

---

# Catégories Dérivées en Cohomologie $\ell$ -adique

par

Jean-Pierre JOUANLOU

---

THÈSE DE DOCTORAT D'ÉTAT  
ès SCIENCES MATHÉMATIQUES  
présentée  
A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

par

M. JOUANOLOU Jean-Pierre

pour obtenir le grade Docteur ès-Sciences

Sujet de thèse : **Catégories Dérivées en Cohomologie  $\ell$ -adique**

soutenue le : 3 Juillet 1969 devant la Commission d'examen

MM. SAMUEL    Président

GROTHENDIECK

VERDIER                      Examineurs

DIXMIER



## PREFACE

---

Description

## TABLE DE MATIÈRES

I. Catégorie des faisceaux sur un idéotope . . . . .	6
1. Généralités . . . . .	6
2. Cas où l'objet final de $X$ est quasicompact . . . . .	9
3. $A$ -faisceaux de type constant, strict ou $J$ -adique . . . . .	10
4. Opérations externes . . . . .	10
5. Produit tensoriel . . . . .	10
6. Foncteurs associés aux homomorphismes . . . . .	10
7. Catégories dérivées . . . . .	10
8. Changement d'anneau . . . . .	10
II. Conditions de finitude . . . . .	11
1. Catégorie des $A$ -faisceaux constructibles . . . . .	11
2. Conditions de finitude dans les catégories dérivées . . . . .	14
III. Applications aux schémas . . . . .	18
1. Opérations externes . . . . .	18
2. Dualité . . . . .	28
3. Formalisme des fonctions $L$ . . . . .	38

## § I. — CATÉGORIES DES FAISCEAUX SUR UN IDÉOTOPE

---

### 1. Généralités.

Définition 1.1. — On appelle idéotope un triple  $(X, A, J)$  formé d'un topos  $X$ , d'un anneau commutatif unifié  $A$  et d'un idéal propre  $J$  de  $A$ .

On suppose donné dans la suite du paragraphe un idéotope  $(X, A, J)$ . On note  $A - \text{Mod}_X$  la catégorie des faisceaux de  $A_X$ -Modules et

$$\underline{\text{Hom}}(\mathbf{N}^\circ, A - \text{Mod}_X)$$

la catégorie abélienne des systèmes projectifs indexés par  $\mathbf{N}$  de  $A_X$ -Modules.

Définition 1.2. — On appelle  $(A, J)$ -faisceau sur  $X$ , ou s'il n'y a pas de confusion possible  $A$ -faisceau sur  $X$ , un système projectif

$$F = (\mathbf{F}_n, u_{m,n})_{(m,n) \in \mathbf{N} \times \mathbf{N}, m \geq n}$$

de  $A_X$ -Modules, vérifiant

$$J^{n+1} F_n = 0$$

pour tout entier  $n \geq 0$ . On note  $\mathbf{E}(X, J)$  la sous-catégorie, abélienne, pleine de  $\underline{\text{Hom}}(\mathbf{N}^\circ, A - \text{Mod}_X)$  engendrée par les  $A$ -faisceaux.

Pour des raisons qui apparaîtront par la suite, la catégorie  $\mathbf{E}(X, J)$  ne mérite pas le nom de catégorie des  $A$ -faisceaux sur  $X$ ; c'est seulement une catégorie quotient de la précédente que nous baptiserons ainsi. Aussi, pour éviter le risque de

confusion, nous arrivera-t-il, étant donnés deux  $A$ -faisceaux  $E$  et  $F$ , de noter

$$\mathrm{Hom}_a(E, F)$$

( $a$  pour anodin) l'ensemble des  $\mathbf{E}(X, J)$ -morphisms de  $E$  dans  $F$ .

Notons pour tout objet  $T$  de  $X$  par  $\mathbf{T}$ , ou même  $T$  s'il n'y a pas de confusion possible, le topos  $X/T$ . Le foncteur restriction pour les faisceaux de  $A$ -Modules induit de façon évidente un foncteur restriction

$$\mathbf{E}(X, J) \longrightarrow \mathbf{E}(T, J)$$

$$E \mapsto E|T.$$

**Proposition-définition 1.4.** — Soit  $E = (E_n)_{n \in \mathbb{N}}$  un  $A$ -faisceau sur  $X$ :

- 1) On dit que  $E$  est essentiellement nul s'il est nul en tant que pro-objet, ce qui revient à dire que pour tout entier  $n \geq 0$ , il existe un entier  $p \geq 0$  tel que le morphisme de transition

$$E_{n+p} \longrightarrow E_n$$

soit nul.

- 2) On dit que  $E$  est négligeable s'il vérifie l'une des relations équivalentes suivantes:

- (i) Il existe un recouvrement  $(T_i \longrightarrow e_X)_{i \in I}$  de l'objet final  $e_X$  de  $X$  tel que les  $A$ -faisceaux  $E|T_i$  soient essentiellement nuls.
- (ii) Idem, mais en supposant de plus que les  $T_i$  sont des ouverts de  $X$ .

**Preuve:** Pour voir l'équivalence de (i) et (ii), il suffit d'observer que pour tout  $i \in I$ , le faisceau image  $U_i$  de  $T_i$  par le morphisme canonique  $T_i \longrightarrow e_X$  est tel que le morphisme restriction

$$U_i \longrightarrow \mathbf{T}_i$$

soit fidèle.

Il est clair que lorsque l'objet final de  $X$  est quasicompact (SGA4 VI 1.1), il revient au même pour un  $A$ -faisceau de dire qu'il est essentiellement nul ou qu'il est négligeable. Il est par ailleurs immédiat que la sous-catégorie pleine

$$(1.4.1) \quad N(X, J) \quad \text{ou plus simplement } N_X$$

de  $\mathbf{E}(X, J)$  engendré par les  $A$ -faisceaux négligeables est *épaisse* dans  $\mathbf{E}(X, J)$ .

**Définition 1.5.** — Soit  $(X, A, J)$  un idéotope. On appelle catégorie des  $(A, J)$ -faisceaux (ou  $A$ -faisceaux s'il n'y a pas de confusion possible) sur  $X$  et on note

$$(A, J) - \text{fsc}(X) \quad (\text{ou plus simplement } A - \text{fsc}(X))$$

la catégorie abélienne quotient (thèse Gabriel III.1)

$$\mathbf{E}(X, J)/N_X.$$

**1.6.** Soit  $T$  un objet de  $X$ . Il est clair que le foncteur restriction (1.3) est exact et envoie  $N_X$  dans  $N_T$ , d'où par passage au quotient un foncteur exact, appelé encore *restriction*,

$$(1.6.1) \quad r_{T, X} : A - \text{fsc}(X) \longrightarrow A - \text{fsc}(T).$$

Soient maintenant  $T$  et  $T'$  deux objets de  $X$  et  $f : T \longrightarrow T'$  un morphisme. Se plaçant dans le topos  $\mathbf{T}'$ , on déduit de (1.6.1) un foncteur exact

$$(1.6.2) \quad f^* : A - \text{fsc}(T') \longrightarrow A - \text{fsc}(T),$$

vérifiant les propriétés de transitivité habituelles.

Ces remarques étant faites, nous utiliserons dans la suite sans plus d'explications le langage local pour les  $A$ -faisceaux.

**Proposition 1.7.** — *Les propriétés suivantes sont de nature locale pour la topologie de  $X$ .*

(i) *La propriété pour un  $A$ -faisceau d'être nul, i.e. isomorphe au système projectif nul.*

(ii) *La propriété pour une suite*

$$E' \xrightarrow{u} E \xrightarrow{v} E''$$

*de  $A$ -faisceaux d'être exacte.*



(iii) La propriété pour un morphisme  $u : E \longrightarrow F$  de  $A$ -faisceaux d'être un monomorphisme (resp. un épimorphisme, resp. un isomorphisme).

(iv) La propriété pour deux morphismes  $u, v : E \rightrightarrows F$  d'être égaux.

**Preuve :** L'assertion (i) est immédiate. On en déduit (ii) en l'appliquant successivement à  $\text{Im}(v \circ u)$  et à  $\text{Ker}(v)/\text{Im}(u)$ . L'assertion (iii) est un cas particulier de (ii). Enfin (iv) s'obtient en appliquant (i) à  $\text{Im}(v - u)$ .

**Corollaire 1.7.1.** — Soient  $T$  et  $T'$  deux objets de  $X$  et  $f : T \longrightarrow T'$  un épimorphisme. Le foncteur

$$f^* : A - \text{fsc}(T') \longrightarrow A - \text{fsc}(T)$$

est fidèle.

**Preuve:** Appliquer 1.7 (i) au topos  $\mathbf{T}'$ .

**Corollaire 1.7.1.** — Soient  $E$  et  $F$  deux  $A$ -faisceaux sur  $X$ . Lorsque  $T$  parcourt les objets de  $X$ , le préfaisceau

$$T \mapsto \text{Hom}(E|T, F|T)$$

est séparé.

**Preuve:** Simple traduction de 1.7 (iv).

**Remarque 1.7.3.** En général, le préfaisceau précédent n'est pas un faisceau. Nous verrons toutefois qu'il en est ainsi lorsque le topos  $X$  est noethérien (SGA4 VI 2.11), ou lorsque  $E$  est de type  $J$ -adique.

## 2. Cas où l'objet final de $X$ est quasicompact.

On se propose maintenant de donner un certain nombre de catégories équivalentes à  $A - \text{fsc}(X)$ , lorsque l'objet final de  $X$  est quasicompact. Nous aurons besoin cela d'un certain nombre de lemmes techniques, dont la plupart n'utilisent pas cette hypothèse.

### 2.1.

**3.  $A$ -faisceaux de type constant, strict ou  $J$ -adique.**

**4. Opérations externes.**

**5. Produit tensoriel.**

**6. Foncteurs associés aux homomorphismes.**

**6.1.** Soient  $E = (E_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $F = (F_n)_{n \in \mathbb{N}}$  deux  $A$ -faisceaux sur un topos  $X$ . Pour tout entier  $i \in \mathbb{Z}$ , on définit comme suit un nouveau  $A$ -faisceau, noté

$$\underline{\mathrm{Ext}}_A^i(E, F),$$

la mention de l'anneau  $A$  pouvant être éventuellement supprimée s'il n'y a pas de confusion possible. Soient  $m' \geq m \geq n$  trois entiers  $\geq 0$ .

**7. Catégories dérivées.**

**8. Changement d'anneau.**

## § II. — CONDITIONS DE FINITUDE

---

Dans tout ce chapitre, on fixe un anneau commutatif unifère *noethérien*  $A$  et un idéal  $J$  de  $A$ . Sauf mention expresse du contraire, tous les topos considérés seront supposés *localement noethériens* (SGA 4 VI 2.11.).

### 1. Catégorie des $A$ -faisceaux constructibles.

Soit  $X$  un topos localement noethérien.

Définition 1.1. — On dit qu'un  $A$ -faisceau  $F = (F_n)_{n \in \mathbf{N}}$  est  $J$ -adique constructible s'il est  $J$ -adique (I 3.8.) et si pour tout  $n \in \mathbf{N}$ , le  $A_n$ -Module  $F_n$  est constructible. On dit que  $F$  est un  $A$ -faisceau constructible s'il est isomorphe dans  $A\text{-fsc}(X)$  à un  $A$ -faisceau  $J$ -adique constructible. On appelle catégorie des  $A$ -faisceaux constructibles et on note

$$A\text{-fscn}(X) \quad (\text{"n" pour "noethérien"})$$

la sous-catégorie pleine de  $A\text{-fsc}(X)$  engendrée par les  $A$ -faisceaux constructibles.

Proposition 1.2. — Soit  $F = (F_n)_{n \in \mathbf{N}}$  un  $A$ -faisceau sur  $X$ . Les assertions suivantes sont équivalentes.

- (i)  $F$  est un  $A$ -faisceau constructible.
- (ii)  $F$  est de type strict (I 3.2.) et, notant  $F'$  le  $A$ -faisceau strict associé à  $F$  (I 3.3.), il existe localement une application croissante  $\gamma \geq \text{id}$  telle que  $\chi_\gamma(F')$  (I 2.2) soit  $J$ -adique constructible.

(iii) Pour tout entier  $r \geq 0$ , le  $A$ -faisceau  $F \otimes_A A_r$  est de type constant (I 3.6.) associé à un  $A_r$ -Module constructible.

**Preuve :**

Corollaire 1.3. —

**Preuve :**

Corollaire 1.4. —

Proposition 1.5. —

**Preuve :**

Lemme 1.6. —

Corollaire 1.6. —

Proposition 1.7. —

**Preuve :**

Lemme 1.8. —

Lemme 1.9. —

Lemme 1.10. —

Proposition 1.11. —

**Preuve :**

1.12.

Proposition 1.12.4. —

**Preuve :**

1.13.

Définition 1.14. —

Proposition 1.15. —

**Preuve :**

Proposition 1.17. —

**Preuve :**

Corollaire 1.18. —

Proposition 1.19. —

**Preuve :**

1.20. Nous allons maintenant expliciter la structure de la catégorie  $A\text{--fsc}(X)$ , lorsque le topos  $X$  est connexe. Rappelons tout d’abord quelques faits concernant le pro-groupe fondamental d’un topos. Étant donné un pro-groupe strict

$$G = (G_i)_{i \in I},$$

on définit comme suit un topos, noté

$$B_G$$

et appelé *topos classifiant* de  $G$ . Un objet de  $B_G$ , appelé encore  *$G$ -ensemble*, est un ensemble  $M$  muni d’une application

$$\begin{aligned} p : M &\longrightarrow \varinjlim_i \text{Hom}(G_i, M) \\ m &\mapsto (g_i \mapsto g_i m \quad \text{pour } i \text{ “assez grand”}) \end{aligned}$$

telle que l’on ait

$$g_i(g'_i m) = (g_i g'_i) m \quad \text{pour } i \text{ “assez grand”}.$$

Autrement dit,  $M$  admet une filtration par des  $G_i$ -ensembles ( $i \in I$ ), avec compatibilité des diverses opérations. Un morphisme de  $G$ -ensembles  $M \longrightarrow N$  est une application  $u : M \longrightarrow N$  qui rend le diagramme

Proposition 1.20.4. —

**Preuve :**

Corollaire 1.20.5. —

**Preuve :**

Proposition 1.21. —

**Preuve :**

Proposition 1.22. —

Proposition 1.23. —

**Preuve :**

Proposition 1.24. —

**Preuve :**

Proposition 1.25. —

**Preuve :**

Proposition 1.26. —

**Preuve :**

**Exemple 1.27.**

Proposition 1.28. —

**Preuve :**

Proposition 1.29. —

**Preuve :**

## **2. Conditions de finitude dans les catégories dérivées.**

Soit  $X$  un topos localement noethérien.

Définition 2.1. — *On dit qu'un complexe  $E$  de  $A$ -faisceaux sur  $X$  est à cohomologie constructible (resp. constante tordue constructible) si tous ses objets de cohomologie sont des  $A$ -faisceaux constructibles (resp. constants tordus constructibles).*

Définition 2.2. —

Proposition 2.3. —

**Preuve :**

Proposition 2.4. —

**Preuve :**

Proposition 2.5. —

**Preuve :**

Proposition 2.6. —

**Preuve :**

Proposition 2.7. —

**Preuve :**

Corollaire 2.8. —

2.9.

Proposition 2.9.2. —

**Preuve :**

2.10.

Proposition 2.10.2. —

**Preuve :**

Proposition 2.10.3. —

**Preuve :**

Proposition 2.10.5. —

**Preuve :**

**2.11. Trace et cup-produit.**

Proposition 2.11.3. —

**Preuve :**

**2.12.**

Proposition 2.12.1. —

**Preuve :**

Proposition 2.12.2. —

**Preuve :**

Proposition 2.12.3. —

**Preuve :**

**2.13. Changement d’anneau.** Soient  $X$  un topos localement noethérien,  $A$  et  $B$  deux anneaux commutatifs unifères noethériens,  $J$  et  $K$  deux idéaux de  $A$  et  $B$  respectivement et  $\iota : A \longrightarrow B$  un morphisme d’anneaux unifères, tel que  $\iota(J) \subset K$ . On utilise par ailleurs librement les notations de (I 8.1).

Proposition 2.13.1. —

**Preuve :**

Théorème 2.13.2. —

**Preuve :**

Lemme 2.13.3. —

Lemme 2.13.4. —



Lemme 2.13.5. —

Lemme 2.13.6. —

**Remarques 2.13.7.**

Proposition 2.13.9. —

**Preuve :**

**Remarques 2.13.10.**

Proposition 2.14. —

**Preuve :**

**Remarques 2.15.** Comme pour (2.13.2), l'hypothèse (i) a servi uniquement pour assurer que le complexe  $\mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F)$  est à cohomologie constructible. Elle est donc inutile en particulier dans la cas où  $E \in \mathbf{D}_t^-(X, A)$ .

### § III. — APPLICATIONS AUX SCHÉMAS

Le texte qui suit ayant un caractère essentiellement provisoire (cf. l'appendice basé sur une construction de *Deligne*), nous ferons toutes les hypothèses simplificatrices qui nous paraîtront nécessaires pour la clarté de l'exposé.

Soit  $\ell$  un nombre premier. On fixe comme précédemment un anneau noethérien  $A$  et un idéal propre  $J$  de  $A$ . On suppose de plus que  $A$  est une  $\mathbf{Z}_\ell$ -algèbre et que  $J$  contient  $\ell A$ . Pour simplifier (cf. *supra*), tous les schémas considérés sont *noethériens*.

#### 1. Opérations externes.

1.1. Soient  $X$  et  $Y$  deux schémas noethériens, et  $f : X \longrightarrow Y$  un morphisme séparé de type fini. On définit comme suit un foncteur exact

$$(1.1.1) \quad \mathbf{R}f_! : \mathbf{D}(X, A) \longrightarrow \mathbf{D}(Y, A),$$

appelé *image directe à supports propres*. D'après Nagata et Mumford il existe une factorisation

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{i} & Z \\ & \searrow f & \swarrow g \\ & Y & \end{array},$$

où  $i$  est une immersion ouverte et  $q$  un morphisme propre. On pose alors

$$\mathbf{R}f_! = \mathbf{R}q_* \circ \mathbf{R}i_!.$$

on vérifie, grâce à la technique de factorisation de *Lichtenbaum* (SGA4 XVIII), que le résultat ne dépend pas, à isomorphisme près, de la factorisation choisie.

La même technique de factorisation montre que si  $g : Y \longrightarrow Z$  est un autre morphisme séparé de type fini, on a un isomorphisme

$$(1.1.2) \quad \mathbf{R}(g \circ f)_! \xrightarrow{\sim} \mathbf{R} g_! \circ \mathbf{R} f_!,$$

avec la condition de cocycles habituelle pour un triple de morphismes.

**Définition 1.1.3.** — Si  $E$  est un  $A$ -faisceau sur  $X$  (resp. un objet de  $D(X, A)$ ), on pose pour tout  $p \in \mathbf{Z}$

$$\mathbf{R}^p f_!(E) = H^p(\mathbf{R} f_!(E)).$$

On obtient ainsi un foncteur cohomologique qui n'est pas en général (sauf bien sûr si le morphisme  $f$  est propre) le foncteur cohomologique dérivé de  $\mathbf{R}^\circ f_!$ .

**1.1.4.** Il est clair que si  $F = (F_n)_{n \in \mathbf{N}}$  est un  $A$ -faisceau, on a pour tout  $p \in \mathbf{Z}$

$$\mathbf{R}^p f_!(F) = (\mathbf{R}^p f_!(F_n))_{n \in \mathbf{N}}.$$

**Proposition 1.1.5.** — Soit

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

un carré cartésien de schéma noethériens.

(i) **(Théorème de changement de base propre)** Si  $f$  (donc  $f'$ ) est séparé de type fini, on a pour tout  $E \in D^+(X, A)$  un isomorphisme canonique fonctoriel

$$g^* \mathbf{R} f_!(E) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R} f'_!(g')^*(E).$$

(ii) **(Théorème de changement de base lisse)** Si  $\ell$  est premier aux caractéristiques résiduelles de  $Y$  et  $g$  est lisse, on a pour tout  $E \in D^+(X, A)$  un isomorphisme canonique fonctoriel

$$g^* \mathbf{R} f_*(E) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}(f')_*(g')^*(E).$$

**Preuve :** Montrons (ii). Utilisant l'adjonction entre image directe et image réciproque (I 7.7.6), on construit comme dans (SGA4 XVII) (voir aussi SGA4 XII 4), un morphisme fonctoriel

$$g^* \mathbf{R}f_*(E) \longrightarrow \mathbf{R}(f')_*(g')^*(E).$$

Pour voir que c'est un isomorphisme, on se ramène par “way-out functor lemma” au cas où  $E$  est de degré 0, et il suffit alors de montrer que les morphismes

$$g^* \mathbf{R}^i f_*(E) \longrightarrow \mathbf{R}^i (f')_*(g')^*(E) \quad (i \in \mathbf{N})$$

correspondants de  $\mathbf{E}(X, J)$  sont des isomorphismes. Cela se voit sur les composants, grâce au théorème de changement de base lisse sur les  $A_n$ -Modules (SGA4 XII 1.1). Montrons (i). On construit tout d'abord un morphisme fonctoriel

$$g^* \mathbf{R}f_!(E) \longrightarrow \mathbf{R}(f')_!(g')^*(E),$$

en paraphrasant la construction faite pour les  $A_n$ -Modules (SGA4 XVII). Pour cela, choisissant une factorisation  $f = q \circ i$ , avec  $i$  une immersion ouverte et  $q$  un morphisme propre, on se ramène à faire la construction lorsque  $f$  est propre, ou bien est une immersion ouverte; on vérifie ensuite de façon standard que le résultat ne dépend pas de la factorisation choisie. Lorsque  $f$  est une immersion ouverte, les morphismes analogues pour les  $A_n$ -Modules ( $n \in \mathbf{N}$ ) définissent de façon évidente un isomorphisme  $g^* f_! \xrightarrow{\sim} (f')_!(g')^*$  de foncteurs exacts

$$\mathbf{E}(X, J) \longrightarrow \mathbf{E}(Y', J),$$

d'où par passage au quotient, un isomorphisme de foncteurs exacts

$$A - \text{fsc}(X) \longrightarrow A - \text{fsc}(Y'),$$

qui fournit à son tour un isomorphisme de foncteurs exacts

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{D}(X, A) & \begin{array}{c} \xrightarrow{g^* f_!} \\ \downarrow \sim \\ \xrightarrow{(f')_!(g')^*} \end{array} & \mathbf{D}(Y', A). \end{array}$$

Lorsque  $f$  est un morphisme propre, on utilise la même construction que pour (ii). Pour montrer enfin que le morphisme (1.1.6) ainsi construit est un isomorphisme,

on se ramène au cas où  $E$  est de degré 0, et alors l'assertion résulte, comme pour (ii), de l'assertion analogue pour les  $A_n$ -Modules (SGA4 XVII).

**Proposition 1.1.7** (Formule de projection). — *Soient  $f : X \longrightarrow Y$  un morphisme séparé de type fini entre schémas noethériens,  $E \in D^-(X, A)$  et  $F \in D^-(X, A)$ . On a un isomorphisme canonique fonctoriel*

$$\mathbf{R}f_!(E \otimes f^*(F)) \xleftarrow{\sim} \mathbf{R}f_!(E \otimes F)$$

**Preuve :** Nous utiliserons le lemme suivant.

**Lemme 1.1.8.** — *Si  $d$  est un entier majorant la dimension des fibres de  $f$ , on a pour tout  $A$ -faisceau  $M$  sur  $X$*

$$\mathbf{R}^i f_!(M) = 0 \quad (i > 2d).$$

(Résulte immédiatement de l'assertion analogue pour les composants de  $M$ ).

Choissant une compactification de  $f$ , on se ramène à montrer (1.1.7) successivement lorsque  $f$  est une immersion ouverte, ou un morphisme propre. Dans le premier cas, ce n'est autre que (I 7.7.10.(iv)). Dans le second cas, on définit un morphisme

$$\mathbf{R}f_*(E) \otimes F \longrightarrow \mathbf{R}f_*(E \otimes f^*F)$$

sur le modèle de (J.L. Verdier: The Lefschetz fixed point formula in étale cohomology, in “Conference on local fields held at Drieberger” preuve de 3.2), en se ramenant à  $F$  plat et  $E$   $f_*$ -acyclique (ce qui est possible grâce à 1.1.8). Enfin, pour voir que (1.1.9) est un isomorphisme, on se ramène par les dévissages habituels au cas où  $E$  et  $F$  sont réduits au degré 0 et  $F$  plat, et alors l'assertion résulte de la formule de projection pour les  $A_n$ -Modules ( $n \in \mathbf{N}$ ), appliquée aux composants de  $E$  et  $F$ .

**Proposition 1.1.10** (Formule de Künneth). — *Considérons un diagramme*

cartésien de schémas noethériens

$$\begin{array}{ccc}
 & X \times_Z Y & \\
 p \swarrow & & \searrow q \\
 X & & Y \\
 f \searrow & & \swarrow g \\
 & Z &
 \end{array} ,$$

et posons  $h = f \circ p = g \circ q$ . Si  $E \in D^-(X, A)$  et  $F \in D^-(Y, A)$ , on a un isomorphisme canonique fonctoriel

$$\mathbf{R}f_!(E) \otimes \mathbf{R}g_!(F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}h_!(p^*E \otimes q^*F).$$

**Preuve :** Formellement la même que celle de l'assertion correspondante pour les faisceaux de  $A_n$ -Modules ( $n \in \mathbf{N}$ ) (SGA4 XVII). De (1.1.7) appliqué à  $f$ , on déduit un isomorphisme

$$(1.1.10.1) \quad \mathbf{R}f_!(E) \otimes \mathbf{R}g_!(F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}f_!(E \otimes f^* \mathbf{R}g_!(F)).$$

Le théorème de changement de base propre pour  $f$  (1.1.5.(i)) montre que

$$(1.1.10.2) \quad f^* \mathbf{R}g_!(F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}p_!q^*(F).$$

Comparant avec (1.1.10.1), on a donc

$$\mathbf{R}f_!(E) \otimes \mathbf{R}g_!(F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}f_!(E \otimes \mathbf{R}p_!q^*(F)).$$

La formule de projection (1.1.7) pour le morphisme  $p$  montre que

$$E \otimes \mathbf{R}p_!q^*(F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}p_!(p^*E \otimes q^*F),$$

d'où

$$\mathbf{R}f_!(E \otimes \mathbf{R}p_!q^*(F)) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}f_!\mathbf{R}p_!(p^*E \otimes q^*F),$$

et le résultat annoncé puisque  $f \circ p = h$ .

**Proposition 1.1.11.** — Soient  $X$  et  $Y$  deux schémas noethériens,  $f : X \longrightarrow Y$  un morphisme séparé de type fini, et  $E \in D(X, A)$ .

- (i) Si  $E \in D_c(X, A)$ , alors  $\mathbf{R}f_!(E) \in D_c(Y, A)$ .
- (ii) Si  $E \in D^-(X, A)_{\text{torf}}$  alors  $\mathbf{R}f_!(E) \in D^-(Y, A)_{\text{torf}}$ .
- (iii) Supposons que  $f$  soit propre et lisse, et que  $\ell$  soit premier aux caractéristiques résiduelles de  $Y$ . Alors:

$$E \in D_t(X, A) \implies \mathbf{R}f_!(E) \in D_t(Y, A).$$

$$E \in D_{\text{parf}}(X, A) \implies \mathbf{R}f_!(E) \in D_{\text{parf}}(Y, A).$$

**Preuve :** Montrons (i). Grâce à (1.1.8), on peut supposer  $E$  de degré 0 associé à un  $A$ -faisceau  $J$ -adique constructible. Alors, l'assertion est essentiellement (SGA5 VI 2.2.2). Pour la première partie de (iii), on est ramène de même à voir que si  $E$  est un  $A$ -faisceau  $J$ -adique constant tordu constructible, les  $A$ -faisceaux  $\mathbf{R}^p f_*(E)$  ( $p \in \mathbf{N}$ ) sont constants tordus constructibles. Cela se voit comme (SGA5 V 2.2.2), en utilisant le lemme de SHIH (SGA5 V A 3.2) et la stabilité des catégories des faisceaux abéliens localement constants constructibles par images directes supérieures (SGA4 XVI 2.2). L'assertion (ii) résulte sans peine de (1.1.7), et on en déduit aussitôt la deuxième partie de (iii) (compte tenu de la première).

**1.2.** Soient  $X$  et  $Y$  deux schémas noethériens de caractéristique résiduelles premières à  $\ell$ , et  $f : X \longrightarrow Y$  un morphisme quasiprojectif. On suppose que  $\gamma$  admet un Module inversible ample. On définit alors comme suit un foncteur exact

$$(1.2.1) \quad \mathbf{R}f^! : D^+(Y, A) \longrightarrow D^+(X, A).$$

D'après (EGA II 5.3.3), il existe une factorisation

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{j} & P_Y^r \\ & \searrow f & \swarrow q \\ & Y & \end{array},$$

avec  $j$  une immersion. On en déduit aussitôt une factorisation

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{j} & U \\ & \searrow f & \swarrow p \\ & Y & \end{array},$$

où  $i$  est une immersion fermée et  $p$  un morphisme lisse équidimensionnel de dimension  $r$ . Avec les notations de (SGA5 VI 1.3.4), on pose alors pour tout  $F \in D^+(X, A)$

$$\mathbf{R}f^!(F) = \mathbf{R}i^!(p^*F \otimes_{\mathbf{Z}_\ell} \mathbf{Z}_\ell(r))[2r],$$

où le foncteur  $\mathbf{R}i^!$  a été défini en (I 7.7.11). Pour avoir que cette définition ne dépend pas, à isomorphisme près, des choix faits, on est ramené, grâce à la technique de factorisation de *Lichtenbaum*, à prouver le théorème de *pureté cohomologique* suivant.

**Proposition 1.2.3.** — *Soient  $S, X, Y$  trois schémas noethériens de caractéristique résiduelle première à  $\ell$ , et*

$$\begin{array}{ccc} Y & \xhookrightarrow{i} & X \\ & \searrow g & \swarrow f \\ & S & \end{array}$$

*un  $S$ -couple lisse (SGA4 XVI 3.1) purement de codimension  $d$ . Pour tout  $F \in D^+(S, A)$ , on a un isomorphisme canonique fonctoriel (classe fondamentale locale)*

$$(1.2.3.1) \quad \mathbf{R}j^!(f^*F) \xleftarrow{\sim} g^*F \otimes_{\mathbf{Z}_\ell} \mathbf{Z}_\ell(-d)[-2d].$$

**Preuve :** Par (I 7.7.12), il s'agit de définir un morphisme

$$\mathbf{R}j_*(g^*F \otimes_{\mathbf{Z}_\ell} \mathbf{Z}_\ell(-d)[-2d]) \longrightarrow f^*F,$$

soit, d'après la formule de projection (I 7.7.12 (iv)),

$$f^*F \otimes_{\mathbf{Z}_\ell} \mathbf{R}j_*(\mathbf{Z}_\ell(-d)[-2d]) \longrightarrow f^*F.$$

On est ainsi ramené à définir (1.2.3.1) dans le cas où  $A = \mathbf{Z}_\ell = F$ . Il s'agit alors d'exhiber un morphisme

$$\mathbf{Z}_\ell \longrightarrow \mathbf{R}j^!(\mathbf{Z}_\ell(d))[2d].$$

Mais on sait, d'après l'assertion analogue (SGA4 VI 3) pour les composantes, que

$$\mathbf{R}^s j^!(\mathbf{Z}_\ell(d)) = 0 \quad \text{pour } s < 2d,$$



de sorte qu'il suffit d'exhiber un morphisme de  $\mathbf{Z}_\ell$ -faisceaux

$$\mathbf{Z}_\ell \longrightarrow \mathbf{R}^{2d} j^!(\mathbf{Z}_\ell(d)).$$

On prend le système projectif des morphismes classes fondamentales correspondants

$$\mathbf{Z}/\ell^{n+1}\mathbf{Z} \longrightarrow \mathbf{R}^{2d} j^!(\mu_{\ell^{n+1}}^{\otimes d}).$$

Enfin, pour voir que (1.2.3.1) est un isomorphisme, on peut supposer que  $F$  est réduit au degré 0, associé à un  $A$ -faisceau noté de même. Alors, l'assertion résulte du théorème de pureté cohomologique pour les  $A_n$ -Modules ( $n \in \mathbf{N}$ ), appliqué aux composants de  $F$ .

**Notation 1.2.4.** Si  $F$  est un  $A$ -faisceau sur  $Y$  (resp. un objet de  $D^+(Y, A)$ ), on pose pour tout  $p \in \mathbf{Z}$

$$\mathbf{R}^p f^!(F) = H^p(\mathbf{R}f^!F).$$

**1.2.5.** Si  $X, Y, Z$  sont trois schémas noethériens admettant des Modules inversibles amples, et  $f : X \longrightarrow Y$  et  $g : Y \longrightarrow Z$  deux morphismes quasiprojectifs, on a un isomorphisme

$$\mathbf{R}(g \circ f)^! \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}g^! \circ \mathbf{R}f^!,$$

avec la condition de cocycles habituelle pour un triple de tels morphismes.

Cela se voit, comme dans le cas usuel des faisceaux abéliens de torsion, par la méthode de factorisation de Lichtenbaum.

**Proposition 1.2.5** (Formule d'induction). — *Sous les hypothèses préliminaires de (1.2), soient  $E \in D_c^-(Y, A)$  et  $F \in D^+(X, A)$ . On a un isomorphisme canonique fonctoriel*

$$\mathbf{R}f^! \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(f^*E, \mathbf{R}f^!F).$$

**Preuve :** Si  $f$  est une immersion fermée, on a (I 7.7.13) un isomorphisme

$$\mathbf{R}f^! \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) \xrightarrow{\sim} f^* \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(f_*A, \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F)),$$

soit, d'après l'isomorphisme de Cartan ( $E$  et  $f_*A$  sont à cohomologie constructible)

$$\mathbf{R}f^! \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) \xrightarrow{\sim} f^* \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(f_*A, F)).$$

Utilisant à nouveau (I 7.7.3), on a

$$\mathbf{R}f^! \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) \xrightarrow{\sim} f^* \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, f^* \mathbf{R}f^! F),$$

d'où, d'après l'adjonction entre  $f^*$  et  $f_*$  (I 7.7.6)

$$\begin{aligned} \mathbf{R}f^! \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) &\xrightarrow{\sim} f^* f_* \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(f^* E, \mathbf{R}f^! F) \\ &\xrightarrow{\sim} \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(f^* E, \mathbf{R}f^! F). \end{aligned}$$

Lorsque  $f$  est lisse et équidimensionnel de dimension  $r$ , on a

$$\mathbf{R}f^! \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) \xrightarrow{\sim} f^* \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) \otimes_{\mathbf{Z}_\ell} \mathbf{Z}_\ell(r)[2r];$$

de (I 7.7.2 (ii)), on déduit alors aussitôt un morphisme “canonique”

$$\mathbf{R}f^! \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) \longrightarrow \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(f^* E, \mathbf{R}f^! F).$$

Pour voir que c'est un isomorphisme, on peut supposer que  $E$  et  $F$  sont réduits au degré 0 et que  $H^0(E)$  est un  $A$ -faisceau constructible. Il s'agit alors de voir que les morphismes canoniques

$$(I6.4.1.1) \quad f^* \underline{\mathrm{Ext}}_A^p(E, F) \longrightarrow \underline{\mathrm{Ext}}_A^p(f^* E, f^* F)$$

sont des isomorphismes; vu leur définition, cela est conséquence immédiate de l'assertion analogue pour les  $A_n$ -Modules (SGA4 XVIII). Enfin, dans le cas général, on choisit une factorisation  $f = p \circ i$  du type (1.2.2). Des deux cas précédents, on déduit des isomorphismes

$$\begin{aligned} \mathbf{R}f^! \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) &\xrightarrow{\sim} \mathbf{R}p^i \mathbf{R}i^! \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}p^! \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(i^* E, \mathbf{R}i^! F) \\ &\xrightarrow{\sim} \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(p^* i^* E, \mathbf{R}p^! \mathbf{R}i^! F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(f^* E, \mathbf{R}f^! F). \end{aligned}$$

On assure ensuite, comme d'habitude, que l'isomorphisme composé ne dépend pas de la factorisation choisie.

**1.3.** Soient  $u : A \longrightarrow B$  une  $A$ -algèbre et  $K$  un idéal de  $B$  tel que  $u(J) \subset K$ . On utilise dans l'énoncé suivant les notations de (I 8).

**Proposition 1.3.1.** — *Soit  $f : X \longrightarrow Y$  un morphisme séparé de type fini entre schémas noethériens.*

1) Soit  $E \in D(X, A)$ . On a un isomorphisme canonique

$$L u^* \mathbf{R} f_! (E) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R} f_! L u^* (E),$$

lorsque  $E \in D^-(X, A)$ , ou lorsque  $A$  est local régulier et  $J$  est son idéal maximal.

2) Plaçons-nous maintenant dans le cas où  $Y$  admet un Module inversible ample. On suppose de plus que  $\ell$  est premier aux caractéristiques résiduelles de  $Y$ , que l'anneau  $A$  est local régulier et que  $J$  est son idéal maximal. Alors pour tout  $F \in D^+(Y, A)$ , on a un morphisme canonique fonctoriel

$$L u^* \mathbf{R} f^! (F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R} f^! L u^* (F),$$

qui est un isomorphisme lorsque  $B$  est une  $A$ -algèbre finie et  $K = JB$ .

**Preuve :** Montrons 1), et définissons d'abord un morphisme

$$(1.3.1.1) \quad L u^* \mathbf{R} f_! (E) \longrightarrow \mathbf{R} f_! \mathbf{R} u^* (E).$$

D'après (I. 8.1.6), il suffit dans chacun des cas considérés de définir un morphisme

$$(1.3.1.2) \quad \mathbf{R} f_! (E) \longrightarrow u_* \mathbf{R} f_! L u^* (E).$$

Mais il est immédiat que  $u_* \mathbf{R} f_! \simeq \mathbf{R} f_! u_*$ , de sorte que l'on définit (1.3.1.2) en appliquant le foncteur  $\mathbf{R} f_!$  au morphisme d'adjonction (I 8.1.7)

$$E \longrightarrow u_* L u^* (E).$$

Pour voir que (1.3.1.1) est un isomorphisme, on se ramène, par le way-out functor lemme, au cas où  $E \in D^-(X, A)$ . Alors, grâce à la conservativité du foncteur  $u_*$ , il s'agit de montrer que le morphisme canonique

$$B \otimes_A \mathbf{R} f_! (E) \longrightarrow \mathbf{R} f_! (B \otimes_A E)$$

est un isomorphisme, ce qui résulte de (1.1.7). Montrons 2). Pour définir un morphisme

$$(1.3.1.3) \quad L u^* \mathbf{R} f^! (F) \longrightarrow \mathbf{R} f^! L u^* (F),$$

on se ramène encore, grâce à (I 8.1.6), à définir un morphisme

$$(1.3.1.4) \quad \mathbf{R}f^!(F) \longrightarrow u_* \mathbf{R}f^! \mathbf{L}u^*(F).$$

On a évidemment  $u_* \mathbf{R}f^! \simeq \mathbf{R}f^! u_*$ ; on prend pour (1.3.1.4) l'image par  $\mathbf{R}f^!$  du morphisme d'adjonction (I 8.1.7). Pour voir que (1.3.1.3) est un isomorphisme, on se ramène, après avoir choisi une "lissification" (1.2.2), à le faire successivement pour une immersion fermée et un morphisme lisse équidimensionnel. Dans le premier cas, ce n'est autre que (I 8.1.16 (iii)). Dans le second, on se ramène aussitôt à (I 8.1.16 (i)).

## 2. Dualité.

Dans tout ce paragraphe, tous les schémas considérés sont de caractéristique résiduelle première à  $\ell$ .

2.1. Soient  $X$  et  $Y$  deux schémas noethériens et  $f : X \longrightarrow Y$  un morphisme quasiprojectif. On suppose que  $Y$  admet un Module inversible ample et on se propose de définir un morphisme "trace"

$$(2.1.1) \quad \mathrm{Tr}_f : \mathbf{R}f_! \mathbf{R}f^! \longrightarrow \mathrm{id}$$

entre foncteurs de  $\mathrm{D}(Y, A)$  dans  $\mathrm{D}(Y, A)$ .

Lorsque  $f$  est une immersion fermée, on dispose d'un tel morphisme, à savoir le morphisme d'adjonction déduit de (I 7.7.12 (i)).

Lorsque  $f$  est un morphisme lisse équidimensionnel de dimension  $r$ , il s'agit de définir pour tout  $F \in \mathrm{D}(Y, A)$  un morphisme fonctoriel

$$(2.1.2) \quad \mathbf{R}f_!(f^* F \otimes_{\mathbf{Z}_\ell} \mathbf{Z}_\ell(r)[2r]) \longrightarrow F.$$

Comme  $A \otimes_{\mathbf{Z}_\ell} \mathbf{Z}_\ell(r)$  est localement libre constructible, on définit sur le modèle de (1.1.7), mais sans hypothèse de degré sur  $F$ , un isomorphisme de "projection"

$$\mathbf{R}f_!(\mathbf{Z}_\ell(r)[2r]) \otimes_{\mathbf{Z}_\ell} F \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}f_!(f^* F \otimes_{\mathbf{Z}_\ell} \mathbf{Z}_\ell(r)[2r]),$$

ce qui ramène à faire la construction de (2.1.2) dans le cas où  $A = \mathbf{Z}_\ell = F$ . Dans ce cas, comme  $\mathbf{R}^i f_! = 0$  pour  $i > 2d$  (1.1.8), il s'agit d'exhiber un morphisme "trace"

$$\mathbf{R}^{2r} f_!(\mathbf{Z}_\ell(r)) \longrightarrow \mathbf{Z}_\ell.$$

On prend le système projectif des morphismes traces “habituels”

$$\mathbf{R}^{2r} f_!(\mu_{\ell^{n+1}}^{\otimes r}) \longrightarrow \mathbf{Z}/\ell^{n+1}\mathbf{Z}.$$

Dans le cas général, on choisit pour définir (2.1.1) une factorisation  $f = p \circ i$  du type (1.2.2). Désignant par

$$u : \mathbf{R} i_! \mathbf{R} i^! \longrightarrow \text{id}$$

$$v : \mathbf{R} p_! \mathbf{R} p^! \longrightarrow \text{id}$$

les morphismes traces définis par les méthodes précédentes pour  $i$  et  $p$  respectivement, on définit  $\text{Tr}_f$  par la commutativité du diagramme

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{R} f_! \mathbf{R} f^! & \xrightarrow{\sim} & \mathbf{R} p_! \mathbf{R} i_! \mathbf{R} i^! \mathbf{R} p^! \\ \text{Tr}_f \downarrow & & \downarrow \mathbf{R} p_!(u \mathbf{R} p^!) \\ \text{id} & \xleftarrow{v} & \mathbf{R} p_! \mathbf{R} p^! \end{array} .$$

On s’assure ensuite, de a façon habituelle, que le résultat ne dépend pas de la factorisation choisie.

**2.2.** Sous les hypothèses précédentes, on se propose maintenant de définir, pour  $E \in \mathbf{D}^-(X, A)$  et  $F \in \mathbf{D}^+(Y, A)$  un morphisme “canonique” fonctoriel

$$(2.2.1) \quad \mathbf{R} f_* \mathbf{R} \underline{\text{Hom}}_A(E, \mathbf{R} f^! F) \longrightarrow \mathbf{R} \underline{\text{Hom}}_A(\mathbf{R} f_! E, F).$$

Pour cela, nous allons d’abord définir, pour  $L \in \mathbf{D}^-(X, A)$  et  $M \in \mathbf{D}^+(X, A)$  un morphisme fonctoriel

$$(2.2.2) \quad \mathbf{R} f_* \mathbf{R} \underline{\text{Hom}}_A(L, M) \longrightarrow \mathbf{R} \underline{\text{Hom}}_A(\mathbf{R} f_! L, \mathbf{R} f_! M).$$

On prendra alors pour (2.2.1) le morphisme composé

$$\begin{array}{ccc} & \mathbf{R} \underline{\text{Hom}}_A(\mathbf{R} f_! E, \mathbf{R} f_! \mathbf{R} f^! F) & \\ \nearrow (2.2.2) & & \searrow \mathbf{R} \underline{\text{Hom}}_A(\text{id}, \text{Tr}_f) \\ \mathbf{R} f_* \mathbf{R} \underline{\text{Hom}}_A(E, \mathbf{R} f^! F) & & \mathbf{R} \underline{\text{Hom}}_A(\mathbf{R} f_! E, F) \end{array}$$

Il reste à définir (2.2.2). Lorsque  $f$  est une immersion ouverte, le foncteur  $f_!$  commute aux limites inductives filtrantes, et permet donc de définir pour tout couple  $(E, F)$  de  $A$ -faisceaux sur  $X$  un morphisme fonctoriel

$$(2.2.3) \quad f_! \underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) \longrightarrow \underline{\mathrm{Hom}}_A(f_! E, f_! F),$$

à partir des morphismes analogues dans la catégorie des  $A$ -Modules. Pour définir (2.2.2) dans ce cas, on peut supposer  $L$  quasilibre et  $M$  flasque, de sorte que  $\underline{\mathrm{Hom}}_A^\bullet(L, M)$  est flasque. Le morphisme (2.2.3) fournit par fonctorialité un morphisme de complexes

$$(2.2.4) \quad f_! \underline{\mathrm{Hom}}_A^\bullet(L, M) \longrightarrow \underline{\mathrm{Hom}}_A^\bullet(f_! L, f_! M).$$

Choissant une résolution quasilibre  $P \longrightarrow f_! L$  et une résolution flasque  $f_! M \longrightarrow Q$ , on prend pour (2.2.2) le composé de (2.2.4) et du morphisme canonique

$$\underline{\mathrm{Hom}}_A^\bullet(f_! L, f_! M) \longrightarrow \underline{\mathrm{Hom}}_A^\bullet(P, Q).$$

Lorsque  $f$  est propre, il s'agit de définir un morphisme

$$\mathbf{R}f_* \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(L, M) \longrightarrow \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(\mathbf{R}f_* L, \mathbf{R}f_* M).$$

La construction que nous allons faire de (2.2.5) vaut plus généralement pour un morphisme quasicompact et quasiséparé. Cette dernière hypothèse implique que le foncteur  $f_*$  commute aux limites inductives filtrantes, et permet donc comme précédemment de définir pour tout couple  $(E, F)$  de  $A$ -faisceaux sur  $X$  un morphisme fonctoriel

$$(2.2.6) \quad f_* \underline{\mathrm{Hom}}_A(E, F) \longrightarrow \underline{\mathrm{Hom}}_A(f_* E, f_* F),$$

à partir des morphismes analogues dans la catégorie des  $A$ -Modules. Pour définir (2.2.5), on peut supposer  $L$  quasilibre et  $M$  flasque, de sorte que  $\underline{\mathrm{Hom}}_A^\bullet(L, M)$  est flasque. Le morphisme (2.2.6) fournit par fonctorialité un morphisme de complexes

$$(2.2.7) \quad f_* \underline{\mathrm{Hom}}_A(L, M) \longrightarrow \underline{\mathrm{Hom}}_A^\bullet(f_* L, f_* M).$$

On prend pour (2.2.5) le composé de (2.2.7) et du morphisme

$$\underline{\mathrm{Hom}}_A^\bullet(f_*L, f_*M) \longrightarrow \underline{\mathrm{Hom}}_A^\bullet(P, f_*M)$$

déduit d'une résolution quasilibre  $P \longrightarrow f_*L$  de  $f^*L$ .

Enfin, dans le cas général, on choisit une compactification  $f = q \circ i$  de  $f$ , et on définit (2.2.2) de façon évidente à partir des morphismes déjà définis pour  $i$  et  $q$  respectivement. Bien, entendu, on s'assure que le résultat ne dépend pas des choix faits, et notamment de la compactification choisie.

**Proposition 2.2.8.** — *Sous les hypothèses préliminaires de (2.1), soient  $E \in \mathrm{D}^-(X, A)$  et  $F \in \mathrm{D}^+(Y, A)$ . On a des isomorphismes canoniques fonctoriels :*

- (i)  $\mathbf{R}f_* \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(E, \mathbf{R}f^!F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_A(\mathbf{R}f_!E, F).$
- (ii)  $\mathbf{R}\overline{\mathrm{Hom}}_A(E, \mathbf{R}f^!F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}\overline{\mathrm{Hom}}_A(\mathbf{R}f_!E, F).$
- (iii)  $\mathbf{R}\mathrm{Hom}_A(E, \mathbf{R}f^!F) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}\mathrm{Hom}_A(\mathbf{R}f_!E, F).$
- (iv)  $\mathrm{Hom}_A(E, \mathbf{R}f^!F) \xrightarrow{\sim} \mathrm{Hom}_A(\mathbf{R}f_!E, F).$

**Preuve :** Nous allons voir que (2.2.1) est un isomorphisme. Les autres assertions en résulteront en appliquant aux deux membres les foncteurs respectifs  $\mathbf{R}\overline{\Gamma}(Y, \cdot)$ ,  $\mathbf{R}\Gamma(Y, \cdot)$  (I 7.4.10) et  $\mathrm{Hom}_A(A, \cdot)$  d'après (I 7.4.18). Pour voir que (2.2.1) est un isomorphisme, on se ramène par le way-out functor lemma au cas où  $E$  et  $F$  sont les complexes de degré 0 associés à des  $A$ -faisceaux notés de même. Les constructions aboutissant à la définition de (2.2.1) peuvent alors être faites au moyen de résolutions flasques ou quasilibres dans  $\mathbf{E}(X, J)$  et  $\mathbf{E}(Y, J)$ . Si  $E = (E_n)_{n \in \mathbf{N}}$  et  $F = (F_n)_{n \in \mathbf{N}}$ , l'assertion résulte alors aussitôt du fait que les morphismes de dualité

$$\mathbf{R}f_* \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_{A_m}(E_m, \mathbf{R}f^!F_n) \longrightarrow \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_{A_m}(\mathbf{R}f_!E_m, F_n) \quad (m, n \in \mathbf{N}; m \geq n)$$

sont des isomorphismes, et de ce que les foncteurs  $\mathbf{R}^i f_*$  ( $i \in \mathbf{Z}$ ) commutent aux limites inductives filtrantes.

**2.3.** A partir de maintenant, on suppose, pour simplifier, que  $A = \mathbf{Z}_\ell$  et  $J = \ell \mathbf{Z}_\ell$ . Étant donné un complexe  $K \in D^+(X, \mathbf{Z}_\ell)$ , on pose pour tout  $F \in D^-(X, \mathbf{Z}_\ell)$

$$D_K(F) = \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_{\mathbf{Z}_\ell}(F, K).$$

**Définition 2.3.1.** — Soit  $X$  un schéma noethérien. On dit qu'un complexe  $K$  de  $\mathbf{Z}_\ell$ -faisceaux sur  $X$  est dualisant si pour tout  $F \in D_c^b(X, \mathbf{Z}_\ell)$ , on a  $D_K(F) \in D_c^b(X, \mathbf{Z}_\ell)$ , et si le morphisme “de Cartan”

$$(2.3.2) \quad F \longrightarrow D_{K^\circ} D_K(F)$$

que l'en en déduit est un isomorphisme.

Explicitons (2.3.2). Comme  $D_K(F) \in D_c^b(X, \mathbf{Z}_\ell)$ , le morphisme (I 7.6.5)

$$\mathrm{Hom}_{\mathbf{Z}_\ell}(D_K(F) \otimes F, K) \longrightarrow \mathrm{Hom}_{\mathbf{Z}_\ell}(D_K(F), D_K(F))$$

est un isomorphisme (II 2.6). L'image inverse de l'identité de  $D_K(F)$  définit un morphisme

$$F \otimes D_K(F) \longrightarrow K.$$

Comme  $F \in D_c^b(X, \mathbf{Z}_\ell)$ , une nouvelle application de l'isomorphisme de Cartan permet d'en déduire le morphisme (2.3.2) annoncé.

**Proposition 2.3.2** (Formules d'échange). — Soient  $X$  et  $Y$  deux schémas noethériens de caractéristique résiduelle première à  $\ell$ , et  $f : X \longrightarrow Y$  un morphisme quasiprojectif. On suppose que  $Y$  admet un Module inversible ample. Étant donné  $K_Y \in D^+(Y, \mathbf{Z}_\ell)$ , on pose

$$K_X = \mathbf{R}f^!(K_Y), \quad D_X = D_{K_X}, \quad D_Y = D_{K_Y}.$$

a) Il existe, pour  $F \in D^-(X, \mathbf{Z}_\ell)$ , un isomorphisme fonctoriel

$$(i) \quad \mathbf{R}f_* D_X(F) \xrightarrow{\sim} D_Y \mathbf{R}f_!(F).$$

Si  $K_X$  et  $K_Y$  sont dualisants et  $F \in D_c^b(X, \mathbf{Z}_\ell)$ , on a un isomorphisme fonctoriel

$$(ii) \quad \mathbf{R}f_! D_X(F) \xrightarrow{\sim} D_Y \mathbf{R}f_*(F).$$



b) Il existe, pour  $D^-(Y, \mathbf{Z}_\ell)$ , un isomorphisme fonctoriel

$$(i) \quad \mathbf{R}f^! D_Y(F) \xrightarrow{\sim} D_X(f^* F).$$

Si  $K_X$  et  $K_Y$  sont dualisants et  $F \in D_c^b(Y, \mathbf{Z}_\ell)$ , on a un isomorphisme fonctoriel

$$(ii) \quad f^* D_Y(F) \xrightarrow{\sim} D_X \mathbf{R}f^!(F).$$

**Preuve :** Formellement identique à celle de (SGA5 I 1.12), dont d'ailleurs (2.3.2) n'est qu'une paraphrase.

**Proposition 2.3.3.** — Soient  $X$  un schéma noethérien de caractéristiques résiduelles premières à  $\ell$ .

- (i) Si  $X$  est régulier, de dimension finie, et satisfait aux conditions de (SGA5 I 3.4.1), le complexe  $\mathbf{Z}_\ell$  est dualisant sur  $X$ .
- (ii) Si  $X$  est régulier excellent de caractéristique 0, et admet un Module inversible ample, alors pour tout morphisme quasiprojectif  $f : T \longrightarrow Y$ , le complexe  $\mathbf{R}f^!(\mathbf{Z}_\ell)$  est dualisant sur  $T$ .
- (iii) Soient  $k$  un corps et  $f : X \longrightarrow S = \text{Spec}(k)$  un morphisme quasiprojectif, avec  $\dim(X) \leq 2$ . Alors  $\mathbf{R}f^!(\mathbf{Z}_\ell)$  est dualisant sur  $X$ .

**Preuve :** Montrons par exemple (ii), les autres assertions se prouvant de façon essentiellement identique, à partir des énoncés correspondants de (SGA5 I). Montrons tout d'abord que si  $E \in D_c^b(T, \mathbf{Z}_\ell)$ , alors  $\mathbf{R}\underline{\text{Hom}}_{\mathbf{Z}_\ell}(E, \mathbf{R}f^!(\mathbf{Z}_\ell)) \in D_c^b(T, \mathbf{Z}_\ell)$ .

**Lemme 2.3.4.** — Si  $F \in D_c^+(X, \mathbf{Z}_\ell)$ , alors  $\mathbf{R}f^!(F) \in D_c^+(T, \mathbf{Z}_\ell)$ .

On se ramène à le voir lorsque  $F$  est un  $\mathbf{Z}_\ell$ -faisceau constructible. Alors cela résulte de la façon habituelle (SGA5 VI) du lemme de Shih, et de l'énoncé analogue pour les  $\mathbf{Z}/\ell^{n+1}\mathbf{Z}$ -Modules constructibles ( $n \in \mathbf{N}$ ) et pour les  $\mathbf{Z}_\ell[T]$ -Modules constructibles. Comme les hypothèses de (II 2.5 (iii)) sont réalisées (SGA5 I 3.3.1) il résulte du lemme que

$$\mathbf{R}\underline{\text{Hom}}_{\mathbf{Z}_\ell}(E, \mathbf{R}f^!(\mathbf{Z}_\ell)) \in D_c^+(T, \mathbf{Z}_\ell).$$

Pour voir qu'il est borné, on peut supposer que  $E$  est un  $\mathbf{Z}_\ell$ -faisceau constructible. Alors, on peut prendre une résolution quasilibre (resp. flasque) de  $E$  (resp.  $\mathbf{R}f^!(\mathbf{Z}_\ell)$ ) "canonique" dans  $\mathbf{E}(T, \ell\mathbf{Z}_\ell)$ , en ce sens que c'est un système projectif de résolutions quasilibres (resp. flasques) des composants. Comme la dimension quasi-injective des  $\mathbf{R}f^!(\mathbf{Z}/\ell^{n+1}\mathbf{Z})$  est indépendante de  $n$  (preuve de SGA5 I 3.4.3), l'assertion en résulte aussitôt. Il reste à voir que, posant

$$K = \mathbf{R}f^!(\mathbf{Z}_\ell)$$

le morphisme canonique  $E \longrightarrow D_K \circ D_K(E)$  est un isomorphisme. Pour cela, désignant par  $u_\circ : \mathbf{Z} \longrightarrow \mathbf{Z}/\ell\mathbf{Z}$  le morphisme d'anneaux canonique, il suffit (II 8.2.2) de voir que le morphisme correspondant

$$(2.3.5) \quad \mathbf{L}u_\circ^*(E) \longrightarrow \mathbf{L}u_\circ^* D_K \circ D_K(E)$$

est un isomorphisme. Posant  $L = \mathbf{R}u_\circ^*(K)$ , les différentes compatibilités exposées en (I 8) montrent que (2.3.5) s'identifie au morphisme canonique

$$\mathbf{L}u_\circ^*(E) \longrightarrow D_L \circ D_L(\mathbf{L}u_\circ^*(E)).$$

Comme  $L = \mathbf{R}f^!(\mathbf{Z}/\ell\mathbf{Z})$  (1.3.1;2), et  $\mathbf{L}u_\circ^*(E) \in D_c^b(X, \mathbf{Z}/\ell\mathbf{Z})$  (II 2.13.1), l'assertion résulte alors de (SGA5 I 3.4.3). On aurait pu également utiliser (II 2.13.9), qui éclaire bien la situation.

**Proposition 2.3.6.** — *Soient  $k$  un corps séparablement clos de caractéristique différente de  $\ell$ ,  $S = \text{Spec}(k)$  et  $f : X \longrightarrow S$  et  $g : Y \longrightarrow S$  deux  $S$ -schémas quasiprojectifs, d'où un diagramme commutatif évident*

$$\begin{array}{ccc} & X \times_S Y & \\ p \swarrow & \downarrow b & \searrow q \\ X & & Y \\ f \searrow & & \swarrow g \\ & S & \end{array} .$$

*On suppose que les schémas de type fini sur  $S$  et de dimension  $\leq \dim(X) + \dim(Y)$  sont fortement désingularisables (SGA5 3.1.5) ce qui a lieu notamment si  $\text{car}(k) = 0$ , ou si  $k$  est parfait et  $\dim(X \times_S Y) \leq 2$ . On pose*

$$K_X = \mathbf{R}f^!(\mathbf{Z}_\ell), \quad K_Y = \mathbf{R}g^!(\mathbf{Z}_\ell), \quad K_{X \times_S Y} = \mathbf{R}h^!(\mathbf{Z}_\ell).$$

Ces complexes sont dualisants pour  $X, Y$  et  $X \times_S Y$  respectivement, et on note  $D_X, D_Y, D_{X \times_S Y}$  les foncteurs dualisants correspondants.

Alors

a) Il existe un isomorphisme canonique

$$p^* K_X \otimes q^* K_Y \xrightarrow{\sim} K_{X \times_S Y}.$$

b) Pour  $F \in D_c^b(X, \mathbf{Z}_\ell)$  et  $G \in D_c^b(X, \mathbf{Z}_\ell)$ , il existe un isomorphisme canonique fonctoriel

$$p^* D_X(F) \otimes q^* D_Y(G) \xrightarrow{\sim} D_{X \times_S Y}(p^* F \otimes q^* G).$$

**Preuve :** L'énoncé est une paraphrase de (SGA5 III 3.1). Le fait que  $K_X, K_Y$  et  $K_{X \times_S Y}$  soient dualisants résulte, sur le modèle de la preuve de (2.3.3), de (SGA5 I App.7.5). Utilisant (II 2.13.9), et diverses compatibilités évidentes, les assertions a) et b) résultent par simple passage à la limite des assertions correspondantes (SGA5 III 3.1) pour les  $(\mathbf{Z}/\ell^{n+1}\mathbf{Z})$ -Modules ( $n \in \mathbf{N}$ ).

Avant d'énoncer la proposition suivante, précisons quelques définitions et notations de (I 8.3). Soit  $X$  un schéma noethérien. On définit la catégorie, notée

$$\mathbf{Q}_\ell - \text{fsc}(X)$$

des  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceaux sur  $X$ , au moyen de la partie multiplicative  $\mathbf{Z}_\ell - 0$  de  $\mathbf{Z}_\ell$  (I 8.3). Étant donné  $d \in \mathbf{Z}$  le  $\mathbf{Z}_\ell$ -faisceau  $\mathbf{Z}_\ell(d)$  définit un  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceau, noté de préférence

$$\mathbf{Q}_\ell(d).$$

Comme on l'a indiqué dans (I 8.3), on étend sans peine aux  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceaux le formalisme développé pour les  $\mathbf{Z}_\ell$ -faisceaux. Ainsi, on dit qu'un  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceau  $F$  est *constructible* (resp. *constant tordu constructible*) s'il est isomorphe à l'image d'un  $\mathbf{Z}_\ell$ -faisceau du même type. La sous-catégorie pleine, notée  $\mathbf{Q}_\ell - \text{fscn}(X)$  (reps.  $\mathbf{Q}_\ell - \text{fsct}(X)$ ), de  $\mathbf{Q}_\ell - \text{fsc}(X)$  engendrée par les  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceaux constructibles (resp. constants tordus constructibles) est *exacte*. De même, si  $K$  est un objet de  $D(X, \mathbf{Q}_\ell)$ , on dit que  $K$  est à cohomologie constructible (resp. constante tordu

constructible) s'il est isomorphe dans  $D(X, \mathbf{Q}_\ell)$  à un complexe de  $\mathbf{Z}_\ell$ -faisceaux constructible (resp. constant constructible). On note

$$D_c(X, \mathbf{Q}_\ell) \quad (\text{resp. } D_t(X, \mathbf{Q}_\ell))$$

la sous-catégorie triangulée pleine de  $D(X, \mathbf{Q}_\ell)$  définie par les complexes à cohomologie constructible (resp. constante tordue constructible).

**Proposition 2.3.7** (Dualité locale). — *Soient  $X$  un schéma quasiprojectif et lisse de dimension  $d$  sur un corps séparablement clos, et  $x$  un point fermé de  $X$ . Pour tout  $F \in D_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ , on a une dualité parfaite entre espaces vectoriels de dimension finie sur  $\mathbf{Q}_\ell$*

$$\underline{\text{Ext}}_{\mathbf{Q}_\ell}^{2d-i}(F, \mathbf{Q}_\ell(d))_x \times H_x^i(F) \longrightarrow \mathbf{Q}_\ell.$$

**Preuve :** On convient d'identifier, comme on l'a fait dans l'énoncé, un  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceau constructible ponctuel et le  $\mathbf{Q}_\ell$ -espace vectoriel de dimension finie correspondant (SGA5 VI 1.4.3). Soit

$$i : x \hookrightarrow X$$

l'immersion fermée canonique. Posons  $K_X = \mathbf{Z}_\ell(d)[2d]$  et  $K_x = \mathbf{Z}_\ell$ ; ce sont des complexes dualisants pour  $X$  et  $x$  respectivement (2.3.3) et l'on a (1.2.3)

$$\mathbf{R}i^!(K_X) \xrightarrow{\sim} K_x \quad (\text{canoniquement}).$$

Notant  $D_X = D_{K_X}$ ,  $D_x = D_{K_x}$ , la formule d'induction complémentaire fournit un isomorphisme (2.3.2 b) (ii))

$$i^* D_X(F) \xrightarrow{\sim} D_x \mathbf{R}i^!(F).$$

Avec des notations évidentes, on a donc

$$D_X(F)_x \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}\text{Hom}_{\mathbf{Q}_\ell}(\mathbf{R}\Gamma_x(F), \mathbf{Q}_\ell).$$

L'assertion en résulte aussitôt, grâce au fait que  $\mathbf{Q}_\ell$  est un injectif dans la catégorie des  $\mathbf{Q}_\ell$ -espaces vectoriels.

**Remarque 2.3.8.** Nous avons seulement donné ici la variante la moins technique du théorème de dualité locale, et renvoyons le lecteur à (SGA5 I 4) pour des énoncés plus généraux.

**2.4.** Replaçons-nous sous les hypothèses préliminaires de (2.3.6). Nous allons indiquer brièvement comment les constructions de (SGA5 III 3) se transposent dans notre cadre et permettent de démontrer un théorème de *Lefschetz-Verdier*.

**Proposition 2.4.1.** — Soient  $F \in D_c^b(X, \mathbf{Z}_\ell)$ ,  $G \in D_c^b(Y, \mathbf{Z}_\ell)$ .

a) Il existe un isomorphisme canonique fonctoriel

$$\mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_{\mathbf{Z}_\ell}(p^*F, q^*G) \xrightarrow{\sim} p^*D_X(F) \otimes q^*G.$$

b) Il existe un accouplement parfait canonique

$$\mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_{\mathbf{Z}_\ell}(p^*F, \mathbf{R}q^!G) \times \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_{\mathbf{Z}_\ell}(q^*G, \mathbf{R}p^!F) \longrightarrow K_{X \times_S Y}.$$

**Preuve :** Formellement identique à celle de (SGA5 III 3.2), à partir de (2.3.2) et (2.3.6). On notera que, comme tous les complexes entrant en jeu sont à cohomologie constructible, on dispose sans restriction de l'isomorphisme de Cartan (II 2.6).

**Proposition 2.4.2.** — Si  $F \in D_c^b(X, \mathbf{Z}_\ell)$ ,  $G \in D_c^b(Y, \mathbf{Z}_\ell)$ , on a des isomorphismes canoniques

$$(i) \quad \mathbf{R}h_* \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_{\mathbf{Z}_\ell}(p^*F, \mathbf{R}q^!G) \xrightarrow{\sim} \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}_{\mathbf{Z}_\ell}(\mathbf{R}p_!(F), \mathbf{R}q_*(G)).$$

$$(ii) \quad \mathrm{Hom}_{\mathbf{Z}_\ell}(p^*F, \mathbf{R}q^!G) \xrightarrow{\sim} \mathrm{Hom}_{\mathbf{Z}_\ell}(\mathbf{R}p_!(F), \mathbf{R}q_*(G)).$$

**Preuve :** La preuve de l'assertion (i) est formellement identique à celle de (SGA5 III 2.2.1). On en déduit (ii) en appliquant aux deux membres le foncteur  $\mathrm{Hom}_{\mathbf{Z}_\ell}(\mathbf{Z}_\ell, .)$  (I 7.4.6).

Supposons maintenant que  $X$  et  $Y$  soient *propres* sur  $S$ , et soient  $F \in D_c^b(X, \mathbf{Z}_\ell)_{\mathrm{torf}}$ ,  $G \in D_c^b(Y, \mathbf{Z}_\ell)_{\mathrm{torf}}$ . Les complexes  $\mathbf{R}f_*(F)$  et  $\mathbf{R}g_*(G)$  sont *parfaits* : en effet, (1.1.11 (i) et (ii)), ils appartiennent à  $D_c^b(S, \mathbf{Z}_\ell)_{\mathrm{torf}}$  et, comme le corps  $k$  est séparablement clos,  $D_c(S, \mathbf{Z}_\ell) = D_t(S, \mathbf{Z}_\ell)$ .

Donnons-nous de plus deux familles  $\varphi$  et  $\psi$  de supports sur  $X \times_S Y$ . On construit alors comme suit un diagramme

(2.4.3)

$$\begin{array}{ccc}
 & & H^0_\varphi(X \times_S Y, \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}(p^*F, \mathbf{R}q^*G)) \times H^0_\psi(X \times_S Y, \mathbf{R}\underline{\mathrm{Hom}}(p^*F, \mathbf{R}q^*G)) \\
 & \swarrow (a) & \\
 \mathrm{Hom}(\mathbf{R}f_*F, \mathbf{R}g_*G) \times \mathrm{Hom}(\mathbf{R}g_*G, \mathbf{R}f_*F) & & \\
 & \searrow (c) & \\
 & & H^0(S, \mathbf{Z}_\ell) \leftarrow
 \end{array}$$

Compte tenu de l'isomorphisme (2.4.2 (ii)), la flèche (a) n'est autre que la restriction du support. La flèche (b) résulte sans peine de l'accouplement (2.4.1 b)). La flèche (c) est le cup-produit défini en (II 2.11). Enfin, la flèche s'obtient immédiatement à partir du morphisme trace

$$\mathbf{R}h_*(K_{X \times_S Y}) \longrightarrow \mathbf{Z}_\ell.$$

**Théorème 2.4.4** (Lefschetz-Verdier). — *Le diagramme (2.4.3) ci-dessus est commutatif.*

**Preuve :** Utilisant les notations de (II 2.13.9), il suffit de voir que pour tout  $n \in \mathbf{N}$ , le diagramme déduit de (2.4.3) après application du foncteur  $\mathbf{L}(\alpha_n)^*$  est commutatif. Comme le foncteur  $\mathbf{L}(\alpha_n)^*$  commute à toutes les opérations usuelles, l'assertion résulte donc de (SGA 5 III 3.3) pour les  $(\mathbf{Z}/\ell^{n+1}\mathbf{Z})$ -Modules ( $n \in \mathbf{N}$ ).

### 3. Formalisme des fonctions $L$ .

Soit  $p$  un nombre premier  $\neq \ell$ . On note  $f$  l'élément de Frobenius  $u \mapsto u^p$  ( $u \in \overline{\mathbf{F}}_p$ ), qui est un générateur topologique du groupe de Galois  $\mathrm{Gal}(\overline{\mathbf{F}}_p/\mathbf{F}_p)$ .

Étant donné un schéma  $X$  de type fini sur  $\mathbf{F}_p$ , on note  $X^\circ$  l'ensemble des points fermés de  $X$ , et, pour tout  $x \in X^\circ$ , on désigne par  $d(x)$  le degré résiduel de  $x$ . Choissant pour tout  $x \in X^\circ$  un point géométrique  $\bar{x}$  au-dessus de  $x$ , on rappelle (SGA 5 XV 3) que la fonction  $L$  d'un  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceau constructible  $F$  sur  $X$  est définie

par la formule

$$(3.0) \quad L_F(f) = \prod_{x \in X^\circ} (1 / \det(1 - f_{F_{\bar{x}}}^{-d(x)} t^{d(x)})).$$

Grâce à la propriété de multiplicativité de (SGA 5 XV 3.1 a)), on peut prolonger cette définition à  $D_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ , en posant pour tout  $E \in D_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$

$$(3.1) \quad L_E(f) = \prod_{i \in \mathbf{Z}} (L_{H^i(E)}(t))^{(-1)^i}.$$

**Proposition 3.2.** — *Soit  $X$  un schéma de type fini sur  $\mathbf{F}_p$ .*

*a) Pour tout triangle exact*

$$\begin{array}{ccc} & E'' & \\ \swarrow \text{---} & & \nwarrow \\ E' & \xrightarrow{\quad} & E \end{array}$$

*de  $D_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ , on a*

$$L_E(t) = L_{E'}(t) L_{E''}(t).$$

*En particulier, pour tout  $m \in \mathbf{Z}$ , on a*

$$L_{E[m]}(t) = (L_E(t))^{(-1)^m}.$$

*b) Soient  $Y$  un sous-schéma fermé de  $X$ , et  $U = X - Y$  l'ouvert complémentaire.*

*On a*

$$L_E = L_{E|U} L_{E|Y},$$

*pour tout  $E \in D_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ .*

*c) Soit  $h : X \rightarrow S$  un morphisme de schémas de type fini sur  $\mathbf{F}_p$ . Pour tout*

*$E \in D_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ , on a*

$$L_E = \prod_{s \in S^\circ} L_{E|X_s}.$$

**Preuve :** Immédiat à partir des assertions analogues pour les objets de cohomologie (SGA5 XV 3.1).

**Proposition 3.3.** — Soient  $X$  un schéma de type fini sur  $\mathbf{F}_p$ ,  $g : X \longrightarrow \mathbf{F}_p$  le morphisme structural et  $E \in D_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ . Alors

$$L_E = L_{R g_!(E)}.$$

En particulier,  $L_E$  est une fraction rationnelle.

**Preuve :** On peut supposer que  $E$  est un  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceau constructible, et alors l'assertion n'est autre que (SGA5 XV 3.2).

**Corollaire 3.4.** — Soit  $h : X \longrightarrow S$  un morphisme de schémas de type fini sur  $\mathbf{F}_p$ . Pour tout  $E \in D_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ , on a

$$L_E = L_{R h_!(E)}.$$

Nous allons maintenant déduire de (3.3) une *équation fonctionnelle* pour les fonctions  $L$ , du moins si  $X$  est projectif sur  $\mathbf{F}_p$ .

**Définition 3.5.** — Soient  $g : X \longrightarrow \mathbf{F}_p$  un schéma de type fini sur  $\mathbf{F}_p$ , et  $\overline{X} = X \times_{\mathbf{F}_p} \overline{\mathbf{F}_p}$ . Pour tout  $E \in D_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ , on pose

$$\chi(E) = \text{rang}(R g_! E) = \sum_{i \in \mathbf{Z}} (-1)^i [H_c^i(\overline{X}, \overline{E}) : \mathbf{Q}_\ell],$$

$$\delta(E) = \det(R g_!(E)) = \prod_{i \in \mathbf{Z}} (\det f_{H_c^i(\overline{X}, \overline{E})})^{(-1)^i},$$

où  $\overline{E}$  désigne l'image inverse de  $E$  au-dessus de  $\overline{X}$ .

D'après les propriétés d'additivité et de multiplicativité respectives de la trace et du déterminant dans la catégorie des  $\mathbf{Q}_\ell$ -espaces vectoriels de dimension finie, il est clair que pour tout triangle exact

$$\begin{array}{ccc} & E'' & \\ \swarrow & & \nwarrow \\ E' & \xrightarrow{\quad} & E, \end{array}$$

on a

$$(3.5.1) \quad \chi(E) = \chi(E') + \chi(E'').$$



$$(3.5.2) \quad \delta(E) = \delta(E')\delta(E'').$$

En particulier, pour tout  $m \in \mathbf{Z}$  et tout  $E \in D_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ ,

$$\chi(E[m]) = (-1)^m \chi(E) \quad \text{et} \quad \delta(E[m]) = (\delta(E))^{(-1)^m}.$$

**Proposition 3.6.** — *Soit  $g : X \longrightarrow \mathbf{F}_p$  un schéma projectif sur  $\mathbf{F}_p$ . On pose  $K_X = R g^!(\mathbf{Q}_\ell)$ , et  $D_X = R \underline{\text{Hom}}_{\mathbf{Q}_\ell}(\cdot, K_X)$ . Alors, pour tout  $E \in D_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ , on a l'identité*

$$L_{D_X(E)}(t) = (-t)^{-\chi(E)} \delta(E) L_E(t^{-1}).$$

**Preuve :** Le second membre a un sens d'après (3.3). Posons  $S = \text{Spec}$  et  $D_S = R \underline{\text{Hom}}_{\mathbf{Q}_\ell}(\cdot, \mathbf{Q}_\ell)$ . D'après (2.3.2 a)), on a

$$R g_*(D_X E) \xrightarrow{\sim} D_S R g_*(E),$$

donc (3.3)

$$L_{D_X}(E) = L_{D_S(R g_*(E))}.$$

Comme  $L_E = L_{R g_*(E)}$  (3.3), l'assertion résultera du lemme suivant

**Lemme 3.7.** — *Si  $F \in D_c^b(S, \mathbf{Q}_\ell)$ , on a :*

$$L_{D_S(F)}(t) = (-t)^{\chi(F)} \delta(F) L_F(t^{-1}).$$

D'après les propriétés d'additivité et demultiplicativité (3.5.1) et (3.5.2), on peut supposer que  $F \in \mathbf{Q}_\ell - \text{fscn}(S)$ . Alors  $F$  correspond (SGA5 VII 1.4.2) à un  $\mathbf{Q}_\ell$ -espace vectoriel de dimension fini  $V$  muni d'une opération continue  $f_V$  du Frobenius, et le  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceau  $D_S(F) = \underline{\text{Hom}}_{\mathbf{Q}_\ell}(F, \mathbf{Q}_\ell)$  correspond (II 1.26) au  $\mathbf{Q}_\ell$ -espace vectoriel  $V^\vee$  muni de l'opération continue  $(f_V^\vee)^{-1}$  du Frobenius. Il suffit alors de montrer que, étant donnés un corps  $K$ , un  $K$ -espace vectoriel de dimension finie  $V$  et un automorphisme  $u$  de  $V$ , on a l'identité

$$(3.8) \quad 1/\det(1 - u^{-1}t) = (-t)^{-\dim(V)} \det(u)/\det(1 - ut^{-1})$$

dans  $K(t)$ . On peut pour cela supposer  $K$  algébriquement clos, donc  $u$  triangulable, puis, grâce aux propriétés de multiplicativité du déterminant, que  $\dim(V) = 1$ . Alors  $u$  est l'homothétie définie par un scalaire non nul  $\lambda$ , et (3.8) est l'identité évidente

$$1/(1 - (t/\lambda)) = (-\lambda/t)/(1 - (\lambda/t)).$$

Bien entendu, la formule (3.6) ne présente d'intérêt en pratique que si l'on dispose d'une expression simple pour  $D_X(E)$ . Nous allons maintenant donner des cas où il en est ainsi.

**Proposition 3.9.** — *On suppose  $X$  quasiprojectif, lisse et purement de dimension  $n$  sur  $\mathbf{F}_p$ . Posant pour tout  $E \in D_c^b(S, \mathbf{Q}_\ell)$*

$$E^V = \underline{\mathrm{Hom}}_{\mathbf{Q}_\ell}(E, \mathbf{Q}_\ell),$$

*on a un isomorphisme*

$$D_X(E) \simeq E^V(n)[2n]$$

*dans chacun des cas suivants*

(i)  $E \in D_t^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$

(ii)  $X$  est une courbe, et  $E$  est un  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceau constructible de la forme  $i_*(M)$ , où  $i : U \hookrightarrow X$  est l'inclusion d'un ouvert dense de  $X$  et  $M \in \mathbf{Q}_\ell - \mathrm{fsct}(U)$ .

**Preuve :** Comme  $D_X(E) = \mathrm{R}\underline{\mathrm{Hom}}_{\mathbf{Q}_\ell}(E, \mathbf{Q}_\ell(n)[2n])$ , le cas (i) résulte du lemme suivant.

**Lemme 3.9.1.** — *Étant donné un schéma noethérien  $X$ ,  $F \in \mathbf{Q}_\ell - \mathrm{fsct}(X)$  et  $G \in \mathbf{Q}_\ell - \mathrm{fscn}(U)$ , on a :*

$$\underline{\mathrm{Ext}}_{\mathbf{Q}_\ell}^j(F, G) = 0 \quad (j \geq 1).$$

Il s'agit de voir que si  $F \in \mathbf{Z}_\ell - \mathrm{fsct}(X)$  et  $G \in \mathbf{Z}_\ell - \mathrm{fscn}(X)$ , les  $\mathbf{Z}_\ell$ -faisceaux  $\underline{\mathrm{Ext}}_{\mathbf{Z}_\ell}^j(F, G)$  ( $j \geq 1$ ) sont annulés par une puissance de  $\ell$ . D'après (I 6.4.2) et (II 1.2.1), on peut, quitte à se restreindre à des parties localement fermées convenables de  $X$ , supposer que  $G \in \mathbf{Z}_\ell - \mathrm{fsct}(X)$ . Alors, compte tenu de (II 1.26),

l'assertion résulte de l'assertion analogue, bien connue, pour les  $\mathbf{Z}_\ell$ -modules de type fini. Montrons (ii).

Il s'agit de voir que

$$P^j = \underline{\mathrm{Ext}}_{\mathbf{Q}_\ell}^j(E, \mathbf{Q}_\ell(1)) = 0 \quad (j \geq 1).$$

Comme  $M$  est constante tordu constructible, il résulte du cas (i) que  $P^j|_U = 0$ . Il nous suffit donc de voir que pour tout point fermé  $x$  de  $Y = X - U$  et tout point géométrique  $\bar{x}$  au-dessus de  $x$ , on a  $P_x^j = 0$ . Le pendant pour les  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceaux de la variante (SGA5 I 4.6.2) du théorème de dualité locale fournit un accouplement parfait

$$(3.9.2) \quad \underline{\mathrm{Ext}}_{\mathbf{Q}_\ell}^j(E, \mathbf{Q}_\ell(1)) \times \mathbf{H}_{\bar{x}}^{2-j}(E) \longrightarrow \mathbf{Q}_{\ell'}$$

avec (SGA5 I 4.5.1)

$$\mathbf{H}_{\bar{x}}^{2-j} = (\mathbf{H}_x^{2-j}(E))_{\bar{x}}.$$

Comme le morphisme d'adjonction canonique

$$E \longrightarrow i_* i^*(E)$$

est un isomorphisme, il résulte de la première suite exacte de (SGA4 V 4.5) que

$$\mathbf{H}_x^0(E) = \mathbf{H}_x^1(E) = 0,$$

d'où aussitôt le résultat annoncé.

Ceci dit, lorsque  $X$  est projectif sur  $\mathbf{F}_\ell$ , la formule (3.6) prend la forme

$$(3.10) \quad L_{E^\vee}(p^{-n}t) = (-1)^{-\chi(E)} \delta(E) L_E(t^{-1}),$$

dans chacun des cas de (3.9). Compte tenu de (3.2 a)), cela résulte du lemme suivant.

**Lemme 3.11.** — *Soient  $X$  un schéma de type fini sur  $\mathbf{F}_\ell$ , et  $F \in \mathbf{D}_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ . Posant  $F(j) = F \otimes \mathbf{Q}_\ell(j)$  ( $j \in \mathbf{Z}$ ), on a la relation*

$$L_{F(j)}(t) = L_F(p^{-j}t).$$

D'après les propriétés de multiplicativité (3.2 a)), on peut pour le voir supposer que  $F$  est un  $\mathbf{Q}_\ell$ -faisceau constructible; alors, comme le Frobenius opère sur  $\mathbf{Q}_\ell(j) \simeq \mathbf{Q}_\ell$  (non canoniquement) par l'homothétie de rapport  $p^{-j}$ , l'assertion est immédiate sur la définition (3.0).

Supposons maintenant qu'on ait de plus un isomorphisme

$$E^\vee \xrightarrow{\sim} E(\rho) \quad \text{pour un } \rho \in \mathbf{Z}.$$

Alors la formule (3.10) prend la forme

$$L_E(p^{-n-\rho}t) = (-t)^{-\chi(E)} \delta(E) L_E(t^{-1}),$$

ou encore, après avoir posé  $q = n + \rho$  et fait le changement de variable  $t \mapsto t^{-1}$ ,

$$(3.12) \quad L_E(1/qt) = (-t)^{\chi(E)} \delta(E) L_E(t).$$

**Remarque 3.13.** Sous les hypothèses de (3.9), l'existence d'un tel entier  $p$  est assurée dans les cas suivants

cas (i)  $E \xrightarrow{\sim} \mathbf{Q}_\ell(m)$  pour un  $m \in \mathbf{Z}$ , et alors  $p = -2m$ .

cas (ii)  $M \xrightarrow{\sim} \mathbf{Q}_\ell(m)$  pour un  $m \in \mathbf{Z}$ , et alors  $p = -2m$ .

(Pour ce dernier cas, il est immédiat que

$$i_*(M^\vee) \simeq (i_*(M))^\vee. \quad )$$

Explicitons enfin une relation importante entre les entiers  $\chi(E)$  et  $\delta(E)$ .

**Proposition 3.14.** — *Soient  $X$  un schéma projectif et lisse purement de dimension  $n$  sur  $\mathbf{Z}_p$  et  $E \in \mathbf{D}_c^b(X, \mathbf{Q}_\ell)$ . On suppose qu'il existe un entier  $m$  tel que*

$$\mathbf{D}_X(E) \xrightarrow{\sim} E(m),$$

*et on pose  $q = p^m$ . Alors, on a, l'égalité*

$$\delta(E)^2 = q^{\chi(E)}.$$

**Preuve :** La substitution  $t \mapsto 1/qt$  dans (3.12) fournit l'équation fonctionnelle

$$(3.12 \text{ bis}) \quad L_E(t) = (-1/qt)^{\chi(E)} \delta(E) L_E(1/qt).$$

Multipliant (3.12) et (3.12 bis) membre à membre, on obtient l'identité

$$L_E(t) L_E(1/qt) = q^{-\chi(E)} (\delta(E))^2 L_E(t) L_E(1/qt),$$

d'où aussitôt la relation désirée, compte tenu du fait que  $L_E$  n'est pas identiquement nulle, comme il est clair sur sa définition (3.0).

