sim} Ra_*DDK$ .*

La dualité de Poincaré

$$Ra_! R\mathcal{H}om(K, Ra^!K_S) = R\mathcal{H}om(Ra_!K, K_S)$$

nous fournit un isomorphisme  $Ra_*D = DRa_! = DRa_*$ . Le lemme résulte de la commutativité du diagramme (Dualité, 1.2)

$$\begin{array}{ccc} Ra_*K & \longrightarrow & Ra_*DDK \\ \downarrow \wr & & \downarrow \wr \\ DDr_*K & \xrightarrow{\sim} & DDr_*DK. \end{array}$$

### 4.5

On voit par localisation qu'il suffit de traiter les cas où  $S$  est spectre d'un corps, ou un trait. Pour  $S$  spectre d'un corps, on procède par récurrence sur  $\dim X$ . Le problème étant local, on peut supposer  $X$  propre. Par ailleurs, l'hypothèse de récurrence assure, par les arguments habituels, que le mapping cylinder  $\Delta$  de  $K \rightarrow DDK$  a des faisceaux de cohomologie en gratte-ciel. Le lemme assure alors que  $Ra_*\Delta = 0$ , donc que  $\Delta = 0$ .

### 4.6

Pour  $S$  un trait, on sait déjà que 4.3 vaut sur la fibre générique (4.5). On peut aussi supposer  $X$  propre sur  $S$  et on procède par récurrence sur  $\dim X_s$ ,  $X$  propre sur  $S$ . Le mapping cylinder  $\delta$  a encore des faisceaux de cohomologie en gratte ciel, sur  $X_s$ , et on conclut comme plus haut.

### 4.7

Supposons que  $A = \mathbb{Z}/m$ . On a alors une variante de la théorie précédente, en prenant  $K$  quelconque dans  $D_c^b(X, A)$ . Le complexe  $Ra^!\mathbb{Z}/m$  est de dimension injective finie [AGV72, XVIII 3.1.7]. Ceci assure que  $DK$  est encore dans  $D_c^b(X, A)$ . Pour prouver la bidualité locale sur  $S$ , on utilise que  $\mathbb{Z}/m$  est le  $\mathbb{Z}/m$ -module dualisant. Ensuite, on procède comme ci-devant.

## 5 Appendice, par L. Illusie

Dans cet appendice, qui reprend certaines parties de feu [Gro66, II], et une lettre de P. Deligne à l'auteur, nous prouvons 2.14 ainsi que diverses généralisations et variantes des théorèmes de spécialisation [AGV72, XVI 2.1] et (Cohomologie étale 5.1.7).

Les schémas et morphismes considérés seront supposés quasi-compacts et quasi-séparés. Si  $X$  est un schéma et  $x$  un point géométrique de  $X$ , on notera  $X(x)$  le localisé strict de  $X$  en  $x$ .

On fixe un schéma de base  $S$  et un faisceau d'anneaux  $A$  sur  $S$  (non nécessairement commutatif ni noethérien). Si  $X$  est un  $S$ -schéma, on écrira  $D(X)$  pour  $D(X, A_X)$ .

## 5.1 Propreté cohomologique

**Proposition 5.1.1.** *Soient  $f : X \rightarrow Y$  un  $S$ -morphisme et  $E \in \text{Ob } D^+(X)$ . Les conditions suivantes sont équivalentes :*

- (i) *La formation de  $Rf_*E$  commute à tout changement de base fini  $S' \rightarrow S$ .*
- (ii) *La formation de  $Rf_*E$  commute à tout changement de base quasi-fini (ou limite projective de morphismes quasi-finis)  $S' \rightarrow S$ .*
- (iii) *Pour tout flèche de spécialisation  $i : t \rightarrow S(s)$  (Cohomologie étale, 5.1.2), si l'on désigne par  $\tilde{S}$  le normalisé dans  $k(\bar{t})$  du schéma intègre adhérence de  $i(t)$  dans  $S(s)$  (d'après [Gro67, IV, 6.15.5, 18.6.11, 18.8.16])  $\tilde{S}$  est donc local intègre, de point fermé radiciel sur  $s$ ,  $\bar{f} : \bar{X} \rightarrow \bar{Y}$  le morphisme déduit de  $f$  par le changement de base  $\tilde{S} \rightarrow S$ ,  $f_s : X_s \rightarrow Y_s$  la fibre de  $f$  en  $s$ , alors la flèche de changement de base*

$$(R\bar{f}_*(E|\bar{X}))|_{Y_s} \rightarrow Rf_{s*}(E|X_s)$$

*est un isomorphisme.*

L'équivalence de (i) et (ii) résulte du théorème principal de Zariski, et il est clair que (ii) implique (iii). Prouvons que (iii) implique (ii). Pour tout  $S' \rightarrow S$ , limite projective de morphismes quasi-finis, et tout point géométrique  $s$  de  $S'$ , notons  $C(S', s)$  le cône de la flèche de changement de base

$$(Rf'_*(E|X'))|_{Y_s} \rightarrow Rf_{s*}(E|X_s),$$

où  $f' : X' \rightarrow Y'$  est le morphisme déduit de  $f$  par le changement de base  $S' \rightarrow S$  et  $f_s : X_s \rightarrow Y_s$  la fibre de  $f$  en  $s$ . Il s'agit de prouver que, pour tout  $(S', s)$  comme ci-dessus,  $C(S', s)$  est acyclique. On va montrer, par récurrence sur  $N$ , que  $H^i C(S', s) = 0$  pour  $i \leq N$ . Par le Main Theorem, passage à la limite, et nettoyage de morphismes radiciels, on peut supposer que  $S$  et  $S'$  sont strictement locaux,  $S'$  intègre, de point fermé  $s$ ,  $S' \rightarrow S$  fini. Soient  $t$  un point géométrique générique de  $S'$ , et  $\bar{S}$  le normalisé de  $S'$  dans  $k(t)$ . Soit  $\bar{S}_\bullet$  le schéma simplicial cosquelette de  $S' \rightarrow S$  ( $\bar{S}_0 = \bar{S}, \dots, \bar{S}_n = (\bar{S}/S')^{n+1}, \dots$ ),  $X_\bullet = X \times_S \bar{S}_\bullet$ ,  $g_\bullet : \bar{X}_\bullet \rightarrow X'$  la projection canonique. Posons  $G|X' = G'$ . Le bicomplexe  $g_{\bullet*}g_\bullet^*G'$ , de colonnes les  $g_{n*}g_n^*G'$  est une résolution de  $G'$  [AGV72, VIII 8]. On peut donc représenter  $C(S', s)$  par un bicomplexe dont les colonnes s'identifient aux  $C(\bar{S}_n, s)$ . D'après (iii),  $C(\bar{S}_0, s) = C(\bar{S}, s)$  est acyclique. D'autre part, par  $n > 0$ , on a  $H^i(\bar{S}_n, s) = 0$  pour  $i \leq N$  par l'hypothèse de récurrence. On en conclut que  $H^i C(S', s) = 0$  pour  $i \leq N + 1$ , ce qui achève la démonstration.

### 5.1.2 Remarque

Soit  $(f, E)$  vérifiant la condition (i) de 5.1.1.

- a) Si  $E \in \text{Ob } D^b(X)$ , et  $f_*$  est de dimension cohomologique finie, alors, pour tout  $F \in \text{Ob } D^-(S, A^\circ)$ , la flèche canonique

$$Rf_*(E) \otimes_{Aq}^L F \rightarrow Rf_*(E \otimes_{Ap}^L F), \quad (*)$$

où  $p : X \rightarrow S$ ,  $q : Y \rightarrow S$  sont les projections, est un isomorphisme. Même conclusion avec  $E \in \text{Ob } D^-(X)$ .

Par dévissage, il suffit en effet de vérifier l'assertion pour  $F$  de la forme  $i_! A_{S'}$ , avec  $i : S' \rightarrow S$  quasi-fini. Par le Main Theorem, on se ramène à supposer  $i$  fini, la conclusion équivaut alors à la commutation de  $Rf_*(E)$  au changement de base par  $i$ .

- b) On suppose  $A$  noethérien, constructible. Alors, pour tout  $F \in \text{Ob } D^b(S, A^\circ)$ , constructible et de tor-dimension finie, la flèche  $(*)$  ci-dessus est un isomorphisme.

On se ramène en effet, par dévissage, au cas où  $F$  est de la forme  $i_! M$ , avec  $i : S' \rightarrow S$  localement fermé,  $A$  localement constant sur  $S'$ ,  $M$  constructible, de tor-dimension finie, et à cohomologie localement constante sur  $S'$ . Changeant de base de  $S$  à  $S'$ , on est donc ramené au cas où  $F$  est parfait [BGI71, I], donc finalement, par localisation et dévissage, au cas où  $F = A$ , pour lequel la conclusion est triviale.

## 5.1.3

Soient  $f : X \rightarrow Y$  un  $S$ -morphisme, et  $E \in \text{Ob } \mathbf{D}^+(X)$ . Nous dirons que  $(f, E)$  est *cohomologiquement propre* rel. à  $S$  si la formation de  $Rf_*E$  commute à tout changement de base  $S' \rightarrow S$ . Il revient au même de dire qu'après tout changement de base  $S' \rightarrow S$ , la formation de  $Rf'_*E'$  (où  $f' = f \times_S S'$ ,  $E' = \text{image inverse de } E \text{ sur } X \times_S S'$ ) commute à tout changement de base fini  $S'' \rightarrow S'$  (cf. [AGV72, XII 6.1]). Voici quelques exemples de propriété cohomologique (pour une étude de la notion analogue pour les faisceaux d'ensembles ou de groupes non commutatifs, le lecteur se reportera à [GR71, XIII]).

1. On suppose  $A$  de torsion et  $f$  propre. Alors, pour tout  $E \in \text{Ob } \mathbf{D}^+(X)$ ,  $(f, E)$  est cohomologiquement propre rel. à  $S$  (théorème de changement de base propre, [AGV72, XII 5.1]).
2. On suppose  $S$  fini,  $X$  et  $Y$  de type fini sur  $S$ , et  $A$  annulé par un entier inversible sur  $S$ . Alors, pour tout  $E \in \text{Ob } \mathbf{D}^+(X)$ ,  $(f, E)$  est cohomologiquement propre rel. à  $S$  (1.9).
3. On suppose  $A$  constant, noethérien, annulé par un entier  $n$  inversible sur  $S$ ,  $f : X = Y \setminus D \rightarrow Y$  l'inclusion du complément d'un diviseur  $D$  sur  $Y$ , à croisements normaux rel. à  $S$  [GR71, XIII 2.1]. Soit  $E$  un faisceau de  $A$ -modules sur  $X$  vérifiant l'une des conditions suivantes :
  - (i)  $E$  est localement constant constructible et modérément ramifié le long de  $D$ ;
  - (ii)  $E$  est localement pour la topologie étale sur  $Y$  et sur  $S$  l'image inverse d'un faisceau de  $A$ -modules sur  $S$ .

Alors  $(f, E)$  est cohomologiquement propre rel. à  $S$ , et  $Rf_*E$  constructible (comparer avec [GR71, XIII 2.4]).

Esquissons la démonstration dans le cas (i). La question est locale au voisinage d'un point  $y$  de  $Y$ . On peut supposer  $D$  somme de diviseurs lisses,  $D = \sum_{i=1}^m D_i$ . En vertu du lemme d'Abhyankar relatif [GR71, XIII 5.5], on peut, au voisinage de  $y$ , trivialisier  $E$  par un revêtement fini  $\tilde{Y} \rightarrow Y$  de la forme  $\tilde{Y} = Y[T_1, \dots, T_r]/(T_1^{n_1} - t_1, \dots, T_r^{n_r} - t_r)$  où les  $t_i$  sont des équations locales des diviseurs lisses passant par  $y$ , et les  $n_i$  des entiers premiers à la car. de  $k(y)$ . L'image inverse  $\tilde{D}$  de  $D$  dans  $Y$  est encore à croisements normaux rel. à  $S$ , et si  $g : \tilde{X} = \tilde{Y} \setminus \tilde{D} \rightarrow X$  est la projection,  $g^*E$  est constant. Comme  $E$  s'injecte dans  $g_*g^*E$  et que le quotient est modérément ramifié, un dévissage facile ramène au cas où  $E$  est constant. Notons  $p : X \rightarrow S$ ,  $q : Y \rightarrow S$  les projections, et, pour  $1 \leq i \leq m$ ,  $f_i : Y \setminus D_i \rightarrow D$  l'inclusion canonique. Du théorème de pureté relatif [AGV72, XVI 3.7] on déduit aisément, par récurrence sur  $m$ , que, pour tout  $A$ -module localement constant  $M$  sur  $S$ , la flèche canonique

$$Rf_*(\mathbb{Z}/n) \otimes^L q^*M \rightarrow Rf_*(p^*M) \quad (5.1.3.1)$$

est un isomorphisme, et que d'autre part on a :

$$\begin{aligned} f_{i*}(\mathbb{Z}/n) &= \mathbb{Z}/n, \\ R^1 f_{i*}(\mathbb{Z}/n) &= (\mathbb{Z}/n)(-1)_{D_i}, \end{aligned} \quad (5.1.3.2)$$

un isomorphisme canonique étant donné par la classe fondamentale  $\text{cl}(D_i)$  (Cycle 2.1.4),

$$\begin{aligned} R^q f_{i*}(\mathbb{Z}/n) &= 0 \text{ pour } q > 1, \\ Rf_*(\mathbb{Z}/n) &= \bigotimes_i^L Rf_{i*}(\mathbb{Z}/n), \text{ i.e. :} \\ R^1 f_*(\mathbb{Z}/n) &= \bigoplus_{i=1}^m (\mathbb{Z}/n)(-1)_{D_i}, \\ \bigwedge^\bullet R^1 f_*(\mathbb{Z}/n) &\xrightarrow{\sim} R^\bullet f_*(\mathbb{Z}/n). \end{aligned}$$

La conclusion de 3, dans le cas (i), résulte donc de (5.1.3.1) et (5.1.3.2). Dans le cas (ii), on se ramène, par passage à la limite, au cas où  $E = p^*M$ , avec  $M$  constructible, puis, par dévissage et changement de base (utilisant (i)), au cas  $M$  constant, déjà traité.

Il découle de la démonstration précédente que (5.1.3.1) est un isomorphisme pour tout  $M \in \text{Ob } \mathbf{D}^+(S)$ .

On comparera les formules (5.1.3.2) aux formules analogues en cohomologie entière dans le cas  $S = \operatorname{Spec}(\mathbb{C})$  (voir par exemple [Del71b, 3.1]), qui résultent de ce que, localement pour la topologie classique, le complément de  $D$  a le type d'homotopie d'un tore.

Par passage à la limite, on déduit de (5.1.3.2) des formules similaires en cohomologie  $\ell$ -adique, i.e. avec  $\mathbb{Z}/n$  remplacé par  $\mathbb{Z}_\ell$  ( $\ell$  un nombre premier inversible sur  $S$ ). Supposons  $q : Y \rightarrow S$  propre et lisse. Il découle alors des conjectures de Weil [Del74, Del80] que la suite spectrale de Leray

$$E_2^{ij} = R^i q_* R^j f_* \mathbb{Z}_\ell \Rightarrow R^\bullet p_* \mathbb{Z}_\ell$$

dégénère en  $E_3$  modulo torsion [Del71a, §6]. Le même phénomène se produit en cohomologie entière dans le cas  $S = \operatorname{Spec}(\mathbb{C})$ , voir (loc. cit.) et [Del71b, 3.2.13].

## 5.2 Spécialisation et cospécialisation

Soient  $f : X \rightarrow S$  et  $E \in \operatorname{Ob} D^+(X)$ .

### 5.2.1

Supposons que la formation de  $Rf_* E$  commute à tout changement de base fini. Pour toute spécialisation  $u : t \rightarrow S(s)$  de points géométriques de  $S$ , on définit alors une flèche, dite *flèche de spécialisation*,

$$\operatorname{sp}(u) : R\Gamma(X_s, E|X_s) \rightarrow R\Gamma(X_t, E|X_t), \quad (5.2.1.1)$$

de la manière suivante. Soient, comme en 5.1.1(iii),  $\bar{S}$  le normalisé dans  $k(t)$  de l'adhérence de  $u(t)$  dans  $S(s)$ , et  $\bar{f} : \bar{X} \rightarrow \bar{S}$  le morphisme déduit de  $f$  par le changement de base  $\bar{S} \rightarrow S$ . D'après la partie triviale (i)  $\Rightarrow$  (iii) de 5.1.1, la flèche de changement de base

$$R\Gamma(\bar{X}, E|\bar{X}) = R\bar{f}_*(E|\bar{X})_s \rightarrow R\Gamma(X_s, E|X_s) \quad (5.2.1.2)$$

est un isomorphisme. On définit (5.2.1.1) comme composée de l'inverse de (5.2.1.2) et de la flèche de restriction

$$R\Gamma(\bar{X}, E|\bar{X}) \rightarrow R\Gamma(X_t, E|X_t). \quad (5.2.1.3)$$

### 5.2.2

Supposons que  $f$  soit localement acyclique rel. à  $E$  (2.12). Pour toute spécialisation  $u : t \rightarrow S(s)$  de points géométriques de  $S$ , on définit alors une flèche, dite *flèche de cospécialisation*,

$$\operatorname{cosp}(u) : R\Gamma(X_t, E|X_t) \rightarrow R\Gamma(X_s, E|X_s), \quad (5.2.2.1)$$

définie de la manière suivante. Soient  $g : X_t \rightarrow X$ ,  $g' : \bar{X} \rightarrow X$  les flèches canoniques. Il découle de l'hypothèse d'acyclicité locale que la flèche canonique

$$Rg'_*(E|\bar{X}) \rightarrow Rg_*(E|X_t) \quad (5.2.2.2)$$

est un isomorphisme. En effet, on peut supposer  $S$  strictement local, intègre, de point fermé  $s$ ,  $t$  étant un point géométrique générique. Calculons la fibre de (5.2.2.2) en un point géométrique  $x$  en  $X$ , d'image  $y$  dans  $S$ . Quitte à remplacer  $S$  par le localisé strict de  $S$  en  $y$ , on peut supposer que  $y = s$ . Comme  $\bar{S} \rightarrow S$  est limite projective de morphismes finis, et radiciel en  $s$ , on trouve que  $Rg'_*(E|\bar{X})_x = E_x$  et que la fibre que (5.2.2.2) en  $x$  s'identifie à la restriction  $E_x = R\Gamma(X(x), E) \rightarrow R\Gamma(X(x)_t, E|X(x)_t)$ , laquelle est un isomorphisme par hypothèse. Appliquant  $R\Gamma(X, -)$  à (5.2.2.2), on en déduit que la flèche de restriction (5.2.1.3) est un isomorphisme. On définit (5.2.2.1) comme composée de l'inverse de (5.2.1.3) et de la flèche de changement de base (5.2.1.2).

### 5.2.3

Si  $s'' \xrightarrow{u'} s' \xrightarrow{u} s$  sont les flèches de spécialisation de points géométriques de  $S$ , on vérifie que l'on a

$$\begin{aligned} \operatorname{sp}(u') \operatorname{sp}(u'') &= \operatorname{sp}(uu'), \\ \operatorname{cosp}(u) \operatorname{cosp}(u') &= \operatorname{cosp}(uu'), \end{aligned}$$

chaque fois que les deux membres sont définis.

## 5.2.4

Supposons que la formation de  $Rf_*E$  commute à tout changement de base fini, et que  $f$  soit localement acyclique rel. à  $E$ . Il découle des définitions que, pour tout spécialisation  $u : t \rightarrow S(s)$  de points géométriques de  $S$ ; les flèches  $\mathrm{sp}(u)$  et  $\mathrm{cosp}(u)$  sont des isomorphismes, inverses l'un de l'autre.

Les hypothèses précédentes sont vérifiées notamment lorsque  $A$  est noethérien, annulé par un entier  $n$  inversible sur  $S$ ,  $f$  propre et lisse, et  $E$  à cohomologie localement constante (propreté cohomologique des morphismes propres (5.1.3), et locale acyclicité des morphismes lisses [AGV72, XV]). On retrouve le “théorème de spécialisation” [AGV72, XVI 2.1].

D'autre part, 5.1.1 a la conséquence suivante :

**Proposition 5.2.5.** *Supposons que  $f$  soit localement acyclique relativement à  $E$ , et que, pour toute spécialisation  $u : t \rightarrow S(s)$ , la flèche de cospécialisation  $\mathrm{cosp}(u)$  soit un isomorphisme. Alors la formation de  $Rf_*E$  commute à tout changement de base fini.*

Compte tenu de 5.2.4, 5.2.5 généralise (Cohomologie étale 5.1.7).

**Corollaire 5.2.6.** *Supposons que  $f$  soit localement acyclique rel. à  $E$ . Soit  $x$  un point géométrique de  $X$ , d'image  $s$  dans  $S$ , notons  $f_{(x)} : X(x) \rightarrow S(s)$  le morphisme induit par  $f$ . Alors la formation de  $Rf_{(x)*}(E|X(x))$  commute à tout changement de base fini  $S' \rightarrow S(s)$ .*

Il suffit, d'après 5.2.5, de vérifier que les flèches de cospécialisation pour  $(f_{(x)}, E|X(x))$  sont des isomorphismes. Par transitivité des flèches de cospécialisation (5.2.3), il suffit de montrer que, si  $u : t \rightarrow S(s)$  est une spécialisation, alors  $\mathrm{cosp}(u) : R\Gamma(X(x)_t, E|X(x)_t) \rightarrow R\Gamma(X(x)_s, E|X(x)_s)$  est un isomorphisme. Mais, comme  $s$  est fermé dans  $S(s)$ ,  $X(x)_s$  est strictement local de point fermé  $x$ ,  $R\Gamma(X(x)_s, E|X(x)_s) = E_x$ , et  $\mathrm{cosp}(u)$  est un isomorphisme, inverse de l'isomorphisme de restriction  $E_x \rightarrow R\Gamma(X(x)_t, E|X(x)_t)$ .

**Corollaire 5.2.7.** *Soient  $f : X \rightarrow Y$  un  $S$ -morphisme,  $p : X \rightarrow S$ ,  $q : Y \rightarrow S$  les projections, et  $E \in \mathrm{Ob} D^+(X)$ . On suppose  $A$  localement constant,  $f$  localement acyclique rel. à  $E$ , et  $q$  localement acyclique en tout point géométrique  $y$  de  $Y$  rel. à tout faisceau localement constant au voisinage de  $y$ . Alors  $p$  est localement acyclique rel. à  $E$ .*

Soient  $x$  un point géométrique de  $x$ , d'images  $y$  et  $s$  dans  $Y$  et  $S$ ,  $t \rightarrow S(s)$  un spécialisation,  $f_{(x)} : X(x) \rightarrow Y(y)$  le morphisme induit par  $f$ . Il s'agit de montrer que la restriction

$$E_x \rightarrow R\Gamma(X(x)_t, E|X(x)_t) \quad (*)$$

est un isomorphisme. On peut supposer  $A$  constant. D'après 5.2.4 et 5.2.5, pour toute spécialisation  $z \rightarrow Y(y)$ , la flèche de spécialisation

$$E_x = Rf_{(x)*}(E|X(x))_y \rightarrow Rf_{(x)*}(E|X(x))_z = R\Gamma(X(x)_z, E|X(x)_z)$$

est un isomorphisme, autrement dit  $Rf_{(x)*}(E|X(x))$  est constant de valeur  $E_x$ . L'hypothèse d'acyclicité sur  $q$  entraîne donc que la restriction

$$E_x \rightarrow R\Gamma(Y(y)_y, (E_x)|Y(y)_t) = R\Gamma(Y(y)_t, Rf_{(x)*}(E|X(x))|Y(y)_t)$$

est un isomorphisme. Mais cette flèche s'identifie à  $(*)$ , d'où la conclusion.

L'hypothèse de 5.2.7 sur  $q$  est vérifiée notamment lorsque  $q$  est lisse, et que  $A$  est annulé par un entier  $n$  inversible sur  $S$  [AGV72, XV]. D'autre part, si les hypothèses de 5.2.7 sont vérifiées après tout changement de base  $S' \rightarrow S$ , on conclut alors que  $p$  est universellement localement acyclique rel. à  $E$ . De ces remarques découle en particulier l'énoncé 2.14.

**Corollaire 5.2.8.** *Soient  $f : X \rightarrow S$  et  $E \in \mathrm{Ob} D^+(X)$ . On suppose que  $f$  est universellement localement acyclique rel. à  $E$ , que la formation de  $Rf_*E$  commute à tout changement de base fini, et que pour tout morphisme  $s' \rightarrow s$ , où  $s$  est un point géométrique de  $S$  et  $s'$  le spectre d'un corps séparablement clos, la flèche de changement de base  $R\Gamma(X_s, E|X_s) \rightarrow R\Gamma(X_{s'}, E|X_{s'})$  est un isomorphisme. Alors  $(f, E)$  est cohomologiquement propre (5.1.3).*

Soit  $f' : X' \rightarrow S'$  le morphisme déduit de  $f$  par un changement de base  $S' \rightarrow S$ , il s'agit de voir que la formation de  $Rf'_*(E|X')$  commute à tout changement de base fini. D'après 5.2.5, il suffit de montrer que, pour toute spécialisation  $u' : t' \rightarrow S'(s')$ , la flèche de cospécialisation  $\text{cosp}(u') : R\Gamma(X'_{t'}, E|X'_{t'}) \rightarrow R\Gamma(X'_{s'}, E|X'_{s'})$  est un isomorphisme. Soient  $s$  (resp.  $t$ ) le point géométrique image de  $s$  (resp.  $t$ ) dans  $S$ ,  $u : t \rightarrow S(s)$  la spécialisation définie par  $u'$ . On voit aisément qu'on a un carré commutatif

$$\begin{array}{ccc} R\Gamma(X_t, E|X_t) & \xrightarrow{\text{cosp}(u)} & R\Gamma(X_s, E|X_s) \\ \downarrow & & \downarrow \\ R\Gamma(X'_{t'}, E|X'_{t'}) & \xrightarrow{\text{cosp}(u')} & R\Gamma(X'_{s'}, E|X'_{s'}) \end{array}$$

où les flèches verticales sont les flèches de changement de base. Par hypothèse, celles-ci sont des isomorphismes. D'autre part (5.2.4)  $\text{cosp}(u)$  est un isomorphisme, donc  $\text{cosp}(u')$  est un isomorphisme, ce qui achève la démonstration.

Voici un exemple d'application de 5.2.8. Supposons  $A$  annulé par un entier  $n$  inversible sur  $S$ ,  $f$  localement de type fini et universellement localement acyclique. Soient  $x$  un point géométrique de  $X$ , d'image  $s$  dans  $S$ ,  $f_{(x)} : X(x) \rightarrow S(s)$  le morphisme induit par  $f$ . Il résulte de 5.2.6 et 1.9 (par passage à la limite) que les hypothèses de 5.2.8 sont vérifiées par le couple  $(f_{(x)}, E|X(x))$ , qui est donc cohomologiquement propre.

### 5.2.9

Supposons  $A$  constant. Soient  $f : X \rightarrow S$ , et  $E \in \text{Ob } D^+(X)$  le complexe de tor-dimension finie. Nous dirons que  $f$  est *fortement localement acyclique* rel. à  $E$  si, pour tout point géométrique  $x$  de  $X$ , d'image  $s$  dans  $S$ , toute spécialisation  $t \rightarrow S(s)$ , et tout  $A^\circ$ -module  $M$ , la flèche de restriction

$$E_x \otimes_A^L M \rightarrow R\Gamma(X(x)_t, (E|X(x)_t) \otimes_A^L M)$$

est un isomorphisme. J'ignore si “localement acyclique” implique “fortement localement acyclique.”

**Proposition 5.2.10.** *Sous les hypothèses de 5.2.9, supposons  $A$  noethérien de torsion,  $S$  noethérien, et  $f$  fortement localement acyclique rel. à  $E$ . Alors, pour tout diagramme à carrés cartésiens*

$$\begin{array}{ccccc} X & \xleftarrow{j} & X' & \xleftarrow{j'} & X'' \\ \downarrow f & & \downarrow f' & & \downarrow f'' \\ S & \xleftarrow{i} & S' & \xleftarrow{i'} & S'', \end{array}$$

avec  $i$  quasi-fini et  $i'$  immersion ouverte, et tout  $F \in \text{Ob } D^+(S'', A^\circ)$ , la flèche canonique

$$j^* E \otimes f'^* Ri'_* F \rightarrow Rj'_*((jj')^* E \otimes f''^* F) \quad (*)$$

est un isomorphisme.

On comparera cet énoncé avec [AGV72, XV 1.17].

Démontrons 5.2.10. On se ramène facilement à  $S = S'$ , strictement local, et  $F$  constructible, concentré en degré 0. On résout alors  $F$  à droite par des sommes finies de faisceaux de la forme  $u_* M$ , où  $u : t \rightarrow S$  est un point géométrique et  $M$  un  $A^\circ$ -module. L'hypothèse implique que  $(*)$  est un isomorphisme pour  $F = u_* M$ , d'où le résultat.

# Chapitre 8

## Catégories dérivées

### 1 Catégories triangulées : définitions et exemples

#### 1.1 Définition des catégories triangulées

##### 1.1.0

Soient  $\mathcal{A}$  une catégorie additive,  $T$  un automorphisme additif de  $\mathcal{A}$ .  $X$  et  $Y$  étant deux objets de  $\mathcal{A}$ , nous poserons

$$\mathrm{hom}^i(X, Y) = \mathrm{hom}_{\mathcal{A}}(X, T^i(Y)) \quad i \in \mathbb{Z}$$

Soient  $X, Y, Z$  trois objets de  $\mathcal{A}$ ,  $\alpha \in \mathrm{hom}^i(X, Y)$ ,  $\beta \in \mathrm{hom}^j(X, Y)$ . Nous définirons le composé  $\beta \circ \alpha$  appartenant à  $\mathrm{hom}^{i+j}(X, Z)$  par :

$$\beta \circ \alpha = \beta \circ T^i(\alpha).$$

On vérifie qu'on obtient ainsi une nouvelle catégorie dont les groupes de morphismes entre les objets sont gradués. Cette nouvelle catégorie sera appelée, par abus de langage : la catégorie  $\mathcal{A}$ , graduée par le foncteur de translation  $T$ .

Soit  $\mathcal{A}$  une catégorie graduée par un foncteur de translation  $T$ . Lorsqu'on nommera ou notera un morphisme sans spécifier le degré, il s'agira toujours d'un morphisme de degré zéro.

Soient  $\mathcal{A}$  et  $\mathcal{A}'$  deux catégories additives graduées par les foncteurs  $T$  et  $T'$ ,  $F$  un foncteur additif de  $\mathcal{A}$  dans  $\mathcal{A}'$ . On dira que  $F$  est gradué si l'on s'est donné un isomorphisme de foncteurs<sup>1</sup>

$$F \circ T = T' \circ F$$

La définition des morphismes de foncteurs gradués est donnée au 4.1.1.

$\mathcal{A}$  étant une catégorie additive graduée par le foncteur  $T$ , on appellera triangle, un ensemble de trois objets  $X, Y, Z$  et de trois morphismes  $u : X \rightarrow Y$ ,  $v : Y \rightarrow Z$ ,  $w : Z \rightarrow T(X)$  ( $\deg w = 1$ ). Pour désigner les triangles on utilisera la notation :  $(X, Y, Z, u, v, w)$  ou bien le diagramme :

$$\begin{array}{ccc} & Z & \\ w \swarrow & & \nwarrow v \\ X & \xrightarrow{u} & Y \end{array} \quad \deg(w) = 1$$

Soient  $(X, Y, Z, u, v, w)$ ,  $(X', Y', Z', u', v', w')$  deux triangles de  $\mathcal{A}$ ; un morphisme du premier triangle dans le second est un ensemble de trois morphismes  $f : X \rightarrow X'$ ,  $g : Y \rightarrow Y'$ ,  $h : Z \rightarrow Z'$ , tels que le diagramme suivant soit commutatif :

$$\begin{array}{ccccccc} X & \xrightarrow{u} & Y & \xrightarrow{v} & Z & \xrightarrow{w} & T(X) \\ \downarrow f & & \downarrow g & & \downarrow h & & \downarrow T(f) \\ X' & \xrightarrow{u'} & Y' & \xrightarrow{v'} & Z' & \xrightarrow{w'} & T(X') \end{array}$$

1. Texte modifié en 1976 : le texte original demandait une égalité  $F \circ T = T' \circ F$ . Le cas des foncteurs à plusieurs variables est discuté dans [AGV72, XVIII 0.2]. Il pose un problème de signes.



## 1.1.1

On appelle *catégorie triangulée* une catégorie additive graduée par un foncteur de translation, munie d'une famille de triangles qu'on appelle famille des triangles distingués. Cette famille doit vérifier de plus les axiomes :

**TR1** Tout triangle isomorphe à triangle distingué est distingué. Tout morphisme  $u : X \rightarrow Y$  est contenu dans un triangle distingué  $(X, Y, Z, u, v, w)$ . Le triangle  $(X, X, 0, \text{id}_X, 0, 0)$  est distingué.

**TR2** Pour que  $(X, Y, Z, u, v, w)$  soit distingué, il faut et il suffit que  $(Y, Z, T(X), v, w, -T(u))$  soit distingué.

**TR3**  $(X, Y, Z, u, v, w)$ ,  $(X', Y', Z', u', v', w')$  étant distingués, pour tout morphisme  $(f, g) : u \rightarrow u'$ , il existe un morphisme  $h : Z \rightarrow Z'$  tel que  $(f, g, h)$  soit un morphisme de triangles.

**TR4**

$$\begin{array}{ccccc}
 & Z' & & X' & & Y' \\
 & \swarrow \text{deg}=1 & \nwarrow i & \swarrow \text{deg}(j)=1 & \nwarrow & \swarrow \text{deg}=1 \\
 X & \xrightarrow{u} & Y & Y & \xrightarrow{v} & Z & X & \xrightarrow{w} & Z
 \end{array}$$

étant trois triangles distingués tels que  $w = v \circ u$ , il existe deux morphismes  $f : Z' \rightarrow Y'$ ,  $g : Y' \rightarrow X'$  tels que

1.  $(\text{id}_X, v, f)$  soit un morphisme de triangle
2.  $(u, \text{id}_Z, g)$  soit un morphisme de triangle
3.  $(Z', Y', X', f, g, T(i)j)$  soit un triangle distingué

$\mathcal{C}$  et  $\mathcal{C}'$  étant deux catégories triangulées, on appelle *foncteur exact* de  $\mathcal{C}$  dans  $\mathcal{C}'$ , tout foncteur additif, gradué, transformant les triangles distingués en triangles distingués. Les morphismes de foncteurs exacts sont les morphismes de foncteurs gradués.

On déduit immédiatement des axiomes TR1, TR2, TR3 la propriété suivante :

**Proposition 1.1.2.** Soient  $(X, Y, Z, u, v, w)$  un triangle distingué et  $M$  un objet d'une catégorie triangulée. On a alors les suites exactes :

$$\begin{aligned}
 \dots &\longrightarrow \text{hom}^i(M, X) \xrightarrow{\text{hom}(M, u)} \text{hom}^i(M, Y) \xrightarrow{\text{hom}(M, v)} \text{hom}^i(M, Z) \xrightarrow{\text{hom}(M, w)} \text{hom}^{i+1}(M, X) \longrightarrow \dots \\
 \dots &\longrightarrow \text{hom}^i(Z, M) \xrightarrow{\text{hom}(v, M)} \text{hom}^i(Y, M) \xrightarrow{\text{hom}(u, M)} \text{hom}^i(X, M) \xrightarrow{\text{hom}(w, M)} \text{hom}^{i+1}(Z, M) \longrightarrow \dots
 \end{aligned}$$

On déduit alors de cette proposition des énoncés du genre :

- $(f, g, h)$  étant un morphisme de triangle distingué et  $f, g$  des isomorphismes.
- Les triangles distingués construits sur un morphisme (TR1), sont tous isomorphismes (*mais les isomorphismes ne sont pas, en général, uniquement déterminés*).
- Lorsque dans un triangle distingué, un des morphismes admet un noyau ou un conoyau, celui-ci se scinde i.e. il est de la forme :

$$\begin{array}{ccc}
 & Z + T(X) & \\
 & \swarrow \quad \nwarrow & \\
 X + Y & \xrightarrow{\quad} & Y + Z
 \end{array}$$

- La somme de deux triangles distingués est distinguée. (On utilise l'axiome TR4).

## 1.2 Exemples

### 1.2.1

Nous allons d'abord fixer quelques notations. Soit  $\mathcal{A}$  une catégorie additive  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  désignera la catégorie suivante :

- Les objets de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  seront les complexes de  $\mathcal{A}$ , sans limitation de degré, à différentielle de degré  $+1$ .
- Les morphismes de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  seront les morphismes de complexes (qui commutent avec la différentielle) conservant le degré.

Soit  $T$  le foncteur suivant : pour tout objet  $X^\bullet$  de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$

$$\begin{aligned} T(X^\bullet)_i &= (X^\bullet)_{i+1} \\ d_i(T(X^\bullet)) &= -d_{i+1}(X^\bullet). \end{aligned}$$

Sur les morphismes le foncteur  $T$  agit de la manière suivante : pour tout morphisme  $f : X^\bullet \rightarrow Y^\bullet$ , le morphisme  $T(f) : T(X^\bullet) \rightarrow T(Y^\bullet)$  est défini par

$$T(f)_i = f_{i+1}.$$

On vérifie immédiatement que  $T$  est un automorphisme additif de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$ . Les morphismes de degré  $n$ , définis à l'aide de ce foncteur de translation, sont alors les morphismes qui augmentent le degré de  $n$ , et qui commutent ou anticommute avec la différentielle suivant la parité de  $n$ . On retrouve ainsi la définition généralement adoptée.

$\mathcal{C}$  désignera la famille de triangles suivante : un triangle  $(X^\bullet, Y^\bullet, Z^\bullet, u, v, w)$  est un élément de la famille si<sup>2</sup>

- $Z^\bullet$  est le complexe simple associé au complexe double

$$\cdots \longrightarrow 0 \longrightarrow X^\bullet \xrightarrow{u} Y^\bullet \longrightarrow 0 \longrightarrow \cdots$$

où les objets de  $Y^\bullet$  sont les objets de premier degré zéro, et les objets de  $X^\bullet$ , les objets de premier degré  $-1$ .

- $v$  est l'image par le foncteur : complexe double  $\mapsto$  complexe simple, du morphisme de doubles complexes :

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & 0^\bullet & \longrightarrow & Y^\bullet \longrightarrow 0 \longrightarrow \cdots \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \cdots & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & X^\bullet & \longrightarrow & Y^\bullet \longrightarrow 0 \longrightarrow \cdots \end{array}$$

- $w$  est l'opposé de l'image, par le même foncteur, du morphisme de doubles complexes :

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & X^\bullet & \longrightarrow & 0 \longrightarrow 0 \longrightarrow \cdots \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ \cdots & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & X^\bullet & \longrightarrow & Y^\bullet \longrightarrow 0 \longrightarrow \cdots \end{array}$$

### 1.2.2

L'ensemble des morphismes homotopes à zéro est un idéal bilatère (si  $f$  et  $g$  sont composables et si  $f$  ou  $g$  homotope à zéro, la composée est homotope à zéro. Si  $f$  et  $g$  sont homotopes à zéro, le morphisme  $f \oplus g$  est homotope à zéro). Pour tout couple d'objet  $X^\bullet, Y^\bullet$  on désigne par  $\text{Htp}(X^\bullet, Y^\bullet)$  le sous-groupe de  $\text{hom}_{\mathbf{C}(\mathcal{A})}(X^\bullet, Y^\bullet)$  des morphismes homotopes à zéro.  $\mathbf{K}(\mathcal{A})$  sera alors la catégorie dont les objets sont les objets de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  et les morphismes de source  $X^\bullet$  et de but  $Y^\bullet$ , le groupe :

$$\text{hom}_{\mathbf{C}(\mathcal{A})}(X^\bullet, Y^\bullet) / \text{Htp}(X^\bullet, Y^\bullet).$$

La loi de composition sur les morphismes de  $\mathbf{K}(\mathcal{A})$  se définit à partir de la loi de composition sur les morphismes de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  en passant au quotient.  $\mathbf{K}(\mathcal{A})$  est une catégorie additive. Le foncteur de translation  $T$  sur  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  passe

2. Texte modifié en 1976, pour assurer la validité de 1.2.4.

au quotient (le translaté d'un morphisme homotope à zéro, est homotope à zéro). Le foncteur obtenu est un automorphisme additif de  $K(\mathcal{A})$  que nous noterons encore  $T$ . Par abus de notation  $K(\mathcal{A})$  désignera par la suite la catégorie  $K(\mathcal{A})$  graduée par le foncteur  $T$ .

On appellera triangle distingué dans  $K(\mathcal{A})$ , tout triangle *isomorphe* à un triangle provenant de  $\mathcal{C}$ . La famille des triangles distingués vérifie les axiomes TR1, TR2, TR3 et TR4. Par abus de notation  $K(\mathcal{A})$  désignera la catégorie  $K(\mathcal{A})$  triangulée par la famille de triangles définie ci-dessus.

### 1.2.3

On définit de plus tout un arsenal de sous-catégories :

- Un complexe est dit borné inférieurement si tous ses objets de degré négatif, sauf au plus un nombre fini, sont nuls. On définit de même les complexes bornés supérieurement, les complexes bornés. On désignera par  $K^+(\mathcal{A})$ ,  $K^-(\mathcal{A})$ ,  $K^b(\mathcal{A})$  les sous-catégories pleines de  $K(\mathcal{A})$  engendrées par ses familles d'objets. Ces sous-catégories sont des “*sous-catégories triangulées*” de  $K(\mathcal{A})$  : tout triangle distingué dont deux des objets sont des objets de la sous-catégorie, est isomorphe à un triangle dont les trois objets sont des objets de la sous-catégorie.
- Supposons que  $\mathcal{A}$  soit une catégorie abélienne. Un complexe est dit cohomologiquement borné inférieurement si tous ses objets de cohomologie de degré négatif sont nuls sauf un nombre fini d'entre eux. On définit de manière analogue les complexes cohomologiquement bornés supérieurement, les complexes cohomologiquement bornés, les complexes acycliques.  $K^{\infty,+}(\mathcal{A})$ ,  $K^{\infty,-}(\mathcal{A})$ ,  $K^{\infty,b}(\mathcal{A})$ ,  $K^{\infty,\emptyset}(\mathcal{A})$  désigneront les sous-catégories pleines engendrées par ces familles d'objets. Ce sont des sous-catégories triangulées.

On paiera aussi des sous-catégories triangulées  $K^{+,b}(\mathcal{A})$ ,  $K^{+,\emptyset}(\mathcal{A})$ , ... etc ... (le premier signe en exposant donne des renseignements sur les objets des complexes, le deuxième signe sur les objets de cohomologie).

- $\mathcal{A}$  n'étant plus nécessairement abélienne, soit  $O$  un ensemble d'objets de  $\mathcal{A}$  stable par isomorphisme et par somme directe.  $O(\mathcal{A})$  désignera la sous-catégorie pleine de  $C(\mathcal{A})$  engendrée par les complexes dont les objets en tout degré sont des objets de  $O$ . On notera  $\underline{O}(\mathcal{A})$  la sous-catégorie triangulée correspondante dans  $K(\mathcal{A})$ .  $\mathcal{A}$  étant abélienne, on pourra prendre pour ensemble  $O$ , l'ensemble  $I$  des injectifs ou l'ensemble  $P$  des projectifs.

### 1.2.4

$K(\mathcal{A})$  est uniquement déterminée par la donnée de  $C(\mathcal{A})$  et de la famille  $\mathcal{C}$ . De manière précise : tout foncteur additif gradué de  $C(\mathcal{A})$  dans une catégorie triangulée, transformant tout triangle de  $\mathcal{C}$  en un triangle distingué, se factorise de manière unique par  $K(\mathcal{A})$ , et le foncteur obtenu est exact.

Pour tout complexe  $X^\bullet$  de  $C(\mathcal{A})$ ,  $\bar{X}^\bullet$  désignera le complexe obtenu à partir de  $X^\bullet$  en annulant la différentielle. Une suite à trois termes :

$$0 \longrightarrow X^\bullet \longrightarrow Y^\bullet \longrightarrow Z^\bullet \longrightarrow 0$$

sera dite suite semi-scindée si la suite

$$0 \longrightarrow \bar{X}^\bullet \longrightarrow \bar{Y}^\bullet \longrightarrow \bar{Z}^\bullet \longrightarrow 0$$

est scindée ; i.e. si elle est isomorphe à la suite :

$$0 \longrightarrow \bar{X}^\bullet \longrightarrow \bar{X}^\bullet + \bar{Z}^\bullet \longrightarrow \bar{Z}^\bullet \longrightarrow 0.$$

Soit  $0 \rightarrow X^\bullet \rightarrow Y^\bullet \rightarrow Z^\bullet \rightarrow 0$  une suite semi-scindée. Choisissons un scindage i.e. pour tout  $n$  un isomorphisme

$$(Y^\bullet)^n \simeq (X^\bullet)^n + (Z^\bullet)^n.$$

La matrice de la différentielle de  $Y^\bullet$ , dans la décomposition en somme directe si-dessus est de la forme :

$$\begin{pmatrix} d_{X^\bullet} & \varphi_n \\ 0 & d_{Y^\bullet} \end{pmatrix}$$

où  $\varphi_n$  est un morphisme de  $(Z^\bullet)^n$  dans  $(X^\bullet)^{n+1}$ . Les  $\varphi_n$  déterminent un morphisme de complexes

$$\varphi : Z^\bullet \rightarrow T(X^\bullet).$$

Lorsqu'on change le scindage, la classe modulo homotopie de  $\varphi$  ne change pas. De plus, en notant  $\underline{u}, \underline{v}, \underline{\varphi}$  les images dans  $\mathbf{K}(\mathcal{A})$  des morphismes  $u, v, \varphi$ , le triangle  $(X^\bullet, Y^\bullet, Z^\bullet, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\varphi})$  est distingué. Désignons par  $\mathbf{SSS}(\mathcal{A})$  la catégorie des suites semi-scindées de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$ , et par  $\mathbf{TrK}(\mathcal{A})$  la catégorie des triangles distingués de  $\mathbf{K}(\mathcal{A})$ . Ce qui précède permet de définir un foncteur :

$$\rho : \mathbf{SSS}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathbf{TrK}(\mathcal{A}).$$

Ce foncteur est essentiellement surjectif.

### 1.3 Exemples de foncteurs cohomologiques et de foncteurs exacts

**Définition 1.3.1.** Soient  $\mathcal{A}$  une catégorie triangulée,  $\mathcal{B}$  une catégorie abélienne. Un foncteur additif  $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  est dit foncteur cohomologique si pour tout triangle distingué  $(X, Y, Z, u, v, w)$  la suite

$$F(X) \xrightarrow{F(u)} F(Y) \xrightarrow{F(v)} F(Z)$$

est exacte.

Le foncteur  $F \circ T^i$  sera souvent noté  $F^i$ . En vertu de l'axiome TR2 des catégories triangulées, on a la suite exacte illimitée :

$$\dots \longrightarrow F^i(X) \longrightarrow F^i(Y) \longrightarrow F^i(Z) \longrightarrow F^{i+1}(X) \longrightarrow \dots$$

#### 1.3.2 Exemples

1. Soit  $\mathcal{A}$  une catégorie triangulée. Pour tout objet  $X$  de  $\mathcal{A}$  le foncteur  $\mathrm{hom}_{\mathcal{A}}(X, -)$  est un foncteur cohomologique. Le foncteur  $\mathrm{hom}_{\mathcal{A}}(-, X)$  est un foncteur cohomologique  $\mathcal{A}^\circ \rightarrow \mathbf{Ab}$ .
2. Soient  $\mathcal{A}$  une catégorie abélienne,  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  la catégorie des complexes de  $\mathcal{A}$ . On désigne par  $H^0 : \mathbf{C}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{A}$  le foncteur suivant : Soit  $X^\bullet$  un objet de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$ . On pose

$$H^0(X^\bullet) = \ker d^0 / \mathrm{im} d^{-1}.$$

$H^0$  annule les morphismes homotopes à zéro, donc se factorise de manière unique par  $\mathbf{K}(\mathcal{A})$ . On désignera encore par  $H^0 : \mathbf{K}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{A}$  le foncteur obtenu.

#### 1.3.3 Exemple de bi-foncteur exact

Soient  $\mathcal{A}, \mathcal{A}', \mathcal{A}''$  trois catégories additives,

$$P : \mathcal{A} \times \mathcal{A}' \rightarrow \mathcal{A}''$$

un foncteur bilinéaire (i.e. additif par rapport à chacun des arguments séparément). On en déduit alors le foncteur bilinéaire :

$$P^* : \mathbf{C}(\mathcal{A}) \times \mathbf{C}(\mathcal{A}') \rightarrow \mathbf{C}(\mathcal{A}'')$$

de la manière suivante :

Soient  $X^\bullet$  un objet de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  et  $Y^\bullet$  un objet de  $\mathbf{C}(\mathcal{A}')$ .  $P(X^\bullet, Y^\bullet)$  est un complexe double de  $\mathcal{A}''$ . On pose alors :  $P^*(X^\bullet, Y^\bullet) = \text{complexe simple associé à } P(X^\bullet, Y^\bullet)$ .

Soient  $f$  un morphisme de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  (resp.  $\mathbf{C}(\mathcal{A}')$ ) homotope à zéro et  $Z^\bullet$  un objet de  $\mathbf{C}(\mathcal{A}')$  (resp.  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$ ). Le morphisme  $P^*(f, Z^\bullet)$  (resp.  $P^*(Z^\bullet, f)$ ) est alors homotope à zéro. On en déduit que  $P^*$  définit d'une manière unique un foncteur :

$$P^\bullet : \mathbf{K}(\mathcal{A}) \times \mathbf{K}(\mathcal{A}') \rightarrow \mathbf{K}(\mathcal{A}'').$$

$P^\bullet$  est un bi-foncteur exact.

En particulier, soit  $\mathcal{A}$  une catégorie additive. On peut prendre pour  $P$  le foncteur :

$$\begin{aligned}\mathcal{A}^\circ \times \mathcal{A} &\rightarrow \mathbf{Ab} \\ (X, Y) &\mapsto \mathrm{hom}(X, Y)\end{aligned}$$

On obtient alors par la construction précédente un foncteur

$$\mathrm{hom}^\bullet : K(\mathcal{A})^\circ \times K(\mathcal{A}) \rightarrow K(\mathbf{Ab})$$

qui, composé avec le foncteur  $H^0 : K(\mathbf{Ab}) \rightarrow \mathbf{Ab}$ , redonne évidemment le foncteur  $\mathrm{hom}_{K(\mathcal{A})}$ .

## 2 Les catégories quotients

### 2.1 Sous-catégories épaisses. Systèmes multiplicatifs de morphismes

Nous commencerons par donner deux définitions.

**Définition 2.1.1.** Une sous-catégorie  $\mathcal{B}$  d'une catégorie triangulée  $\mathcal{A}$  est dite épaisse si  $\mathcal{B}$  est une sous-catégorie triangulée pleine de  $\mathcal{A}$  et si de plus  $\mathcal{B}$  possède la propriété suivante :

Pour tout morphisme  $f : X \rightarrow Y$ , se factorisant par un objet de  $\mathcal{B}$  et contenu dans un triangle distingué  $(X, Y, Z, f, g, h)$ , où  $Z$  est un objet de  $\mathcal{B}$ , la source de  $f$  et le but de  $f$  sont des objets de  $\mathcal{B}$ .

L'ensemble des sous-catégories épaisses de  $\mathcal{A}$  sera noté  $\mathcal{N}$ .

L'intersection d'une famille quelconque de sous-catégories épaisses est une sous-catégorie épaisse.

**Définition 2.1.2.** Soit  $\mathcal{A}$  une catégorie triangulée. Un ensemble  $S$  de morphismes de  $\mathcal{A}$  est appelé système multiplicatif de morphismes si'il possède les cinq propriétés suivantes :

**FR1** Si  $f, g \in S$  et si  $f$  et  $g$  sont composables,  $f \circ g \in S$ . Pour tout objet  $X$  de  $\mathcal{A}$ , le morphisme identique de  $X$  est un élément de  $S$ .

**FR2** Dans la catégorie  $\mathcal{A}$ , tout diagramme

$$\begin{array}{ccc} & Y & \\ & \downarrow s \in S & \\ Z & \xrightarrow{f} & X \end{array}$$

se complète en un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc} P & \xrightarrow{g} & Y \\ \downarrow t \in S & & \downarrow s \in S \\ Z & \xrightarrow{f} & X \end{array}$$

De plus la propriété symétrique est vraie.

**FR3** Si  $f$  et  $g$  sont des morphismes, les propriétés suivantes sont équivalentes :

- i) il existe un  $s \in S$  tel que  $s \circ f = s \circ g$
- ii) il existe un  $t \in S$  tel que  $f \circ t = g \circ t$

**FR4** Soit  $T$  le foncteur de translation de  $\mathcal{A}$ . Pour tout élément  $s$  de  $S$ ,  $T(s) \in S$ .

**FR5**  $(X, Y, Z, u, v, w), (X', Y', Z', u', v', w')$  étant deux triangles distingués,  $f$  et  $g$  deux éléments de  $S$  tels que le couple  $(f, g)$  soit un morphisme de  $u$  dans  $u'$ , il existe un morphisme  $h \in S$ , tel que  $(f, g, h)$  soit un morphisme de triangle.

Un système multiplicatif de morphismes est dit *saturé* s'il possède la propriété suivante :

Un morphisme  $f$  appartient à  $S$  si et seulement s'il existe deux morphismes  $g$  et  $g'$  tels que  $g \circ f \in S$  et  $f \circ g' \in S$ .

L'intersection d'une famille quelconque de systèmes multiplicatifs saturés un système multiplicatif saturé.

L'ensemble des systèmes multiplicatifs saturés sera noté  $\mathcal{S}$ .

Soit  $\mathcal{B}$  une sous-catégorie épaisse ; on désigne par  $\varphi(\mathcal{B})$  l'ensemble des morphismes  $f$  qui sont contenus dans un triangle distingué  $(X, Y, Z, f, g, h)$  où  $Z$  est un objet de  $\mathcal{B}$ .  $\varphi(\mathcal{B})$  est un système multiplicatif saturé.

Soit  $S$  un système multiplicatif saturé ; on désigne par  $\psi(S)$  la sous-catégorie pleine engendrée par les objets  $Z$  contenus dans un triangle distingué  $(X, Y, Z, f, g, h)$  où  $f$  est un élément de  $S$ . La sous-catégorie  $\psi(S)$  est une sous-catégorie épaisse.

Le résultat principal de ce numéro est alors le suivant :  $\varphi$  est un isomorphisme (conservant la relation d'ordre définie par l'inclusion) de  $\mathcal{N}$  sur  $\mathcal{S}$ . L'isomorphisme inverse n'est autre que  $\psi$ .

## 2.2 Problèmes universels

Soient  $\mathcal{A}$  et  $\mathcal{A}'$  deux catégories triangulées et  $F$  un foncteur exacte de  $\mathcal{A}$  dans  $\mathcal{A}'$ . Soient  $S(F)$  l'ensemble des morphismes de  $\mathcal{A}$  qui sont transformés par  $F$  en isomorphismes et  $\mathcal{B}(F)$  la sous-catégorie pleine engendrée par les objets de  $\mathcal{A}$  qui sont transformés par  $F$  en objets nuls de  $\mathcal{A}'$ .  $S(F)$  est un système multiplicatif saturé et  $\mathcal{B}(F)$  est une sous-catégorie épaisse. De plus  $S(F) = \varphi(\mathcal{B}(F))$ . Soient alors  $\mathcal{A}$  une catégorie triangulée,  $\mathcal{B}$  une sous-catégorie épaisse et  $S = \varphi(\mathcal{B})$  le système multiplicatif saturé correspondant. Les deux problèmes universels ci-dessous sont équivalents.

**Problème 1** Trouver une catégorie triangulée  $\mathcal{A}/\mathcal{B}$  et un foncteur exact  $Q : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}/\mathcal{B}$  tels que tout foncteur exact de  $\mathcal{A}$  dans une catégorie triangulée  $\mathcal{A}'$ , transformant les objets de  $\mathcal{B}$  en objets nuls de  $\mathcal{A}'$ , admette, de manière unique, une factorisation de la forme  $G \circ Q$  où  $G$  est un foncteur exact.

**Problème 2** Trouver une catégorie triangulée  $\mathcal{A}_S$  et un foncteur exact  $Q : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}_S$  tels que tout foncteur exact de  $\mathcal{A}$  dans une catégorie triangulée  $\mathcal{A}'$ , transformant les morphismes de  $S$  en isomorphismes de  $\mathcal{A}'$ , admette, de manière unique, une factorisation de la forme  $G \circ Q$  où  $G$  est un foncteur exact.

(Le rédacteur prie le lecteur de bien vouloir l'excuser pour l'emploi de ce langage désuet et rétrograde.) Nous allons montrer, dans le numéro suivant, que le problème 2 admet une solution. Donc le problème 1 correspondant admet la même solution.

## 2.3 Calcul de fraction

### 2.3.1

Soient  $\mathcal{A}$  une catégorie triangulée,  $S$  un système multiplicatif saturé. Désignons par  $\mathcal{A}[S^{-1}]$  la catégorie de fraction de  $\mathcal{A}$  pour l'ensemble de morphismes  $S$  et  $Q$  le foncteur canonique de  $\mathcal{A}$  dans  $\mathcal{A}[S^{-1}]$ . Le couple  $(\mathcal{A}[S^{-1}], Q)$  résout le problème suivant : Tout foncteur de  $\mathcal{A}$  dans une catégorie quelconque (non nécessairement additive) transformant morphisme de  $S$  en isomorphisme, se factorise, d'une manière unique, par  $(\mathcal{A}[S^{-1}], Q)$ . Un tel couple existe toujours, sans hypothèse sur l'ensemble de morphismes  $S$  [GZ67, 1.1]<sup>3</sup>. Cependant l'ensemble de morphismes  $S$ , étant un système multiplicatif saturé, possède les propriétés FR1, FR2, FR3. Par suite, d'après [GZ67], la catégorie  $\mathcal{A}[S^{-1}]$  peut s'obtenir par un calcul de fractions, à droite ou à gauche. Nous allons rappeler comment on obtient  $\mathcal{A}[S^{-1}]$  par un calcul de fractions à droite. (Le calcul de fractions à gauche s'obtient par le procédé du renversement des flèches.)

3. The original text references [C.G.G] here. Most likely, this is the lost work *Catégories et foncteurs* by Chevalley, Gabriel and Grothendieck, referenced in [Sch72].

## 2.3.2

Les objets de  $\mathcal{A}[S^{-1}]$  sont les objets de  $\mathcal{A}$ .

- Pour tout objet  $X$  de  $\mathcal{A}$ , désignons par  $S_X$  la catégorie des flèches appartenant à  $S$ , ayant pour but  $X$ . À tout objet  $Y$  de  $\mathcal{A}$ , on associe, fonctoriellement en  $Y$ , le foncteur suivant sur  $S_X^\circ$  à valeur dans la catégorie des ensembles : ( $S_X^\circ$  désigne la catégorie opposée)

$$H_Y : s \mapsto \text{hom}(\text{source}(s), Y).$$

On pose alors :

$$\text{hom}_{\mathcal{A}[S^{-1}]}(X, Y) = \varinjlim_{S_X^\circ} H_Y.$$

Pour tout ce qui concerne les limites inductives, on se référera à [Art62].

On constatera alors, avec plaisir en utilisant FR1, FR2, FR3 que la catégorie  $S_X^\circ$  possède les propriétés L1, L2, L3. Les limites inductives possèdent donc toutes les bonnes propriétés des limites inductives sur les ensembles ordonnés filtrants.

- Soient  $X, Y, Z$ , trois objets de  $\mathcal{A}$ ,  $a$  un élément de  $\text{hom}_{\mathcal{A}[S^{-1}]}(X, Y)$  et  $b$  un élément de  $\text{hom}_{\mathcal{A}[S^{-1}]}(Y, Z)$ . Soient  $s$  un objet de  $S_X$ ,  $\underline{a}$  un élément de  $\text{hom}(\text{source}(s), Y)$  dont l'image est  $a$  et un objet de  $S_y$ ,  $\underline{b}$  un élément de  $\text{hom}(\text{source}(t), Z)$  dont l'image est  $b$ . On a alors un diagramme :

$$\begin{array}{ccccc} & & \bullet & & \bullet \\ & \swarrow s & & \searrow \underline{a} & \\ X & & & & Y \\ & \nwarrow t & & \swarrow \underline{b} & \\ & & & & Z \end{array} \quad (1)$$

que, d'après FR2, on peut compléter en un diagramme :

$$\begin{array}{ccccc} & & \bullet & & \\ & \swarrow t' & & \searrow \underline{c} & \\ & \bullet & & \bullet & \\ & \swarrow s & & \searrow \underline{a} & \\ X & & & & Y \\ & \nwarrow t & & \swarrow \underline{b} & \\ & & & & Z \end{array}$$

Notons  $b \circ a$  l'image dans  $\text{hom}_{\mathcal{A}[S^{-1}]}(X, Z)$  du morphisme  $\underline{b} \circ \underline{c}$ . On vérifie que grâce aux propriétés FR1, FR2, FR3,  $b \circ a$  ne dépend pas des représentants  $\underline{a}$  et  $\underline{b}$  choisis et qu'il ne dépend pas non plus de la manière de compléter le diagramme (1). On vérifie de plus qu'on a ainsi défini une catégorie  $\mathcal{A}[S^{-1}]$ .

Nous noterons  $Q$  le foncteur évident :  $\mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}[S^{-1}]$ .

$\mathcal{A}$  étant une catégorie additive,  $\mathcal{A}[S^{-1}]$  est une catégorie additive. De plus, on démontre en utilisant FR4 qu'il existe un et un seul foncteur de translation sur  $\mathcal{A}[S^{-1}]$ , que nous noterons  $T$ , vérifiant la relation :

$$Q \circ T = T \circ Q.$$

Enfin, à l'aide de FR5, on démontre qu'il existe une et une seule structure triangulée sur  $\mathcal{A}[S^{-1}]$  telle que le foncteur  $Q$  soit exact. Les triangles distingués de  $\mathcal{A}[S^{-1}]$  ne sont que les triangles isomorphes aux images, par  $Q$ , des triangles distingués de  $\mathcal{A}$ . En désignant par  $\mathcal{A}_S$ , la catégorie  $\mathcal{A}[S^{-1}]$  muni de cette structure triangulée, on démontre sans difficulté que le couple  $(\mathcal{A}_S, Q)$  est une solution au problème 2.

**Définition 2.3.3.** Soient  $\mathcal{A}$  une catégorie triangulée,  $\mathcal{B}$  une sous-catégorie épaisse de  $\mathcal{A}$ ,  $(Q, \mathcal{A}/\mathcal{B})$  la solution du problème 1 (§2.2).  $\mathcal{A}/\mathcal{B}$  sera appelée la catégorie quotient de  $\mathcal{A}$  par  $\mathcal{B}$ .  $Q$  sera appelé le foncteur canonique de passage au quotient. Plus généralement soit  $\mathcal{N}$  une sous-catégorie triangulée de  $\mathcal{A}$  et soit  $\underline{\mathcal{N}}$  la plus petite sous-catégorie épaisse contenant  $\mathcal{N}$ . La catégorie quotient de  $\mathcal{A}$  par  $\mathcal{N}$  :  $\mathcal{A}/\underline{\mathcal{N}}$  sera par définition  $\mathcal{A}/\underline{\mathcal{N}}$ .

## 2.4 Propriétés des catégories quotients

### 2.4.1

Soient  $\mathcal{A}$  une catégorie triangulée et  $H$  un foncteur cohomologique à valeur dans une catégorie abélienne  $\mathcal{G}$ . Soient  $\mathcal{B}_H$  la sous-catégorie pleine engendrée par les objets dont tous les translatés sont transformés par  $H$  en objets nuls de  $\mathcal{G}$  et  $S_H$  l'ensemble des morphismes dont tous les translatés sont transformés par  $H$  en isomorphismes de  $\mathcal{G}$ .  $\mathcal{B}_H$  est une sous-catégorie épaisse de  $\mathcal{A}$ ;  $S_H$  est un système multiplicatif saturé. De plus  $S_H = \varphi(\mathcal{B}_H)$  (§2.1). Le foncteur  $H$  se factorise d'une manière unique par  $(Q, \mathcal{A}/\mathcal{B}_H)$ .

**Théorème 2.4.2.** *Soient  $\mathcal{A}$  une catégorie triangulée,  $\mathcal{B}$  une sous-catégorie triangulée,  $\mathcal{N}$  une sous-catégorie épaisse de  $\mathcal{A}$ ,  $S = \varphi(\mathcal{N})$  le système multiplicatif saturé correspondant.*

(a) *La catégorie  $\mathcal{N} \cap \mathcal{B}$  est une sous-catégorie épaisse de  $\mathcal{B}$ . Le système multiplicatif correspondant est  $S \cap \mathcal{B}$ .*

(b) *Les deux propriétés suivantes sont équivalentes :*

(i) *Pour tout objet  $X$  de  $\mathcal{B}$  et tout morphisme  $s : R \rightarrow X$  où  $s$  est un élément de  $S$ , il existe un morphisme  $s' : R' \rightarrow R$  où  $s \circ s'$  est un élément de  $S \cap \mathcal{B}$ ; et  $R' \in \text{Ob } \mathcal{B}$ .*

(ii) *Tout morphisme d'un objet  $X$  de  $\mathcal{B}$  dans un objet  $Y$  de  $\mathcal{N}$  se factorise par un objet de  $\mathcal{N} \cap \mathcal{B}$ .*

(c) *Les propriétés (i)' et (ii)' obtenues à partir de (i) et (ii) en renversant les flèches sont équivalentes.*

(d) *Si les propriétés (i) et (ii) sont vérifiées ou bien si les propriétés (i)' et (ii)' sont vérifiées, le foncteur canonique*

$$\mathcal{B}/\mathcal{N} \cap \mathcal{B} \longrightarrow \mathcal{A}/\mathcal{N}$$

*est fidèle.*

*Comme ce foncteur est injectif sur les objets, il réalise  $\mathcal{B}/\mathcal{N} \cap \mathcal{B}$  comme sous-catégorie de  $\mathcal{A}/\mathcal{N}$ .*

(e) *Si de plus  $\mathcal{B}$  est une sous-catégorie pleine de  $\mathcal{A}$ ,  $\mathcal{B}/\mathcal{N} \cap \mathcal{B}$  est une sous-catégorie pleine de  $\mathcal{A}/\mathcal{N}$ .*

**Corollaire 2.4.3.** *Soient  $\mathcal{A} \subset \mathcal{B} \subset \mathcal{C}$  trois catégories triangulées,  $\mathcal{A}$  sous-catégorie épaisse de  $\mathcal{B}$ ,  $\mathcal{B}$  sous-catégorie épaisse de  $\mathcal{C}$ . Alors  $\mathcal{A}$  est une sous-catégorie épaisse de  $\mathcal{C}$ ,  $\mathcal{B}/\mathcal{A}$  est une sous-catégorie épaisse de  $\mathcal{C}/\mathcal{A}$ . Le foncteur canonique  $\mathcal{C}/\mathcal{B} \rightarrow (\mathcal{C}/\mathcal{A})/(\mathcal{B}/\mathcal{A})$  est un isomorphisme.*

## 2.5 Propriétés du foncteur de passage au quotient

Soient  $\mathcal{A}$  une catégorie triangulée,  $\mathcal{B}$  une sous-catégorie épaisse,  $S$  le système multiplicatif correspondant,  $Q : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}/\mathcal{B}$  le foncteur canonique de passage au quotient.

**Proposition 2.5.1.**  *$X$  et  $Y$  étant des objets de  $\mathcal{A}$ , les assertions suivantes sont équivalentes :*

(a) *Tout morphisme  $f : X \rightarrow Y$ , tel qu'il existe un morphisme  $s : Z \rightarrow X$ , de  $S$ , vérifiant  $f \circ s = 0$ , est un morphisme nul.*

(b) *Tout morphisme  $f : X \rightarrow Y$ , tel qu'il existe un morphisme  $s : Y \rightarrow Z$ ,  $s \in S$ , vérifiant  $s \circ f = 0$ , est un morphisme nul.*

(c) *Tout morphisme  $f : X \rightarrow Y$  qui se factorise par un objet de  $\mathcal{B}$  est nul.*

(d) *L'application canonique :*

$$\text{hom}_{\mathcal{A}}(X, Y) \rightarrow \text{hom}_{\mathcal{A}/\mathcal{B}}(Q(X), Q(Y))$$

*est injective.*

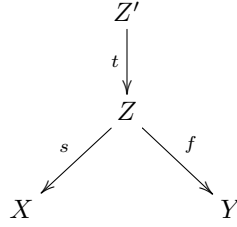
**Proposition 2.5.2.** *Soient  $X$  et  $Y$  deux objets de  $\mathcal{A}$ . Les assertions suivantes sont équivalentes :*

(a) *Tout diagramme ( $s \in S$ ) :*

$$\begin{array}{ccc} & Z & \\ s \swarrow & & \searrow f \\ X & & Y \end{array}$$



se compl'ete en un diagramme :  $(s, t \in S)$  :



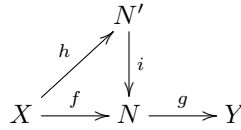
où  $f \circ t$  se factorise par  $(X, s \circ t)$ .

(b) Assertion obtenue en renversant le sens de flèches dans (a) et en permutant  $X$  et  $Y$ .

(c) Tout diagramme :

$$X \xrightarrow{f} N \xrightarrow{g} Y$$

où  $g \circ f = 0$  et où  $N$  est un objet de  $\mathcal{B}$ , se complète en un diagramme :



où  $f = i \circ h$  et où  $g \circ i = 0$ .

(d) Assertion obtenue en changeant le sens des flèches dans (c) et en permutant  $X$  et  $Y$ .

(e) L'application canonique :

$$\mathrm{hom}_{\mathcal{A}}(X, Y) \xrightarrow{Q} \mathrm{hom}_{\mathcal{A}/\mathcal{B}}(Q(X), Q(Y))$$

est surjective.

**Proposition 2.5.3.** Soit  $X$  un objet de  $\mathcal{A}$ . Les assertions suivantes sont équivalentes :

(a) Pour tout objet  $Y$  de  $\mathcal{A}$ , l'application canonique

$$\mathrm{hom}_{\mathcal{A}}(X, Y) \xrightarrow{Q} \mathrm{hom}_{\mathcal{A}/\mathcal{B}}(Q(X), Q(Y))$$

est un isomorphisme.

(b) Tout morphisme de  $X$  dans un objet de  $\mathcal{B}$  est nul.

De même, les deux assertions suivantes sont équivalentes :

(a)' Pour tout objet  $Y$  de  $\mathcal{A}$ , l'application canonique :

$$\mathrm{hom}_{\mathcal{A}}(X, Y) \xrightarrow{Q} \mathrm{hom}_{\mathcal{A}/\mathcal{B}}(Q(X), Q(Y))$$

est un isomorphisme.

(b)' Tout morphisme d'un objet de  $\mathcal{B}$  dans  $X$  est nul.

**Définition 2.5.4.** Tout objet possédant les propriétés équivalentes (a) et (b) de la proposition précédente, sera appelé : objet libre à gauche sur  $\mathcal{A}/\mathcal{B}$  ou bien encore objet  $Q$ -libre à gauche. De même, tout objet possédant les propriétés équivalentes (a)' et (b)' sera appelé objet libre à droite sur  $\mathcal{A}/\mathcal{B}$  ou encore objet  $Q$ -libre à droite. Il est défini à isomorphisme près par la connaissance de  $Q(X) \in \mathrm{Ob} \mathcal{A}/\mathcal{B}$ .

## 2.6 Foncteurs adjoints au foncteur de passage au quotient

**Définition 2.6.1.** Deux sous-catégories triangulées  $\mathcal{N}$  et  $\mathcal{N}'$  d'une catégorie triangulée  $\mathcal{A}$  sont dites orthogonales si pour tout objet  $X$  de  $\mathcal{N}$  et tout objet  $Y$  de  $\mathcal{N}'$ , on a :

$$\mathrm{hom}_{\mathcal{A}}(X, Y) = 0$$

$\mathcal{N}'$  sera dite alors orthogonale à droite à  $\mathcal{N}$  et  $\mathcal{N}$  orthogonale à gauche à  $\mathcal{N}'$ .

**Proposition 2.6.2.** Soit  $\mathcal{N}$  une sous-catégorie triangulée d'une catégorie triangulée  $\mathcal{A}$ . La catégorie pleine  $\mathcal{N}^\perp$  (resp.  ${}^\perp\mathcal{N}$ ) engendrée par les objets  $X$  de  $\mathcal{A}$  tels que pour tout objet  $Y$  de  $\mathcal{N}$  on ait  $\mathrm{hom}_{\mathcal{A}}(Y, X) = 0$  (resp.  $\mathrm{hom}_{\mathcal{A}}(X, Y) = 0$ ), est une sous-catégorie épaisse de  $\mathcal{A}$ . La catégorie  $\mathcal{N}^\perp$  est appelée par abus de langage, l'orthogonale à droite de  $\mathcal{N}$ .

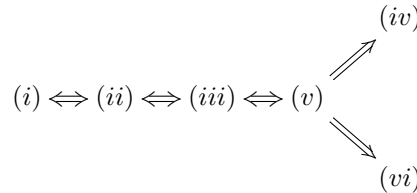
Cette proposition nous permet de traduire la proposition 2.5.3.

**Proposition 2.6.3.** Soit  $\mathcal{B} \subset \mathcal{A}$ , une sous-catégorie épaisse d'une catégorie triangulée  $\mathcal{A}$ . La catégorie pleine engendrée par les objets libre à droite sur  $\mathcal{A}/\mathcal{B}$  (resp. à gauche), n'est autre que l'orthogonale à droite (resp. à gauche) de  $\mathcal{B}$ .

**Proposition 2.6.4.** Soient  $\mathcal{A}$  une catégorie triangulée,  $\mathcal{B}$  une sous-catégorie épaisse de  $\mathcal{A}$ ,  $\mathcal{B}^\perp$  l'orthogonale à droite de  $\mathcal{B}$ ,  $S(\mathcal{B})$ ,  $s(\mathcal{B}^\perp)$  les systèmes multiplicatifs correspondants,  $Q$  et  $Q^\perp$  les foncteurs canoniques de passage au quotient. Considérons pour un objet  $x$  de  $\mathcal{A}$ , les propriétés suivantes :

- (i)  $X$  s'envoie par un morphisme de  $S(\mathcal{B})$  dans un objet de  $\mathcal{B}^\perp$ .
- (ii)  $X$  reçoit par un morphisme de  $S(\mathcal{B}^\perp)$  un objet de  $\mathcal{B}$ .
- (iii) La catégorie  $S_X(\mathcal{B})$  des flèches de  $S(\mathcal{B})$  de source  $X$ , admet un objet final.
- (iv) La catégorie  $S^X(\mathcal{B}^\perp)$  des flèches de  $S(\mathcal{B}^\perp)$  de but  $X$ , admet un objet initial.
- (v) La catégorie  $\mathcal{B}/X$  des objets de  $\mathcal{B}$  au-dessus de  $X$ , admet un objet final.
- (vi) La catégorie  $\mathcal{B}^\perp/X$  des objets de  $\mathcal{B}^\perp$  au-dessous de  $X$  admet un objet initial.

On a alors



Si de plus  ${}^\perp(\mathcal{B}^\perp) = \mathcal{B}$  alors toutes les propriétés sont équivalentes.

Soient  $\mathcal{B}$  une sous-catégorie épaisse d'une catégorie triangulée  $\mathcal{A}$ , le foncteur d'injection  $i$  de  $\mathcal{B}$  dans  $\mathcal{A}$  et  $Q$  le foncteur de passage au quotient de  $\mathcal{A}$  dans  $\mathcal{A}/\mathcal{B}$ ,  $\mathcal{B}^\perp$  l'orthogonale à droite de  $\mathcal{B}$ , les foncteurs correspondant  $i^\perp$  et  $Q^\perp$ . On déduit immédiatement de la proposition 2.6.4 les propositions suivantes :

**Proposition 2.6.5.** Les deux propriétés suivantes sont équivalentes :

- (i) Le foncteur  $i$  admet un adjoint à droite.
- (ii) Le foncteur  $Q$  admet un adjoint à droite.

La proposition est encore vraie lorsqu'on remplace le mot droite par le mot gauche.

**Proposition 2.6.6.** Les deux propriétés suivantes sont équivalentes :

- (i) Le foncteur  $i$  admet un adjoint à droite.
- (ii) Le foncteur  $i^\perp$  admet un adjoint à gauche. L'orthogonale à gauche de la catégorie  $\mathcal{B}^\perp$  est égale à  $\mathcal{B}$ .

**Proposition 2.6.7.** *Supposons vérifiées les propriétés des propositions 2.6.5 et 2.6.6. Soient  $i^*$  et  $Q^*$  les adjoints à droite de  $i$  et  $Q$ . De même soient  ${}^*i^\perp$  et  ${}^*Q^\perp$  les adjoints à gauche de  $i^\perp$  et de  $Q^\perp$ . Tous ces foncteurs sont exactes. De plus :*

*Il existe un isomorphisme fonctoriel  $Q^* \circ Q \xrightarrow{\sim} i^\perp \circ {}^*i^\perp$  tel que le diagramme ci-après soit commutatif :*

$$\begin{array}{ccc} & \text{id} & \\ \swarrow & & \searrow \\ Q^* \circ Q & \xrightarrow{\sim} & i^\perp \circ {}^*i^\perp \end{array}$$

(les flèches obliques sont définies par les propriétés d'adjonction).

*Il existe de même un isomorphisme  ${}^*Q^\perp \circ Q^\perp \xrightarrow{\sim} i \circ i^*$  tel que le diagramme suivant soit commutatif :*

$$\begin{array}{ccc} {}^*Q^\perp \circ Q^\perp & \xrightarrow{\sim} & i \circ i^* \\ & \searrow & \swarrow \\ & \text{id} & \end{array}$$

*Enfin, il existe un morphisme fonctoriel de degré 1 :  $\partial : i^\perp \circ {}^*i^\perp \rightarrow i \circ i^*$  tel que le triangle suivant soit distingué ( $\deg \partial = 1$ ) :*

$$\begin{array}{ccc} i^\perp \circ {}^*i^\perp & \xrightarrow{\partial} & i \circ i^* \\ & \searrow & \swarrow \\ & \text{id} & \end{array}$$

*Un tel morphisme  $\delta$  est unique et vérifie  $\delta(TX_0) = -T\delta(X)$  ( $X$  objet  $q \circ q$ ,  $T$  translation).*

### 3 Les catégories dérivées d'une catégorie abélienne

#### 3.1 Les catégories dérivées

On utilise les notations du 1.2.3. On utilisera de plus les notations suivantes :

##### 3.1.1 Notations

Soit  $\mathcal{A}$  une catégorie abélienne. On pose :

$$\begin{aligned} D(\mathcal{A}) &= K^{\infty, \infty}(\mathcal{A}) / K^{\infty, \emptyset}(\mathcal{A}) \\ D^b(\mathcal{A}) &= K^{b, b}(\mathcal{A}) / K^{b, \emptyset}(\mathcal{A}) \\ D^+(\mathcal{A}) &= K^{+, +}(\mathcal{A}) / K^{+, \emptyset}(\mathcal{A}) \\ D^-(\mathcal{A}) &= K^{-, -}(\mathcal{A}) / K^{-, \emptyset}(\mathcal{A}). \end{aligned}$$

**Proposition 3.1.2.** *Les foncteurs naturels qui figurent dans le diagramme suivant :*

$$\begin{array}{ccc} & D(\mathcal{A}) & \\ \nearrow & & \nwarrow \\ D^+(\mathcal{A}) & & D^-(\mathcal{A}) \\ \nwarrow & & \nearrow \\ & D^b(\mathcal{A}) & \end{array}$$

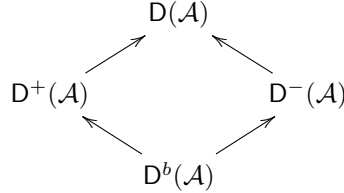
*sont pleinement fidèles.*

Les foncteurs naturels :

$$\begin{aligned} D^b(\mathcal{A}) &= K^{b,b}(\mathcal{A})/K^{b,\emptyset}(\mathcal{A}) \rightarrow K^{+,b}(\mathcal{A})/K^{+,\emptyset}(\mathcal{A}) \\ D^b(\mathcal{A}) &= K^{b,b}(\mathcal{A})/K^{b,\emptyset}(\mathcal{A}) \rightarrow K^{-,b}(\mathcal{A})/K^{-,\emptyset}(\mathcal{A}) \end{aligned}$$

sont des équivalences de catégories.

Les foncteurs du diagramme :



étant injectifs sur les objets, réalisent les catégories  $D^b(\mathcal{A})$ ,  $D^+(\mathcal{A})$ ,  $D^-(\mathcal{A})$  comme sous-catégories pleines de  $D(\mathcal{A})$ .

La preuve de cette proposition se trouve au théorème 2.4.2.

**Définition 3.1.3.** La catégorie  $D(\mathcal{A})$  sera appelée la catégorie dérivée de la catégorie  $\mathcal{A}$ . Les objets de  $D(\mathcal{A})$  isomorphes aux objets de  $D^b(\mathcal{A})$  seront appelés les objets bornés de  $D(\mathcal{A})$ . Les objets de  $D(\mathcal{A})$  isomorphes aux objets de  $D^+(\mathcal{A})$  seront appelés les objets limités à gauche, les objets de  $D(\mathcal{A})$  isomorphes aux objets de  $D^-(\mathcal{A})$ , seront appelés les objets limités à droite.

Nous désignerons par  $D$  le foncteur canonique :

$$D : C(\mathcal{A}) \rightarrow D(\mathcal{A}).$$

La “restriction” de  $D$  à la sous-catégorie pleine  $\mathcal{A}$  de  $C(\mathcal{A})$  sera encore noté  $D$ . Le foncteur  $D$  restreint à  $\mathcal{A}$  est pleinement fidèle. Le foncteur  $D$  se factorise d’une manière unique par  $K(\mathcal{A})$ . Soient  $X$  et  $Y$  deux objets de  $\mathcal{A}$ .

On vérifie sans difficulté que pour tout  $m \geq 0$ , les groupes :

$$\text{hom}_{D(\mathcal{A})}(D(X), T^{-m}D(Y)) \quad (T \text{ est le foncteur translation})$$

sont nuls. La dimension cohomologique de  $\mathcal{A}$  sera le plus petit des entiers  $n$  tels que pour tout  $m > n$  on ait :

$$\text{hom}_{D(\mathcal{A})}(D(X), T^m D(Y)) = 0 \quad \text{pour tout couple } X, Y \text{ d'objets de } \mathcal{A}.$$

S’il n’y a pas de tels entiers, on dira que la dimension cohomologique de  $\mathcal{A}$  est infinie.

Désignons par  $I^+(\mathcal{A})$  (resp.  $I(\mathcal{A})$ ) la sous-catégorie triangulée pleine de  $K^+(\mathcal{A})$  (resp. de  $K(\mathcal{A})$ ) définie par les complexes dont les objets sont injectifs en tout degré.

**Proposition 3.1.4.** Supposons que la catégorie  $\mathcal{A}$  possède suffisamment d’injectifs. Le foncteur naturel :

$$Q^+ : K^+(\mathcal{A}) \rightarrow D^+(\mathcal{A})$$

induit une équivalence de catégorie :

$$I^+(\mathcal{A}) \rightarrow D^+(\mathcal{A}).$$

Le foncteur quasi-inverse est un adjoint à droite de  $Q^+$ .

Si de plus  $\mathcal{A}$  est de dimension cohomologique finie, l’assertion précédente est encore vraie lorsqu’on y supprime les exposants  $+$ .

On a énoncé analogue concernant les projectifs.

La démonstration de la proposition 3.1.4 s’appuie sur 2.6.4.

La structure triangulée de  $D(\mathcal{A})$ , est précisée par la proposition suivante.

Soit  $\mathbf{E}(\mathcal{A})$  la catégorie des suites exactes à trois termes de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$ . La catégorie  $\mathbf{SSS}(\mathcal{A})$  des suites exactes semi-scindées (§1.2.4) est une sous-catégorie pleine de  $\mathbf{E}(\mathcal{A})$ . On a défini (Loc. cit.) un foncteur :

$$\rho : \mathbf{SSS}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathbf{TrK}(\mathcal{A})$$

où  $\mathbf{TrK}(\mathcal{A})$  désigne la catégorie des triangles distingués de  $\mathbf{K}(\mathcal{A})$ . On en déduit un foncteur

$$\sigma : \mathbf{SSS}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathbf{TrD}(\mathcal{A})$$

où  $\mathbf{TrD}(\mathcal{A})$  désigne la catégorie des triangles distingués de  $\mathbf{D}(\mathcal{A})$ .

**Proposition 3.1.5.** *Il existe un et un seul foncteur :*

$$\Pi : \mathbf{E}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathbf{TrD}(\mathcal{A})$$

de la forme ( $\deg \delta(S) = 1$ ) :

$$(S = 0 \rightarrow X^\bullet \rightarrow Y^\bullet \rightarrow Z^\bullet \rightarrow 0) \mapsto$$

$$\begin{array}{ccc} & D(Z^\bullet) & \\ \delta(S) \swarrow & & \nwarrow D(v) \\ D(X^\bullet) & \xrightarrow{D(u)} & D(Y^\bullet) \end{array}$$

dont la restriction à  $\mathbf{SSS}(\mathcal{A})$  soit  $\sigma$ . Ce foncteur est essentiellement surjectif.

**Proposition 3.1.6.** *Le foncteur cohomologique canonique :*

$$H^0 : \mathbf{K}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{A}$$

se factorise d'une manière unique par un foncteur que nous noterons encore  $H^0$

$$H^0 : \mathbf{D}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{A}.$$

Sur  $\mathbf{D}(\mathcal{A})$  le foncteur  $H^0$  et ses translatés  $H^i$  forment un système conservatif, i.e. un morphisme  $f : X^\bullet \rightarrow Y^\bullet$  et un isomorphisme si et seulement si pour tout entier  $i$

$$H^i(f) : H^i(X) \rightarrow H^i(Y)$$

est un isomorphisme.

**Définition 3.1.7.** *Un morphisme  $f : X^\bullet \rightarrow Y^\bullet$  de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  (resp. de  $\mathbf{K}(\mathcal{A})$ ) est appelé un quasi-isomorphisme lorsque pour tout entier  $i$*

$$H^i(f) : H^i(X) \rightarrow H^i(Y)$$

*est un isomorphisme.*

D'après la proposition précédente les quasi-isomorphismes sont les morphismes qui deviennent des isomorphismes dans  $\mathbf{D}(\mathcal{A})$ .

**Définition 3.1.8.** *Soient  $\sigma$  un ensemble d'objets de  $\mathcal{A}$ ,  $X^\bullet$  un objet de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  (resp.  $\mathbf{K}(\mathcal{A})$ ). Une résolution droite (reps. gauche) de type  $\sigma$  de  $X^\bullet$ , est un quasi-isomorphisme  $X^\bullet \rightarrow V^\bullet$  (resp.  $V^\bullet \rightarrow X^\bullet$ ) où  $V^\bullet$  est un complexe dont tous les objets appartiennent à  $\sigma$ . On dira résolution injective (resp. projective) au lieu de résolution droite (resp. gauche) de type injectif (resp. projectif).*

De manière générale, on se permettra de supprimer les mots “droite” ou “gauche” lorsqu’aucune ambiguïté n’en résultera.

**Proposition 3.1.9.** *1. Supposons que tout objet de  $\mathcal{A}$  s'injecte dans un objet de  $\sigma$  (resp. soit quotient d'un objet de  $\sigma$ ). Alors tout objet de  $\mathbf{C}^+(\mathcal{A})$  (resp. de  $\mathbf{C}^-(\mathcal{A})$ ) admet une résolution droite (resp. gauche) de type  $\sigma$  dans  $\mathbf{C}^+(\mathcal{A})$  (resp. dans  $\mathbf{C}^-(\mathcal{A})$ ).*

*2. Supposons de plus qu'il existe un entier  $n$  tel que pour toute suite exacte :*

$$Y^0 \rightarrow Y^1 \rightarrow \dots \rightarrow Y^{n-1} \rightarrow Y^n \rightarrow 0$$

$$(resp. 0 \rightarrow Y^n \rightarrow Y^{n-1} \rightarrow \dots \rightarrow Y^1 \rightarrow Y^0)$$

*d'objets de  $\mathcal{A}$  ou pour tout  $i$ ,  $0 \leq i \leq n-1$ ,  $Y^i$  est un objet de  $\sigma$ , l'objet  $Y^n$  soit un objet de  $\sigma$ . Alors tout objet de  $\mathbf{C}(\mathcal{A})$  admet une résolution droite (resp. gauche) de type  $\sigma$ .*

### 3.2 Etude des Ext

Soient  $X^\bullet$  et  $Y^\bullet$  deux objets de  $\mathcal{C}(\mathcal{A})$  (resp.  $\mathcal{K}(\mathcal{A})$ ) et  $D : \mathcal{C}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{D}(\mathcal{A})$  (resp.  $Q : \mathcal{K}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{D}(\mathcal{A})$ ) le foncteur canonique.

**Définition 3.2.1.** On appelle  $i$ -ème hyper-ext et on note :

$$(X^\bullet, Y^\bullet) \mapsto \text{Ext}^i(X^\bullet, Y^\bullet)$$

le foncteur :  $\text{hom}_{\mathcal{D}(\mathcal{A})}(D(X^\bullet), T^i D(Y^\bullet))$  (resp.  $\text{hom}_{\mathcal{D}(\mathcal{A})}(Q(X^\bullet), T^i Q(Y^\bullet))$ ).

**Proposition 3.2.2.** Soit  $0 \rightarrow X^\bullet \rightarrow Y^\bullet \rightarrow Z^\bullet \rightarrow 0$  une suite exacte de  $\mathcal{C}(\mathcal{A})$ . Soit  $V^\bullet$  un objet de  $\mathcal{C}(\mathcal{A})$ . On a les suites exactes illimitées :

$$\cdots \rightarrow \text{Ext}^i(V^\bullet, X^\bullet) \rightarrow \text{Ext}^i(V^\bullet, Y^\bullet) \rightarrow \text{Ext}^i(V^\bullet, Z^\bullet) \xrightarrow{\delta} \text{Ext}^{i+1}(V^\bullet, X^\bullet) \rightarrow \cdots$$

$$\cdots \rightarrow \text{Ext}^i(Z^\bullet, V^\bullet) \rightarrow \text{Ext}^i(Y^\bullet, V^\bullet) \rightarrow \text{Ext}^i(X^\bullet, V^\bullet) \xrightarrow{\delta} \text{Ext}^{i+1}(Z^\bullet, V^\bullet) \rightarrow \cdots$$

Soient  $X^\bullet$  et  $Y^\bullet$  deux objets de  $\mathcal{K}(\mathcal{A})$ . On désigne par  $\text{Qis}/X^\bullet$  (resp.  $\text{Qis}^+/X^\bullet$ ,  $\text{Qis}^-/X^\bullet$ ,  $\text{Qis}^b/X^\bullet$ ) la catégorie des quasi-isomorphismes de but  $X^\bullet$  et de source dans  $\mathcal{K}(\mathcal{A})$  (resp.  $\mathcal{K}^+(\mathcal{A})$ ,  $\mathcal{K}^-(\mathcal{A})$ ,  $\mathcal{K}^b(\mathcal{A})$ ). De même on définit les catégories  $Y^\bullet/\text{Qis}$ ,  $Y^\bullet/\text{Qis}^+$ ,  $\dots$  (quasi-isomorphismes de source  $Y^\bullet$ ).

On se propose de résumer dans la proposition suivante les différentes définitions équivalentes des  $\text{Ext}^i$ .

**Proposition 3.2.3.** 1. Il existe des isomorphismes de foncteurs :

$$\text{Ext}^0(X^\bullet, Y^\bullet) = \text{hom}_{\mathcal{D}(\mathcal{A})}(Q(X^\bullet), Q(Y^\bullet)) \xrightarrow{\sim} \varinjlim_{(\text{Qis}/X^\bullet)^\circ} \text{hom}_{\mathcal{K}(\mathcal{A})}(-, Y^\bullet) \xrightarrow{\sim} \varinjlim_{Y^\bullet/\text{Qis}} \text{hom}_{\mathcal{K}(\mathcal{A})}(X^\bullet, -)$$

$$\varinjlim_{Y^\bullet/\text{Qis}} \text{hom}_{\mathcal{K}(\mathcal{A})}(X^\bullet, -) \xrightarrow{\sim} \varinjlim_{(\text{Qis}/X^\bullet)^\circ \times Y^\bullet/\text{Qis}} \text{hom}_{\mathcal{K}(\mathcal{A})}(-, -).$$

Si  $X^\bullet$  est un objet de  $\mathcal{K}^-(\mathcal{A})$  :

$$\text{Ext}^0(X^\bullet, Y^\bullet) \xrightarrow{\sim} \varinjlim_{(\text{Qis}^-/X^\bullet)^\circ} \text{hom}_{\mathcal{K}(\mathcal{A})}(-, Y^\bullet)$$

Si  $Y^\bullet$  est un objet de  $\mathcal{K}^+(\mathcal{A})$  :

$$\text{Ext}^0(X^\bullet, Y^\bullet) \xrightarrow{\sim} \varinjlim_{Y^\bullet/\text{Qis}} \text{hom}_{\mathcal{K}(\mathcal{A})}(X^\bullet, -)$$

Si  $X^\bullet$  est un objet de  $\mathcal{K}^-(\mathcal{A})$  et si  $Y^\bullet$  est un objet de  $\mathcal{K}^b(\mathcal{A})$  :

$$\text{Ext}^0(X^\bullet, Y^\bullet) \xrightarrow{\sim} \varinjlim_{Y^\bullet/\text{Qis}^b} \text{hom}_{\mathcal{K}(\mathcal{A})}(X^\bullet, -)$$

Si  $X^\bullet$  est un objet de  $\mathcal{K}^b(\mathcal{A})$  et  $Y^\bullet$  un objet de  $\mathcal{K}^+(\mathcal{A})$  :

$$\text{Ext}^0(X^\bullet, Y^\bullet) \xrightarrow{\sim} \varinjlim_{(\text{Qis}^b/X^\bullet)^\circ} \text{hom}_{\mathcal{K}(\mathcal{A})}(-, Y^\bullet)$$

Si la catégorie  $\mathcal{A}$  possède suffisamment d'injectif et si  $Y^\bullet$  est un objet de  $\mathcal{K}^+(\mathcal{A})$ ,  $Y^\bullet$  admet une résolution injective et une seule (à isomorphisme près dans  $\mathcal{K}^+(\mathcal{A})$ ) :

$$Y^\bullet \rightarrow I(Y^\bullet)$$

et on a :

$$\text{Ext}^0(X^\bullet, Y^\bullet) \xrightarrow{\sim} \text{hom}_{\mathcal{K}(\mathcal{A})}(X^\bullet, I(Y^\bullet)).$$

On a de même un énoncé analogue pour les projectifs. Si la catégorie  $\mathcal{A}$  admet suffisamment d'injectifs et si  $\mathcal{A}$  est de dimension cohomologique finie, tout objet  $Y^\bullet$  de  $K(\mathcal{A})$  admet une résolution injective et une seule :

$$Y^\bullet \rightarrow I(Y^\bullet)$$

et on a :

$$\mathrm{Ext}^0(X^\bullet, Y^\bullet) \xrightarrow{\sim} \mathrm{hom}_{K(\mathcal{A})}(X^\bullet, I(Y^\bullet))$$

Énoncé analogue pour les projectifs.

**Remarque :** En explicitant l'isomorphisme de la proposition 3.2.3(3), on retrouve la définition de Yoneda.

## 4 Les foncteurs dérivés

### 4.1 Définition des foncteurs dérivés

**Définition 4.1.1.** Soient  $\mathcal{C}$  et  $\mathcal{C}'$  deux catégories graduées (on désigne par  $T$  le foncteur de translation de  $\mathcal{C}$  et de  $\mathcal{C}'$ ),  $F$  et  $G$  deux foncteurs gradués de  $\mathcal{C}$  dans  $\mathcal{C}'$ . Un morphisme de foncteurs gradués et un morphisme de foncteurs :

$$u : F \rightarrow G$$

qui possède la propriété suivante :

Pour tout objet  $X$  de  $\mathcal{C}$  le diagramme suivant est commutatif :

$$\begin{array}{ccc} F(TX) & \xrightarrow{u(TX)} & G(TX) \\ \uparrow \wr & & \uparrow \wr \\ TF(X) & \xrightarrow{Tu(X)} & TG(X) \end{array}$$

Soient  $\mathcal{C}$  et  $\mathcal{C}'$  deux catégories triangulées. On désigne par  $\mathrm{Fex}(\mathcal{C}, \mathcal{C}')$  la catégorie des foncteurs exacts de  $\mathcal{C}$  dans  $\mathcal{C}'$ , le morphismes entre deux foncteurs étant les morphismes de foncteurs gradués.

Soient  $\mathcal{A}$  et  $\mathcal{B}$  deux catégories abéliennes de  $\Phi : K^*(\mathcal{A}) \rightarrow K^*(\mathcal{B})$  un foncteur exact ( $*$  et  $'$  désignent l'un des signes  $+$ ,  $-$ ,  $b$ , ou  $v$  "vide"). Le foncteur canonique  $Q : K^*(\mathcal{A}) \rightarrow D^*(\mathcal{A})$  nous donne, par composition, un foncteur

$$\mathrm{Fex}(D^*(\mathcal{A}), D^{*'}(\mathcal{B})) \longrightarrow \mathrm{Fex}(K^*(\mathcal{A}), D^{*'}(\mathcal{B}))$$

d'où (en désignant aussi par  $Q'$  le foncteur canonique  $K^{*'}(\mathcal{B}) \rightarrow D^{*'}(\mathcal{B})$ ) un foncteur :  $\%$  (resp.  $\%'$ ) :  $\mathrm{Fex}(D^*(\mathcal{A}), D^{*'}(\mathcal{B})) \rightarrow \mathrm{Ab}$  :

$$\begin{aligned} \Psi &\mapsto \mathrm{hom}(Q' \circ \Phi, \Psi \circ Q) \\ (\text{resp. } \Psi &\mapsto \mathrm{hom}(\Psi \circ Q, Q' \circ \Phi)). \end{aligned}$$

**Définition 4.1.2.** On dira que  $\Phi$  admet un foncteur dérivé total à droite (resp. à gauche) si le foncteur  $\%$  (resp.  $\%'$ ) est représentable. Un objet représentant le foncteur  $\%$  (resp.  $\%'$ ) sera appelé foncteur dérivé total à droite (resp. à gauche) de  $\Phi$  et sera noté  $R\Phi$  (resp.  $L\Phi$ ).<sup>4</sup>

#### 4.1.3 Notations

Soient  $\mathcal{A}$  et  $\mathcal{B}$  deux catégories abéliennes et  $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  un foncteur additif. Le foncteur dérivé total à droite du foncteur  $K^+(f) : K^+(\mathcal{A}) \rightarrow K^+(\mathcal{B})$  sera noté  $R^+f$ . On définit de même  $R^-f$ ,  $Rf$ ,  $L^+f$ ,  $L^-f$ ,  $Lf$ .

Soit de même  $F : K^*(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{B}$ , un foncteur cohomologique. Le foncteur canonique de passage au quotient  $Q : K^*(\mathcal{A}) \rightarrow D^*(\mathcal{A})$  définit par composition un foncteur :

$$\mathrm{Foco}(D^*(\mathcal{A}), \mathcal{B}) \longrightarrow \mathrm{Foco}(K^*(\mathcal{A}), \mathcal{B})$$

( $\mathrm{Foco}(-, -)$  désigne la catégorie des foncteurs cohomologiques) d'où un foncteur  $\%$  (resp.  $\%'$ )  $\mathrm{Foco}(D^*(\mathcal{A}), \mathcal{B}) \rightarrow \mathrm{Ab}$ ,  $G \mapsto \mathrm{hom}(F, G \circ Q)$  (resp.  $G \mapsto \mathrm{hom}(G \circ Q, F)$ ).

4. Une définition plus maniable (et en pratique équivalente) est donnée dans [AGV72, XVII 1.2].

**Définition 4.1.4.** *On dira que le foncteur  $F$  admet un foncteur dérivé cohomologique à droite (resp. à gauche) si le foncteur  $\%$  (resp.  $\%'$ ) est représentable. Un objet représentant le foncteur  $\%$  (resp.  $\%'$ ) sera appelé foncteur dérivé cohomologique à droite (resp. à gauche) et sera noté  $RF$  (resp.  $LF$ ).*

#### 4.1.5 Notations

Soient  $\mathcal{A}$  et  $\mathcal{B}$  deux catégories abéliennes et  $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  un foncteur additif. Le foncteur dérivé cohomologique à droite du foncteur :

$$H^0 \circ K^+ f : K^+(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{B}$$

sera noté  $R^+ f$ . Lorsqu'aucune confusion n'en résultera le foncteur  $R^+ f \circ T^i$  ( $T$  est le foncteur de translation) sera noté  $R^i f$ . Le foncteur dérivé cohomologique à droite du foncteur  $H \circ Kf$  sera noté  $Rf$ . Lorsqu'aucune confusion n'en résultera le foncteur  $Rf \circ T^i$  sera noté  $R^i f$ .

On définit de même les foncteurs  $L^- f$ ,  $Lf$ ,  $L^i f$ .

#### 4.1.6 Remarques

Ces définitions contiennent, ainsi que nous le verrons dans le numéro suivant, la définition classique des foncteurs dérivés lorsque les catégories ont suffisamment d'injectifs ou de projectifs et que les complexes sont convenablement limités. Elles sont cependant plus générales. Mais sans autres hypothèses elles sont peu maniables. Par exemple, soit  $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  un foncteur additif entre deux catégories abéliennes. Supposons que les foncteurs  $R^+ f$  et  $Rf$  existent. Je ne sais pas démontrer que  $Rf$  induit sur  $D^+(\mathcal{A})$  le foncteur  $R^+ f$ . Supposons de plus que le foncteur  $R^+ f$  (dérivé cohomologique) existe. Je ne sais pas démontrer que le foncteur  $H^0 \circ R^+ f$  est isomorphe au foncteur  $R^+ f$ . Cependant dans la pratique ces propriétés seront vérifiées.

### 4.2 Existence des foncteurs dérivés

**Proposition 4.2.1.** *Les hypothèses sont celles de la définition 4.1.4. Supposons en outre que  $\mathcal{A}$  soit un  $\mathcal{U}$ -catégorie, où  $\mathcal{U}$  est un univers tel que l'ensemble  $\mathbb{Z}$  des entiers rationnel soit un élément de  $\mathcal{U}$ , telle que l'ensemble des objets de  $\mathcal{A}$  soit un élément de  $\mathcal{U}$ . Supposons de plus que la catégorie  $\mathcal{B}$  soit la catégorie des  $\mathcal{U}$ -groupes abéliens ou plus généralement la catégorie des faisceaux de  $\mathcal{U}$ -groupes abéliens sur un  $\mathcal{U}$ -site quelconque. (Un  $\mathcal{U}$ -site est une  $\mathcal{U}$ -catégorie, dont l'ensemble des objets est un élément de  $\mathcal{U}$ , munie d'une topologie.) Le foncteur  $F$  admet un foncteur dérivé cohomologique à droite. Ce foncteur se calcule de la manière suivante :*

*Soient  $X$  un objet de  $D^*(\mathcal{A})$ ,  $\underline{X}$  l'objet de  $K^*(\mathcal{A})$  au-dessus de  $X$ . On a alors un isomorphisme fonctoriel :*

$$RF(X) = \varinjlim_{\underline{X}/Q^{is*}} F(-).$$

En particulier soit  $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  un foncteur additif. Les foncteurs  $Rf$  et  $R^+ f$  existent et se calculent de la manière indiquée ci-dessus. Le foncteur  $Rf$  induit sur  $D^+(\mathcal{A})$  le foncteur  $R^+ f$ . Comme aucune confusion ne peut alors en résulter, nous emploierons la notation  $R^i f$ .

#### 4.2.2 Remarques

On peut exprimer la proposition 4.2.1 sous une forme plus générale dans le cadre des catégories triangulées. Les hypothèses à faire sur la catégorie  $\mathcal{B}$ , pour assurer la validité de la proposition 4.2.1 sont des hypothèses d'existence et d'exactitude des limites inductives suivant les  $\mathcal{U}$ -catégories pseudo-filtrantes, dont les ensembles d'objets sont éléments de  $\mathcal{U}$ . La proposition 4.2.1 introduit une dissymétrie entre les foncteurs dérivés droits et les foncteurs dérivés gauches tout au moins dans la pratique.

**Théorème 4.2.3.** *Les données sont celles de la définition 4.1.2. On se donne de plus une sous-catégorie triangulée pleine de  $K^*(\mathcal{A}) : \mathcal{C}$ , et on désigne par  $\mathcal{N}$  la sous-catégorie triangulée pleine des objets de  $\mathcal{C}$  qui sont acycliques. Supposons que*

(1) *Tout objet de  $\mathcal{N}$  soit transformé par  $\Phi$  en objet acyclique de  $K^{*'}(\mathcal{B})$ .*



- (2) Tout objet  $X$  de  $K^*(\mathcal{A})$  soit source (resp. but) d'un quasi-isomorphisme dont le but (resp. la source) soit un objet de  $\mathcal{C}$ .
- a) Alors  $\Phi$  admet un foncteur dérivé total à droite (resp. à gauche).
- b) Le foncteur  $R\Phi$  (resp.  $L\Phi$ ) s'obtient de la manière suivante :  
 La restriction du foncteur  $Q' \circ \Phi : K^*(\mathcal{A}) \rightarrow D^{*'}(\mathcal{B})$  à la catégorie  $\mathcal{C}$  s'annule sur les objets de  $\mathcal{N}$ , donc se factorise par  $\mathcal{C}/\mathcal{N}$ . On obtient ainsi un foncteur  $\Phi' : \mathcal{C}/\mathcal{N} \rightarrow D^{*'}(\mathcal{B})$ . Mais le foncteur naturel :  $\mathcal{C}/\mathcal{N} \rightarrow D^*(\mathcal{A})$  est une équivalence de catégories (théorème 2.4.2). D'où en composant avec le foncteur quasi-inverse le foncteur  $R\Phi$  (resp.  $L\Phi$ ).
- c) Soit  $X$  un objet de  $K^*(\mathcal{A})$ . Soient  $Y$  un objet de  $\mathcal{C}$  et  $X \rightarrow Y$  (resp.  $Y \rightarrow X$ ) un quasi-isomorphisme. L'objet  $R\Phi \circ Q(X)$  (resp.  $L\Phi \circ Q(X)$ ) est isomorphe à  $Q \circ \Phi(Y)$ .
- d) Le foncteur  $X \mapsto R\Phi \circ Q(X)$  (resp.  $X \mapsto L\Phi \circ Q(X)$ ) est isomorphe au foncteur :  $X \mapsto \varinjlim_{X/Q^{is*}} Q \circ \Phi(-)$  (resp.  $X \mapsto \varinjlim_{Q^{is*}/X} Q \circ \Phi(-)$ ).
- e) Le foncteur  $H^0 \circ \Phi : K^*(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{B}$ , admet un foncteur dérivé cohomologique à droite (resp. à gauche) qui n'est autre que le foncteur  $H^0 \circ R\Phi$  (resp.  $H^0 \circ L\Phi$ ).

**Corollaire 4.2.4.** Supposons que  $*$  = + (resp.  $*$  = -) dans les hypothèses du théorème précédent, et que  $\mathcal{A}$  possède suffisamment d'injectifs (resp. de projectifs). Alors le théorème 4.2.3 s'applique en prenant pour  $\mathcal{C}$  la catégorie des complexes injectifs (resp. projectifs). Supposons de plus que  $\mathcal{A}$  soit de dimension cohomologique finie, alors le théorème s'applique, sans restriction sur  $*$ , en prenant sur  $\mathcal{C}$  la catégorie des complexes injectifs (resp. projectifs).

**Définition 4.2.5.** Soient  $\mathcal{A}$  et  $\mathcal{B}$  deux catégories abéliennes et  $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  un foncteur additif.

On dira que  $f$  est de dimension cohomologique finie à droite (resp. à gauche) si  $R^+f$  (resp.  $L^-f$ ) existe et s'il existe un entier  $m \geq 0$  tel que pour tout entier  $n > m$ ,  $R^n f$  (resp.  $L^{-n} f$ ) soit nul sur les objets provenant de  $\mathcal{A}$  par le foncteur  $D$ . La dimension cohomologique à droite (resp. à gauche) de  $f$  est alors le plus petit des entiers  $m$  possédant la propriété ci-dessus. Si  $R^+f$  (resp.  $L^-f$ ) existe et si  $f$  n'est pas de dimension cohomologique finie, on dira que  $f$  est de dimension cohomologique infinie.

Un objet  $X$  de  $\mathcal{A}$  sera dit  $f$ -acyclique à droite (resp. à gauche) si pour tout entier  $n > 0$ ,  $R^n f(D(X)) = 0$  (resp.  $L^{-n} f(D(X)) = 0$ ).

**Corollaire 4.2.6.** Les données sont celles de la définition 4.2.5. Supposons qu'il existe un ensemble  $\sigma$  d'objets de  $\mathcal{A}$  stable par somme directe possédant les propriétés suivantes :

1. Tout complexe acyclique  $\in \text{Ob } K^+(\mathcal{A})$  (resp.  $\in \text{Ob } K^-(\mathcal{A})$ ) d'objets de  $\sigma$ , est transformé par  $f$  en complexe acyclique.
2. Tout objet  $X$  de  $\mathcal{A}$  s'injecte dans (resp. est quotient de) un objet de  $\sigma$ . Les hypothèses du théorème 2.4.3 sont vérifiées en prenant  $*$  = + (resp.  $*$  = -) et en prenant pour catégorie  $\mathcal{C}$ , la catégorie des complexes dont les objets et tout degré sont des éléments de  $\sigma$ . Les éléments de  $\sigma$  sont des objets  $f$ -acycliques à droite (resp. à gauche).

Si de plus  $f$  est de dimension cohomologique finie à droite (resp. à gauche), l'ensemble des objets  $f$ -acycliques à droite (resp. à gauche) possède en plus des propriétés (1) et (2) ci-dessus, la propriété (2) de proposition 3.1.9. Le Théorème 4.2.3 s'applique alors au foncteur  $Kf$  en prenant pour catégorie  $\mathcal{C}$  la catégorie des complexes dont les objets sont  $f$ -acycliques à droite (resp. à gauche) en tout degré. Le foncteur  $Rf$  (resp.  $Lf$ ) existe et induit sur  $D^+(\mathcal{A})$  le foncteur  $R^+f$  (resp.  $L^+f$ ) et sur  $D^-(\mathcal{A})$  le foncteur  $R^-f$  (resp.  $L^-f$ ).

### 4.3 Produit. Composition

Soient  $\mathcal{A}$  une catégorie abélienne,  $F : D(\mathcal{A}) \rightarrow \text{Ab}$  un foncteur cohomologique. Soient  $X^\bullet$  et  $Y^\bullet$  deux objets de  $C(\mathcal{A})$ . Le foncteur  $F$  définit une application :

$$\text{Ext}^0(X^\bullet, Y^\bullet) \rightarrow \text{hom}_{\text{Ab}}(F(D(X^\bullet)), F(D(Y^\bullet)))$$

d'où un accouplement :  $F(D(X^\bullet)) \times \text{Ext}^0(X^\bullet, Y^\bullet) \rightarrow F(D(Y^\bullet))$ .

Cet accouplement donne, en appliquant des translations, des accouplements :

$$F^i(D(X^\bullet)) \times \text{Ext}^j(X^\bullet, Y^\bullet) \rightarrow F^{i+j}(D(Y^\bullet)).$$

Ces accouplements, appliqués aux foncteurs dérivés cohomologiques, ne sont autres, par définition, que les produits de Yoneda. Les propriétés de ces produits se déduisent immédiatement de cette définition. Nous ne les développerons pas ici.

Soient  $\mathcal{A}, \mathcal{A}', \mathcal{A}''$  trois catégories abéliennes et  $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}', g : \mathcal{A}' \rightarrow \mathcal{A}''$  deux foncteurs additifs. Supposons que les foncteurs  $R^+f$  et  $R^+g$  existent. Je ne sais pas en déduire que le foncteur  $R^+g \circ f$  existe et même si ce dernier foncteur existe, il n'est probablement pas vraie en général que l'on ait la formule :

$$R^+g \circ f \xrightarrow{\sim} R^+g \circ R^+f$$

On a cependant la proposition suivante :

**Proposition 4.3.1.** *Supposons que la catégorie  $\mathcal{A}'$  possède suffisamment d'objets  $g$ -acycliques à droite et que la catégorie  $\mathcal{A}$  possède suffisamment d'objets  $f$ -acycliques à droite transformés par  $f$  en objets  $g$ -acycliques à droite. Alors le foncteur  $R^+g \circ f$  existe et on a un isomorphisme :*

$$R^+g \circ f \xrightarrow{\sim} R^+g \circ R^+f.$$

Enoncé analogues pour les foncteurs dérivés gauches.

## 5 Exemples

### 5.1 Le foncteur $\text{Rhom}^\bullet$

Soit  $\mathcal{A}$  une catégorie abélienne, possédant suffisamment d'injectifs.

Le foncteur  $Y \mapsto \text{hom}^\bullet(X^\bullet, Y^\bullet)$  (1.3) où  $X^\bullet$  est un objet de  $K(\mathcal{A})$  et  $Y^\bullet$  un objet de  $K^+(\mathcal{A})$ , admet un foncteur dérivé total à droite (Corollaire 4.2.4) qui sera noté  $\text{Rhom}^\bullet(X^\bullet, -)$ . Soit  $Y$  un objet de  $D^+(\mathcal{A})$  le foncteur

$$\begin{aligned} K(\mathcal{A}) &\rightarrow D(\text{Ab}) \\ X^\bullet &\mapsto \text{Rhom}^\bullet(X^\bullet, Y) \end{aligned}$$

est exact et s'annule sur les complexes acycliques, d'où un bi-foncteur exact

$$D(\mathcal{A})^\circ \times D^+(\mathcal{A}) \longrightarrow D(\text{Ab})$$

que nous désignerons par  $\text{Rhom}^\bullet$ .

Lorsque  $\mathcal{A}$  est de dimension cohomologique finie, le foncteur  $\text{Rhom}^\bullet$  se prolonge à  $D(\mathcal{A})^\circ \times D(\mathcal{A})$  (loc. cit.).

Si en outre  $\mathcal{A}$  possède suffisamment de projectifs on peut dériver le foncteur  $\text{hom}$  par rapport au premier argument. Les deux définitions coïncident dans leur domaine commun de validité.

### 5.2 $\mathcal{T}_{\text{or}}$ de faisceaux

Soient  $E$  un site annelé (en particulier un espace topologique annelé)  $\mathcal{A}$  le faisceau d'anneaux et  $\text{Mod}(E)$  la catégorie des  $\mathcal{A}$ -modules. Un objet  $X$  de  $\text{Mod}(E)$  est dit  $\mathcal{A}$ -plat si pout toute suite exacte :

$$0 \longrightarrow Y' \longrightarrow Y \longrightarrow Y'' \longrightarrow 0$$

la suite  $0 \rightarrow Y' \otimes_{\mathcal{A}} X \rightarrow Y \otimes_{\mathcal{A}} X \rightarrow Y'' \otimes_{\mathcal{A}} X \rightarrow 0$  est exacte. Il existe suffisamment d'objets  $\mathcal{A}$ -plats : les sommes directes d'objets  $\mathcal{A}_U$ , où  $U$  est un objet de  $E$  et  $\mathcal{A}_U$  le faisceau  $\mathcal{A}$  "prolongué par zéro en dehors de  $U$ ." Le théorème 4.2.3 s'applique donc et on peut définir le foncteur

$$\begin{aligned} D^-(E, \mathcal{A}) \times D^-(E, \mathcal{A}) &\rightarrow D^-(E, \mathcal{A}) \\ (X, Y) &\mapsto X \overset{\text{L}}{\otimes} Y \end{aligned}$$

produit tensoriel total, dérivé gauche du foncteur produit tensoriel. On définit ainsi en passant à la cohomologie les  $\mathcal{T}or_i^{\mathcal{A}}(X, Y)$  : hyper-tor locaux.

La catégorie  $\text{Mod}(E)$  ayant suffisamment d'injectifs, on peut dériver le foncteur :  $\text{hom}^\bullet(X, Y)$  : complexe des homomorphismes locaux, d'où  $\text{Rhom}(X, Y)$  ( $X \in \mathbf{D}$ ,  $Y \in \mathbf{D}^+$ ).

Soient  $X$  et  $Y$  deux objets de  $\mathbf{D}^-(E, \mathcal{A})$ ,  $Z$  un objet de  $\mathbf{D}^+(E, \mathcal{A})$ . Il existe un isomorphisme fonctoriel :

$$\text{hom}_{\mathbf{D}(E, \mathcal{A})}(X \overset{\mathbf{L}}{\otimes} Y, Z) \xrightarrow{\sim} \text{hom}_{\mathbf{D}(E, \mathcal{A})}(X, \text{Rhom}(Y, Z)).$$

### 5.3 Foncteur dérivé gauche de l'image réciproque

Soit  $f : E \rightarrow E'$  une application d'espaces topologiques annelés. Le foncteur image réciproque :

$$f^* : \text{Mod}(E') \rightarrow \text{Mod}(E)$$

n'est pas nécessairement exact. Mais on sait définir des objets  $f^*$ -plats et il existe suffisamment de tels objets. On sait donc définir le foncteur  $\mathbf{L}^- f^*$ . On a de même une formule de dualité :

Soient  $X$  un objet de  $\mathbf{D}^-(E, \mathcal{A})$  et  $Y$  un objet de  $\mathbf{D}^+(E', \mathcal{A}')$  ; il existe un isomorphisme fonctoriel :

$$\text{hom}_{\mathbf{D}(E', \mathcal{A}')}(\mathbf{L}^- f^*(X), Y) \xrightarrow{\sim} \text{hom}_{\mathbf{D}(E, \mathcal{A})}(X, \mathbf{R}^+ f_*(Y)).$$

## Annexe A

# Erratum pour SGA 4, tome 3

**XIV p.18 1.14** (XIX 6) au lieu de (XX 6).

**XVI 2.2** Il faut supposer  $F$  localement constant !

**XVI 5.2** La démonstration donnée est incomplète. Après l'énoncé de l'hypothèse de récurrence, il faut d'abord se ramener au cas où  $F$  est constant ( $F$  devient constant sur un revêtement galoisien étale  $\pi : X' \rightarrow X$  de  $X$ , de groupe de Galois  $G$ , et on invoque la suite spectrale de Hochschild-Serre  $E_2^{pq} = H^p(G, H^q(X', \pi^* F)) \Rightarrow H^{p+q}(X, F)$ ). Les arguments qui suivent sont alors corrects.

**XVII 1.1.8** Le signe (1.1.8.1) est erroné lorsque  $F$  est contravariant en certaines variables. Il faut lire :

$$\rho^{\underline{k}} = (-1)^{A(\underline{k})} : \text{automorphisme de } F \circ (G_j) \left( K_i^{k_i \varepsilon(i) \varepsilon(\psi(i))} \right) \quad (1.1.8.1)$$

avec

$$A(\underline{k}) = \sum_{\varepsilon(i)=\varepsilon(\psi(i))=-} k_i + \sum_{\varepsilon(j)=-} \sum_{\substack{\psi(a)=\psi(b)=j \\ a < b}} k_a k_b$$

**XVII 2.1.3** La démonstration contient des erreurs flagrantes. Il faut supprimer la 3-ème ligne (p.34 1.9) et remplacer les 6-ème et 7-ème (p.34 1.12, 13) par :

Les flèches du diagramme (2.1.3.2) induisent des applications

$$\text{hom}_y(F, F) \rightarrow \text{hom}_{fg'}(g'^* F, f_* F) = \text{hom}_{x'}(f'_* g'^* F, g^* f_* F),$$

**XVIII 2.14.4** Lire XVII 6.2.7.2 au lieu de XVII 6.2.4.

**XVIII p.99 1-1** Lire  $u$  au lieu de  $U$  et 3.1.16.1 au lieu de 3.1.11.1.

# Bibliographie

- [AGV72] Michael Artin, Alexandre Grothendieck, and Jean-Louis Verdier. *Théorie des topos et cohomologie étale des schémas (SGA 4)*, volume 269, 270, 305 of *Lecture Notes in Mathematics*. Springer, 1972. 16, 17, 18, 23, 29, 30, 32, 33, 36, 37, 43, 44, 50, 51, 54, 55, 62, 63, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 80, 88, 115, 116, 117, 124, 125, 126, 128, 129, 130, 145
- [Art62] Michael Artin. *Grothendieck topologies*. Harvard University Dept. Math., 1962. 2, 137
- [Bas76] Hyman Bass. Euler characteristics and characters of discrete groups. *Invent. Math.*, 35 :155–196, 1976. 41
- [BFM75] Paul Baum, William Fulton, and Robert MacPherson. Riemann-Roch for singular varieties. *Inst. Hautes Études Sci. Publ. Math.*, (45) :101–145, 75. 67
- [BGI71] Pierre Berthelot, Alexandre Grothendieck, and Luc Illusie. *Théorie des intersections et théorème de Riemann-Roch (SGA 6)*, volume 225 of *Lecture Notes in Mathematics*. Springer-Verlag, 1971. 125
- [Bom66] Enrico Bombieri. On exponential sums in finite fields. *Amer. J. Math.*, 88 :71–105, 1966. 113
- [Bou05] Nicolas Bourbaki. *Lie groups and Lie algebras. Chapters 7–9*. Elements of mathematics. Springer-Verlag, Berlin, 2005. Translated from the 1975 and 1982 French originals by Andrew Pressley. 113
- [Car69] L. Carlitz. A note on exponential sums. *Pacific J. Math.*, 30 :35–37, 1969. 111
- [Car70] L. Carlitz. Kloosterman sums and finite field extensions. *Acta Arith.*, 16 :179–193, 1969/1970. 94
- [Del71a] Pierre Deligne. Théorie de Hodge. I. In *Actes du Congrès International des Mathématiciens (Nice, 1970)*, Tome 1, pages 425–430. Gauthier-Villars, Paris, 1971. 127
- [Del71b] Pierre Deligne. Théorie de Hodge. II. *Inst. Hautes Études Sci. Publ. Math.*, (40) :5–57, 1971. 127
- [Del73] Pierre Deligne. Les constantes des équations fonctionnelles des fonctions  $L$ . In *Modular functions of one variable, II (Proc. Internat. Summer School, Univ. Antwerp, Antwerp, 1972)*, pages 501–597. Lecture Notes in Math., Vol. 349. Springer, Berlin, 1973. 34, 93, 111
- [Del74] Pierre Deligne. La conjecture de Weil. I. *Inst. Hautes Études Sci. Publ. Math.*, (43) :273–307, 1974. 127
- [Del80] Pierre Deligne. La conjecture de Weil. II. *Inst. Hautes Études Sci. Publ. Math.*, (52) :137–252, 1980. 86, 127
- [DGK73] Pierre Deligne, Alexandre Grothendieck, and Nicholas Katz. *Groupes de monodromie en géométrie algébrique (SGA 7)*, volume 288, 340 of *Lecture Notes in Mathematics*. Springer, 1972-73. 54, 86, 89, 121, 122
- [DL76] P. Deligne and G. Lusztig. Representations of reductive groups over finite fields. *Ann. of Math.* (2), 103(1) :103–161, 1976. 113, 114
- [DP61] Albrecht Dold and Dieter Puppe. Homologie nicht-additiver Funktoren. Anwendungen. *Ann. Inst. Fourier Grenoble*, 11 :201–312, 1961. 51
- [Gir64] Jean Giraud. Analysis situs. In *Séminaire Bourbaki, 1962/63. Fasc. 3, No. 256*, page 11. Secrétariat mathématique, Paris, 1964. 2
- [GR71] Alexandre Grothendieck and Michele Raynaud. *Revêtements étales et groupe fondamentale (SGA 1)*, volume 224 of *Lecture Notes in Mathematics*. Springer, 1971. 8, 19, 126

- [GR05] Alexandre Grothendieck and Michele Raynaud. *Cohomologie locale des faisceaux cohérents et théorèmes de Lefschetz locaux et globaux (SGA 2)*. Documents Mathématiques (Paris), 4. Société Mathématique de France, Paris, 2005. Séminaire de Géométrie Algébrique du Bois Marie, 1962, Augmenté d'un exposé de Michèle Raynaud, With a preface and edited by Yves Laszlo, Revised reprint of the 1968 French original. 66
- [Gro67] Alexandre Grothendieck. *Éléments de géométrie algébrique*. Inst. Hautes Études Sci. Publ. Math., 1960-67. 18, 19, 125
- [Gro95] Alexandre Grothendieck. Formule de Lefschetz et rationalité des fonctions  $L$ . In *Séminaire Bourbaki*, Vol. 9, pages Exp. No. 279, 41–55. Soc. Math. France, Paris, 1995. 40
- [Gro66] Alexandre Grothendieck. *Cohomologie  $\ell$ -adique et fonctions  $L$  (SGA 5)*, volume 589 of *Lecture Notes in Mathematics*. Springer, 1965-66. 35, 36, 38, 40, 44, 45, 60, 74, 124
- [GZ67] P. Gabriel and M. Zisman. *Calculus of fractions and homotopy theory*, volume 35 of *Ergebnisse der Mathematik und ihrer Grenzgebiete*. Springer-Verlag, New York, 1967. 136
- [Kaz77] D. Kazhdan. Proof of Springer's hypothesis. *Israel J. Math.*, 28(4) :272–286, 1977. 114
- [Lan83] Serge Lang. *Abelian varieties*. Springer-Verlag, New York, 1983. Reprint of the 1959 original. 46
- [Lus77] G. Lusztig. Coxeter orbits and eigenspaces of Frobenius. *Invent. Math.*, 38(2) :101–159, 1976/77. 113
- [Mor73] L. J. Mordell. Some exponential sums. In *Proceedings of the International Conference on Number Theory (Moscow, 1971)*, volume 132, pages 30–34, 264, 1973. 112
- [Ray65] Michel Raynaud. Caractéristique d'Euler-Poincaré d'une faisceau et cohomologie des variétés abéliennes. In *Séminaire Bourbaki*. Vol. 9, volume Exp. No. 286, pages 129–147. Soc. Math. France, Paris, 1965. 93
- [Ray70] Michel Raynaud. *Anneaux locaux henséliens*. Lecture Notes in Mathematics, Vol. 169. Springer-Verlag, Berlin, 1970. 8, 11
- [Sch72] Gérard Schiffmann. Théorie élémentaire des catégories. In C. Houzel, editor, *Séminaire Banach*, volume 277 of *Lecture Notes in Mathematics*, pages 1–33. Springer, Berlin, 1972. 136
- [Ser56] Jean-Pierre Serre. Géométrie algébrique et géométrie analytique. *Ann. Inst. Fourier, Grenoble*, 6 :1–42, 1955–1956. 23
- [Ser59] Jean-Pierre Serre. *Groupes algébriques et corps de classes*. Publications de l'institut de mathématique de l'université de Nancago, VII. Hermann, Paris, 1959. 32
- [Ser61] Jean-Pierre Serre. Sur les corps locaux à corps résiduel algébriquement clos. *Bull. Soc. Math. France*, 89 :105–154, 1961. 94
- [Ser68] Jean-Pierre Serre. *Abelian  $\ell$ -adic representations and elliptic curves*. McGill University lecture notes. W. A. Benjamin, Inc., New York-Amsterdam, 1968. 103, 104
- [Ser94] Jean-Pierre Serre. *Cohomologie galoisienne*, volume 5 of *Lecture Notes in Mathematics*. Springer-Verlag, Berlin, fifth edition, 1994. 13, 14
- [Smi70] R. A. Smith. The distribution of rational points on hypersurfaces defined over a finite field. *Mathematika*, 17 :328–332, 1970. 96
- [Spe77] S. Sperber.  $p$ -adic hypergeometric functions and their cohomology. *Duke Math. J.*, 44(3) :535–589, 1977. 113
- [Spr76] T. A. Springer. Trigonometric sums, Green functions of finite groups and representations of Weyl groups. *Invent. Math.*, 36 :173–207, 1976. 114
- [Ver67] Jean-Louis Verdier. The Lefschetz fixed point formula in etale cohomology. In *Proc. Conf. Local Fields (Driebergen, 1966)*, pages 199–214. Springer, Berlin, 1967. 40
- [Wei48] André Weil. *Variétés abéliennes et courbes algébriques*. Actualités Sci. Ind., no. 1064 = Publ. Inst. Math. Univ. Strasbourg 8 (1946). Hermann & Cie., Paris, 1948. 46
- [Wei52] André Weil. Jacobi sums as “Grössencharaktere”. *Trans. Amer. Math. Soc.*, 73 :487–495, 1952. 104, 106

- [Wei74a] André Weil. *Basic number theory*. 1974, New York, third edition, 1974. Die Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften, Band 144. 86
- [Wei74b] André Weil. Sommes de Jacobi et caractères de Hecke. *Nachr. Akad. Wiss. Göttingen Math.-Phys. Kl. II*, (1) :1–14, 1974. 104, 106