



ANNALES

DE

L'INSTITUT FOURIER

Xavier CARUSO

F_p -représentations semi-stables

Tome 61, n° 4 (2011), p. 1683-1747.

http://aif.cedram.org/item?id=AIF_2011__61_4_1683_0

© Association des Annales de l'institut Fourier, 2011, tous droits réservés.

L'accès aux articles de la revue « Annales de l'institut Fourier » (<http://aif.cedram.org/>), implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://aif.cedram.org/legal/>). Toute reproduction en tout ou partie cet article sous quelque forme que ce soit pour tout usage autre que l'utilisation à fin strictement personnelle du copiste est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

cedram

Article mis en ligne dans le cadre du
Centre de diffusion des revues académiques de mathématiques
<http://www.cedram.org/>

F_p -REPRÉSENTATIONS SEMI-STABLES

par Xavier CARUSO

RÉSUMÉ. — Soient p un nombre premier et K un corps p -adique à corps résiduel parfait (par exemple une extension finie de F_p) dont l'indice de ramification absolue est noté e . Afin d'étudier les « représentations semi-stables de p -torsion » de $G_K = \text{Gal}(\bar{K}/K)$, Breuil a défini pour tout entier positif $r < p - 1$ plusieurs catégories de (ϕ, N) -modules filtrés de torsion. Dans cet article, nous décrivons la structure de ces catégories dans le cas général (seul le cas $er < p - 1$ avait été étudié de façon systématique jusqu'à présent).

ABSTRACT. — Let p be a prime number and K be a p -adic field K with perfect residue field (for instance a finite extension of \mathbb{Q}_p), whose absolute ramification index is denoted by e . In order to study “ p -torsion semi-stable representations” of $G_K = \text{Gal}(\bar{K}/K)$, Breuil has defined for each non-negative integer $r < p - 1$ several categories of torsion filtered (φ, N) -modules. In this paper, we give a complete description of the structure of these categories in the general case (until now, only the case $er < p - 1$ was systematically studied).

Soit p un nombre premier. Soient k un corps parfait de caractéristique p , $W = W(k)$ l'anneau des vecteurs de Witt à coefficients dans k , K_0 son corps des fractions et K une extension finie de K_0 totalement ramifiée de degré e . Notons G_K le groupe de Galois absolu de K et fixons un entier $r \in \{0, \dots, p - 2\}$. Étendant de façon considérable les premiers travaux de Fontaine et Laffaille (voir [16]), Breuil a défini dans [3] et [6] une certaine catégorie de modules de torsion, notée $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ dans cet article, munie d'un foncteur T_{st} vers la catégorie des \mathbb{F}_p -représentations du groupe G_K . (Les définitions précises de ces objets seront rappelées en 2.1.) Un des intérêts principaux de la construction de Breuil est que l'image essentielle de T_{st} contient de nombreuses représentations galoisiennes classiques, comme celles données par la cohomologie étale des K -variétés propres et lisses à réduction semi-stable, ou encore les quotients annulés par p de deux réseaux à l'intérieur d'une même représentation semi-stable à poids de Hodge-Tate

Mots-clés : représentations p -adiques, théorie de Hodge p -adique, modules de Breuil.
Classification math. : 11F85, 11S20, 14F30.

compris entre 0 et r . L'étude de la catégorie $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ et du foncteur T_{st} permet comme ceci d'obtenir des résultats concernant certaines représentations galoisiennes importantes (voir par exemple [7], [19], [14]).

Lorsque $er < p - 1$, on sait, par les résultats de [3] et [11], que la catégorie $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ est abélienne et que le foncteur T_{st} est exact et pleinement fidèle. Ceci permet de transposer complètement certaines questions sur les représentations galoisiennes en termes d'algèbre (semi-)linéaire. Cependant, lorsque $er \geq p - 1$, les deux résultats précédents sont facilement mis en défaut. Le but de cet article est de dégager la structure générale de la catégorie $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ et du foncteur T_{st} : on démontre que $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ admet une sous-catégorie pleine ⁽¹⁾ $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ (dont les objets sont qualifiés de *maximaux*) qui est abélienne et en restriction à laquelle le foncteur T_{st} est exact et pleinement fidèle. De plus, on construit un foncteur $\text{Max} : \text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow \text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ qui permet de réaliser $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ également comme un quotient de $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. On a en outre $T_{\text{st}} \circ \text{Max} = T_{\text{st}}$, ce qui assure que $T_{\text{st}}(\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N})$ s'identifie à $T_{\text{st}}(\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N})$, et donc contient les exemples de représentations que nous avons donnés précédemment (cohomologie des variétés, quotients de réseaux dans les représentations semi-stables).

Afin de présenter les résultats obtenus de façon systématique, nous avons choisi d'isoler dans une première section toute une axiomatique dont l'aboutissement est la notion de *pylonet* qui sera centrale dans la suite du texte, puisque c'est elle qui décrit avec précision la structure de $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ et T_{st} . Cette première section est donc tout à fait générale et abstraite.

Dans la deuxième section, on donne les définitions des catégories de modules et des foncteurs évoqués précédemment, puis on montre que T_{st} définit un *pylonet* (Théorème 2.3.3). La construction de la sous-catégorie $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ et du foncteur Max dont il a été question auparavant découle alors de l'étude générale de la première partie. La section se termine par la preuve de la pleine fidélité de T_{st} en restriction à $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ (Théorème 2.4.1). On notera que les méthodes de démonstration sont radicalement différentes de celles utilisées dans [11] ; elles sont, selon nous, beaucoup plus conceptuelles, et semblent avoir une portée bien plus importante.

⁽¹⁾ Lorsque $er < p - 1$, on a $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} = \text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ (autrement dit, tout objet est maximal), et on retrouve la situation établie dans [11].

Les arguments de la section 2 ont l'avantage d'être efficaces, mais malheureusement ils ne nous disent pas vraiment comment mener les calculs dans la catégorie $\text{Max}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ (en particulier les calculs de noyaux et de conoyaux). Dans la section 3, nous tentons de combler cette lacune. Pour cela, on introduit la notion d'objets T_{st} -réduits, on montre que leur catégorie, notée $\text{Réd}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$, est équivalente à $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$, puis on explicite de nombreuses constructions dans $\text{Réd}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$.

On démontre également une formule de réciprocité qui permet de retrouver l'unique objet de $\text{Max}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ correspondant à une représentation donnée (Corollaire 3.5.5). Combiné au résultat principal de [12], cela donne une recette pour calculer la cohomologie log-cristalline de la fibre spéciale d'une variété \mathcal{X} à réduction semi-stable sur \mathcal{O}_K en fonction de la cohomologie étale p -adique de $\mathcal{X}_{\bar{K}}$. (Dans *loc. cit.*, on obtenait seulement une formule pour calculer la cohomologie étale en fonction de la cohomologie log-cristalline.)

Dans la dernière section, nous nous intéressons à certaines variantes de la catégorie $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ obtenues en introduisant des coefficients ou des données de descente. Dans les deux cas, on montre que l'on obtient encore des pylonets et que la restriction de T_{st} aux objets maximaux correspondants est à nouveau exacte et pleinement fidèle. Soulignons que ces variantes interviennent de façon cruciale dans [18] pour étudier certains problèmes de modularité de représentations galoisiennes liés à la généralisation par Buzzard, Diamond et Jarvis de la conjecture de modularité de Serre (voir [8] pour l'énoncé de cette généralisation). Bien que n'étant pas logiquement nécessaire, il nous semble que le cadre théorique fourni par cet article éclaire de façon spectaculaire les calculs de [18], §3.4 (voir aussi [9] à ce sujet).

Nous étudions ensuite une troisième variante, qui est celle que l'on obtient lorsque l'on ne considère que les objets qui s'écrivent comme quotients de deux modules fortement divisibles, et donc qui correspondent à des quotients de deux réseaux dans une représentation semi-stable. Encore une fois, on obtient des résultats analogues : le foncteur T_{st} définit un pylonet et sa restriction à la sous-catégorie des objets maximaux est exacte et pleinement fidèle. Finalement, on donne une description complète des objets simples de $\text{Max}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ (et de sa variante avec coefficients) lorsque le corps résiduel k est algébriquement clos.

1. Notion de pylonet

Dans [25], §2.2, Raynaud a démontré que l'ensemble des modèles entiers d'un schéma en groupes commutatifs finis et plats annulés par une puissance de p sur un corps p -adique K était naturellement un ensemble ordonné admettant un élément maximal et un élément minimal.

Dans cette section, nous introduisons un formalisme très abstrait qui rend compte de la situation décrite par le théorème de Raynaud et, comme on le verra dans la suite de l'article, rendra également compte d'autres situations en théorie de Hodge p -adique. Bien que nous adoptons un point de vue différent, les constructions que nous allons faire ainsi que les propriétés que nous allons démontrer pourront souvent être mises en parallèle avec le calcul des fractions dans les catégories localisées tel que présenté par exemple dans [17], chapitre I.

Notre point de départ est la donnée de deux catégories \mathcal{C} et \mathcal{A} et d'un foncteur $T: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{A}$, sur lequel pour l'instant on ne fait aucune hypothèse.

1.1. Catégories fibres

Soit $T: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{A}$ un foncteur covariant ⁽²⁾. Fixons A un objet de \mathcal{A} . Il y a deux définitions naturelles pour la fibre de T au-dessus de A qui sont :

- la catégorie F_A dont les objets sont les objets C de \mathcal{C} tels que $T(C) = A$ (ceci est une vraie égalité!) et dont les morphismes sont les flèches de \mathcal{C} qui s'envoient sur l'identité de A par le foncteur T ;
- la catégorie \mathcal{F}_A dont les objets sont les couples (C, f) où $C \in \mathcal{C}$ et $f: T(C) \rightarrow A$ est un *isomorphisme*, un morphisme de (C, f) dans (C', f') étant la donnée de $g \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, C')$ vérifiant $f = f' \circ T(g)$.

L'objet A étant toujours fixé, les deux catégories F_A et \mathcal{F}_A ne sont en général pas équivalentes. Précisément, on dispose d'un foncteur pleinement fidèle $F_A \rightarrow \mathcal{F}_A$ défini par $C \mapsto (C, \text{id})$. L'essentielle surjectivité n'est par contre pas automatique, mais équivaut par définition à l'axiome suivant :

(Ax0) *Pour tout $C \in \mathcal{C}$ et tout isomorphisme (dans \mathcal{A}) $f: T(C) \rightarrow A'$, il existe un isomorphisme (dans \mathcal{C}) $g: C \rightarrow C'$ tel que $T(g) = f$ (et donc $T(C') = A'$).*

⁽²⁾ Dans les applications que nous avons en vue, le foncteur T sera en réalité plutôt contravariant. Cependant, quitte à remplacer \mathcal{A} par sa catégorie opposée, cela ne modifie en rien la théorie. Nous préférons donc, pour ce premier chapitre, ne pas introduire cette complication inutile.

On remarquera que cet axiome est une version très affaiblie de l'axiome usuel de changement de base qui apparaît par exemple dans la théorie des champs (algébriques). Nous ne pouvons nous permettre dans cet article de supposer l'axiome usuel de changement de base, car il sera très loin d'être satisfait dans les exemples que nous souhaitons traiter.

Il faut remarquer que **(Ax0)** n'est pas du tout contraignant. En effet, s'il n'est pas vérifié, il est toujours possible de remplacer \mathcal{C} par une catégorie équivalente $\text{Comp}(\mathcal{C}, T)$ pour laquelle l'axiome est satisfait ⁽³⁾. Cette catégorie $\text{Comp}(\mathcal{C}, T)$ est obtenue comme suit :

- ses objets sont les triplets (C, A, f) où $C \in \mathcal{C}$, $A \in \mathcal{A}$ et $f: T(C) \rightarrow A$ est un isomorphisme ;
- un morphisme de (C, A, f) dans (C', A', f') est la donnée de deux morphismes $g \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, C')$ et $h \in \text{Hom}_{\mathcal{A}}(A, A')$ faisant commuter le diagramme suivant :

$$\begin{array}{ccc}
 T(C) & \xrightarrow[\sim]{f} & A \\
 T(g) \downarrow & & \downarrow h \\
 T(C') & \xrightarrow[\sim]{f'} & A'
 \end{array}$$

Il est facile de vérifier que le foncteur $\mathcal{C} \rightarrow \text{Comp}(\mathcal{C}, T)$, $C \mapsto (C, T(C), \text{id})$ est une équivalence de catégories. De plus, $T : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{A}$ se factorise par $\text{Comp}(\mathcal{C}, T)$ grâce au foncteur précédent et au foncteur, que nous notons encore T , $\text{Comp}(\mathcal{C}, T) \rightarrow \mathcal{A}$, $(C, A, f) \mapsto A$. Ce dernier vérifie l'axiome **(Ax0)**.

Dans la suite de cette section, pour simplifier les écritures (par exemple ceci nous permettra de travailler avec les fibres F_A au lieu de \mathcal{F}_A), nous supposerons très fréquemment l'axiome **(Ax0)**. Malgré tout, le lecteur doit garder à l'esprit que ce n'est pas du tout essentiel, et que *tous les résultats obtenus ne faisant pas intervenir de véritables égalités entre objets (mais seulement des isomorphismes) demeurent vrais sans aucune modification si l'hypothèse **(Ax0)** est relâchée*. En réalité, dans les applications que l'on va développer dans les sections suivantes, l'axiome **(Ax0)** ne sera que très rarement satisfait.

⁽³⁾Après ce remplacement, les fibres \mathcal{F}_A restent inchangées contrairement aux F_A . La première notion de fibre que nous évoquions n'est donc pas robuste, dans le sens où elle dépend de \mathcal{C} à l'intérieur même d'une classe d'équivalence de catégories (ou plus exactement de fibrations).

1.2. Le foncteur Max

En supplément de **(Ax0)**, nous introduisons les trois axiomes suivants :

(Ax1) *Le foncteur T est fidèle.*

(Ax2) *Les catégories \mathcal{C} et \mathcal{A} admettent des sommes amalgamées, et le foncteur T leur est compatible.*

(Ax3) *Pour tout $A \in \mathcal{A}$, soit la catégorie \mathcal{F}_A est vide, soit elle admet un objet final.*

Dans ce paragraphe, nous supposons simplement **(Ax0)**, **(Ax2)** et **(Ax3)**. Nous avons préféré introduire **(Ax1)** dès à présent car, comme nous allons le voir, il joue déjà un rôle particulier dans la situation que nous allons présenter.

Nous construisons un foncteur $\text{Max} : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$ comme suit. Pour tout objet A de \mathcal{A} dont la fibre est non vide, choisissons un objet final $\text{Fin}(A)$ de la catégorie F_A . Sur les objets, le foncteur Max est défini par $\text{Max}(C) = \text{Fin}(T(C))$. Le fait que C soit un objet de la fibre $F_{T(C)}$ fournit un morphisme canonique $\iota_{\text{max}}^C : C \rightarrow \text{Max}(C)$ dans la catégorie \mathcal{C} vérifiant $T(\iota_{\text{max}}^C) = \text{id}_{T(C)}$. Il reste à définir $\text{Max}(f)$ lorsque $f : C_1 \rightarrow C_2$ est un morphisme dans \mathcal{C} . Considérons pour cela $C'_2 = C_2 \oplus_{C_1} \text{Max}(C_1)$ la somme amalgamée du diagramme :

$$\begin{array}{ccc} & \text{Max}(C_1) & \\ & \uparrow \iota_{\text{max}}^{C_1} & \\ C_1 & \xrightarrow{f} & C_2 \end{array}$$

Notons $\iota' : C_2 \rightarrow C'_2$ et $f' : \text{Max}(C_1) \rightarrow C'_2$ les morphismes correspondants. Comme T est compatible aux sommes amalgamées, quitte à modifier C'_2 par un objet isomorphe (ce que l'on peut faire par l'axiome **(Ax0)**), on peut supposer que $T(C'_2) = T(C_2)$, $T(\iota') = \text{id}_{T(C_2)}$ et $T(f') = T(f)$. On en déduit que C'_2 est un objet de $F_{T(C_2)}$, d'où on déduit l'existence d'un morphisme canonique $\iota_{\text{max}}^{C'_2} : C'_2 \rightarrow \text{Max}(C_2)$. Le morphisme $\text{Max}(f)$ recherché s'obtient alors comme la composée $\iota_{\text{max}}^{C'_2} \circ f'$. Il vérifie $T(\text{Max}(f)) = T(f)$.

LEMME 1.2.1. — *Soit*

$$\begin{array}{ccc} C'_1 & \xrightarrow{g} & C'_2 \\ h_1 \uparrow & & \uparrow h_2 \\ C_1 & \xrightarrow{f} & C_2 \end{array}$$

un diagramme commutatif dans \mathcal{C} tel que $T(C_1) = T(C'_1)$, $T(h_1) = \text{id}$ et $T(C_2) = T(C'_2)$, $T(h_2) = \text{id}$. Alors $\text{Max}(f) = \text{Max}(g)$.

Démonstration. — Remarquons tout d’abord que l’hypothèse assure que $\text{Max}(C_1) = \text{Max}(C'_1)$ et $\text{Max}(C_2) = \text{Max}(C'_2)$ de sorte que les morphismes $\text{Max}(f)$ et $\text{Max}(g)$ ont bien même source et même but. Considérons le diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc}
 & & \text{Max}(C_2) \\
 & & \uparrow \iota' \\
 \text{Max}(C'_1) & \xrightarrow{g'} & C'_2 \oplus_{C'_1} \text{Max}(C'_1) \\
 \parallel & & \uparrow h_2 \oplus \text{id} \\
 \text{Max}(C_1) & \xrightarrow{f'} & C_2 \oplus_{C_1} \text{Max}(C_1)
 \end{array}
 \quad \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \curvearrowright \iota \end{array}$$

où f' et g' sont définis comme précédemment et où ι et ι' sont les morphismes canoniques d’un objet dans son Max . Ainsi par définition, $\text{Max}(f) = \iota \circ f'$ et $\text{Max}(g) = \iota' \circ g'$. Par ailleurs, comme il y a par définition un unique morphisme dans un objet final et que $(h_2 \oplus \text{id})$, ι et ι' sont des flèches dans la catégorie $F_{T(C_2)}$, on a nécessairement $\iota = \iota' \circ (h_2 \oplus \text{id})$. Il s’ensuit

$$\text{Max}(f) = \iota \circ f' = \iota' \circ (h_2 \oplus \text{id}) \circ f' = \iota' \circ g' = \text{Max}(g)$$

comme annoncé. □

Remarque. — Sous **(Ax1)**, on remarque que $\text{Max}(f)$ est l’unique morphisme tel que $T(\text{Max}(f)) = T(f)$, ce qui permet de simplifier la preuve du lemme précédent dans ce cas.

COROLLAIRE 1.2.2. — *La construction Max définit un foncteur $\mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$, et la collection des morphismes $(\iota_{\text{max}}^C)_{C \in \mathcal{C}}$ définit une transformation naturelle ι_{max} entre le foncteur identité et Max .*

Démonstration. — Le seul point qu’il reste à prouver est la compatibilité de Max à la composition des morphismes. Considérons pour cela deux morphismes composables f et g . Par le lemme 1.2.1, on a $\text{Max}(f \circ g) = \text{Max}(\text{Max}(f) \circ \text{Max}(g))$. Or $\text{Max}(f) \circ \text{Max}(g)$ est un morphisme entre objets de l’image de Max , et on vérifie immédiatement sur la définition que Max ne modifie pas un tel morphisme. Le corollaire en découle. □

Digression sur les problèmes de logique

Dans la construction précédente, on a eu besoin de choisir, pour tout $A \in \mathcal{A}$, un objet final dans F_A . Étant donné que \mathcal{A} n’est a priori pas un ensemble,

on peut se demander dans quelle mesure ce choix est légitime. Dans le cas général, il semble délicat de justifier cette opération sans introduire la théorie des univers de Grothendieck ou des considérations analogues. Toutefois, il y a au moins deux situations dans lesquelles on peut donner des solutions alternatives satisfaisantes. La première est bien entendu celle où \mathcal{C} est une petite catégorie, auquel cas il est suffisant d'invoquer l'axiome du choix. Ainsi, comme la plupart des catégories auxquelles on a affaire sont essentiellement petites, les problèmes de logique sous-jacents ne sont pas de véritables obstacles lorsque l'on envisage les applications. La seconde situation est celle où l'on suppose **(Ax1)**, et il est alors même possible de mener les constructions précédentes sans avoir recours à l'axiome du choix, quitte à remplacer \mathcal{C} par une catégorie équivalente. Soit $\bar{\mathcal{C}}$ la catégorie dont les objets sont l'union disjointe

- des objets de \mathcal{C} qui ne sont pas des objets maximaux dans leur fibre et
- des objets de \mathcal{A} qui sont dans l'image de T .

La définition des morphismes est un peu plus délicate, et utilise **(Ax1)** (du moins si l'on souhaite se passer de l'axiome du choix). Soient \bar{C}_1 et \bar{C}_2 deux objets de $\bar{\mathcal{C}}$. Si \bar{C}_1 est dans \mathcal{C} , on pose $C_1 = \bar{C}_1$; sinon, on désigne par C_1 un objet final (quelconque) de $F_{\bar{C}_1}$. On définit de même C_2 . On pose :

$$\text{Hom}_{\bar{\mathcal{C}}}(\bar{C}_1, \bar{C}_2) = \text{image}[\text{Hom}_{\mathcal{C}}(C_1, C_2) \rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(T(C_1), T(C_2))].$$

Il s'agit de montrer que la quantité du membre de droite ne dépend pas des choix de C_1 et C_2 , lorsqu'il y a effectivement plusieurs choix pour ces objets, c'est-à-dire lorsque \bar{C}_1 ou \bar{C}_2 est un objet de \mathcal{A} . On ne traite que le cas de C_1 , celui de C_2 étant analogue. Supposons donc que C_1 et C'_1 soient deux objets finaux de la même fibre F_A . Alors, il existe un (unique) morphisme $f: C_1 \rightarrow C'_1$ tel que $T(f) = \text{id}$, et on a le diagramme commutatif suivant :

$$\begin{array}{ccc} \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C_1, C_2) & \longrightarrow & \text{Hom}_{\mathcal{A}}(T(C_1), T(C_2)) \\ f^* \uparrow & & \parallel \\ \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C'_1, C_2) & \longrightarrow & \text{Hom}_{\mathcal{A}}(T(C'_1), T(C_2)) \end{array}$$

qui permet de conclure.

La catégorie $\bar{\mathcal{C}}$ est reliée aux données précédentes, notamment grâce à un foncteur $F: \mathcal{C} \rightarrow \bar{\mathcal{C}}$ défini comme suit. À un objet non final, il associe le même objet, alors qu'à un objet final, il associe son image sous T . Sur les morphismes, il est donné par la corestriction du morphisme $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(C_1, C_2) \rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(T(C_1), T(C_2))$ déduit de T . Comme T est fidèle, ce dernier morphisme est par définition injectif, et donc la corestriction considérée est une bijection. Ceci assure que F est pleinement fidèle. Par

ailleurs, on vérifie facilement qu'il est aussi essentiellement surjectif. Ainsi F est une équivalence de catégories.

La catégorie $\bar{\mathcal{C}}$ permet aussi de factoriser T : la définition même de la relation d'équivalence sur les objets de \mathcal{C} montre que la factorisation existe bien au niveau des objets, alors qu'au niveau des morphismes, cela découle de la pleine fidélité de F . (Notez que l'on ne peut pas dire plus simplement que cette factorisation est obtenue en considérant un quasi-inverse de F , puisqu'une telle construction utilise l'axiome du choix, ce qui est précisément ce que l'on souhaite éviter.) Notons $\bar{T} : \bar{\mathcal{C}} \rightarrow \mathcal{A}$ le foncteur obtenu. Il est facile de vérifier que la fibration \bar{T} vérifie encore les axiomes **(Ax0)**, **(Ax1)**, **(Ax2)** et **(Ax3)**, et que, par construction, l'objet maximal de chaque fibre non vide F_A est uniquement déterminé (à rien près). Il n'y a donc plus besoin de l'axiome du choix pour définir $\text{Fin}(A)$, ni donc le foncteur Max .

La catégorie $\text{Max}(\mathcal{C})$

DÉFINITION 1.2.3. — *Un objet $C \in \mathcal{C}$ est dit maximal si le morphisme $\iota_{\text{max}}^C : C \rightarrow \text{Max}(\mathcal{C})$ est un isomorphisme.*

PROPOSITION 1.2.4. — *Le foncteur Max est idempotent, i.e. $\text{Max} \circ \text{Max} = \text{Max}$ (sur les objets et sur les morphismes).*

L'image essentielle de Max est la sous-catégorie pleine de \mathcal{C} formée des objets maximaux. On la note $\text{Max}(\mathcal{C})$.

Démonstration. — Clair d'après les définitions. □

Remarque. — L'image de Max peut être strictement plus petite que $\text{Max}(\mathcal{C})$. Cela ne se produit toutefois pas si **(Ax0)** est vérifié.

Nous prouvons à présent plusieurs propriétés de la catégorie $\text{Max}(\mathcal{C})$ qui découlent toutes presque directement des définitions. Nous commençons pour cela par un lemme important.

LEMME 1.2.5. — *Soit $f : C \rightarrow C'$ un morphisme dans \mathcal{C} . Alors $T(f)$ est un isomorphisme si, et seulement si $\text{Max}(f)$ en est un.*

Démonstration. — Si $T(f)$ est un isomorphisme, quitte à remplacer C' par un objet isomorphe, l'axiome **(Ax0)** nous autorise à supposer que $T(f) = \text{id}$. Alors C et C' sont deux objets d'une même fibre, et par définition $\text{Max}(C) = \text{Max}(C')$ et $\text{Max}(f)$ n'est autre que l'identité entre ces deux objets.

Réciproquement si $\text{Max}(f)$ est un isomorphisme, $T(\text{Max}(f)) = T(f)$ en est un aussi. \square

PROPOSITION 1.2.6. — *Le foncteur $\text{Max}: \mathcal{C} \rightarrow \text{Max}(\mathcal{C})$ est un adjoint à gauche du foncteur d'inclusion $\text{inc}: \text{Max}(\mathcal{C}) \rightarrow \mathcal{C}$.*

Démonstration. — Soient $C \in \mathcal{C}$ et $M \in \text{Max}(\mathcal{C})$. Nous voulons exhiber une identification canonique entre $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, M)$ et $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(\text{Max}(\mathcal{C}), M)$. Or, on dispose d'une application $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, M) \rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{C}}(\text{Max}(\mathcal{C}), M)$ donnée par le foncteur Max (puisque par la proposition 1.2.4, $\text{Max}(M)$ est canoniquement isomorphe à M via ι_{max}^M) et d'une application $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(\text{Max}(\mathcal{C}), M) \rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, M)$ obtenue en composant par le morphisme canonique $\iota_{\text{max}}^C: C \rightarrow \text{Max}(\mathcal{C})$. On vérifie facilement en utilisant $\text{Max}(\iota_{\text{max}}^C) = \text{id}_{\text{Max}(\mathcal{C})}$ que les deux applications précédentes sont inverses l'une de l'autre. \square

PROPOSITION 1.2.7. — *Le foncteur $\text{Max}: \mathcal{C} \rightarrow \text{Max}(\mathcal{C})$ réalise la localisation⁽⁴⁾ de la catégorie \mathcal{C} par rapport aux morphismes f tels que $T(f)$ est un isomorphisme.*

Démonstration. — Le lemme 1.2.5 et la proposition 1.2.6 assurent que le couple $(G = \text{Max}, D = \text{inc})$ vérifie la première condition la proposition I.1.3 de [17]. Cette même proposition permet de conclure la preuve.

Il n'est à vrai dire pas non plus difficile de montrer directement la propriété universelle d'une catégorie localisée. Supposons en effet donné un foncteur F de \mathcal{C} dans une catégorie \mathcal{X} tel que $F(f)$ est un isomorphisme dès que $T(f)$ en est un. Soit G la composée $\text{Max}(\mathcal{C}) \rightarrow \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{X}$ où le premier foncteur est l'inclusion canonique et le second est F . Pour tout $C \in \mathcal{C}$, $T(\iota_{\text{max}}^C) = \text{id}_{T(C)}$ est inversible, et donc par hypothèse il en est de même de $F(\iota_{\text{max}}^C)$. La famille des $F(\iota_{\text{max}}^C)$ définit donc une transformation naturelle inversible entre les foncteurs F et $G \circ \text{Max}$. Ceci termine la preuve. \square

Remarque. — Du fait que le couple (Max, inc) vérifie la proposition I.1.3 de [17], on déduit même que la catégorie localisée $\text{Max}(\mathcal{C})$ admet un calcul des fractions à gauche (avec la terminologie de *loc. cit.*). Cela peut à nouveau se voir directement de manière très simple dans notre situation, exercice que nous laissons au lecteur.

En vertu de la proposition 1.2.7, le foncteur $T: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{A}$ se factorise par $\text{Max}(\mathcal{C})$ par l'intermédiaire d'un foncteur $T_{\text{max}}: \text{Max}(\mathcal{C}) \rightarrow \mathcal{A}$, qui n'est

⁽⁴⁾ Pour la définition d'une catégorie localisée, on pourra se reporter à [17], §I.1.

autre (d'après la preuve que l'on vient de donner) que la restriction de T à $\text{Max}(\mathcal{C})$.

PROPOSITION 1.2.8. — *Le foncteur T_{\max} est conservatif, en ce sens qu'il vérifie : f est un isomorphisme si, et seulement si $T_{\max}(f)$ en est un.*

Si le foncteur T est fidèle (resp. plein, resp. essentiellement surjectif), alors il en est de même de T_{\max} .

Démonstration. — La première partie de la proposition est une conséquence directe du lemme 1.2.5. La seconde assertion à propos des propriétés de fidélité et de plénitude résulte de ce que T_{\max} est obtenu comme une restriction du foncteur T . Quant à la propriété d'essentielle surjectivité, elle résulte de l'égalité $T_{\max} \circ \text{Max} = T$. □

PROPOSITION 1.2.9. — *La fibration $T_{\max} : \text{Max}(\mathcal{C}) \rightarrow \mathcal{A}$ vérifie encore les axiomes (Ax0), (Ax2) et (Ax3) (où, bien entendu, les fibres $\mathcal{F}_{\max, A} = T_{\max}^{-1}(A)$ sont calculées à partir du foncteur T_{\max}).*

En outre, pour tout A dans l'image de T , il existe un groupe G_A tel que la catégorie $\mathcal{F}_{\max, A}$ soit équivalente à la catégorie ayant un unique objet \bullet dont les endomorphismes s'identifient à G_A . Si de plus (Ax1) est vérifié, tous les groupes G_A sont réduits à l'identité.

Démonstration. — Le seul point non trivial réside dans la vérification de (Ax2). Mais, si $M \rightarrow M'$ et $M \rightarrow M''$ sont des morphismes dans la catégorie $\text{Max}(\mathcal{C})$, on vérifie en utilisant la proposition 1.2.6 que $\text{Max}(M' \oplus_M M'')$ (où $M' \oplus_M M''$ désigne la somme amalgamée dans \mathcal{C}) satisfait la propriété universelle de la somme amalgamée dans $\text{Max}(\mathcal{C})$. □

Remarque. — Comme T_{\max} vérifie encore les axiomes (Ax0), (Ax2) et (Ax3), on peut répéter la construction Max et obtenir ainsi un foncteur $\text{Max} : \text{Max}(\mathcal{C}) \rightarrow \text{Max}(\mathcal{C})$. Il est facile de voir à partir de ce qui précède que celui-ci est (isomorphe à) l'identité ; en particulier, $\text{Max}(\text{Max}(\mathcal{C})) = \text{Max}(\mathcal{C})$.

1.3. Dualité

Introduisons les axiomes duaux de (Ax2) et (Ax3) à savoir respectivement :

- (Ax2*) *Les catégories \mathcal{C} et \mathcal{A} admettent des produits fibrés, et le foncteur T leur est compatible.*
- (Ax3*) *Pour tout $A \in \mathcal{A}$, soit la catégorie \mathcal{F}_A est vide, soit elle admet un objet initial.*

Bien entendu, si ceux-ci sont satisfaits en plus de **(Ax0)**, on définit par une construction analogue à la précédente un foncteur $\text{Min} : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$ muni de morphismes naturels $\iota_{\text{min}}^C : \text{Min}(C) \rightarrow C$ pour tout $C \in \mathcal{C}$. On dit qu'un objet est *minimal* si ι_{min}^C est un isomorphisme, et on note $\text{Min}(\mathcal{C})$ la sous-catégorie pleine des objets minimaux. Tous ces objets vérifient évidemment des propriétés semblables à celles listées précédemment pour le foncteur Max (que nous laissons au lecteur le soin d'écrire complètement). En particulier la fibration T fournit par restriction (ou, au choix, par passage au quotient) une fibration $T_{\text{min}} : \text{Min}(\mathcal{C}) \rightarrow \mathcal{A}$.

Si \mathcal{X} est une catégorie, on définit une *dualité* sur \mathcal{X} comme la donnée d'un foncteur contravariant $\mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X}$, $X \mapsto X^*$ et d'une identification fonctorielle entre $(X^*)^*$ et X . Considérons l'axiome suivant :

(Ax4) *Il existe des dualités sur \mathcal{C} et sur \mathcal{A} compatibles au foncteur T (c'est-à-dire telles qu'il existe une identification naturelle entre $T(C^*)$ et $T(C)^*$).*

S'il est vérifié, la dualité sur \mathcal{C} induit pour tout $A \in \mathcal{A}$ une anti-équivalence de catégories entre F_A et F_{A^*} . On en déduit que, sous **(Ax4)**, les conditions **(Ax2)** et **(Ax2*)** (resp. **(Ax3)** et **(Ax3*)**) sont équivalentes.

On suppose désormais **(Ax0)**, **(Ax2)**, **(Ax3)**, **(Ax2*)** et **(Ax3*)**. On souhaite comparer les deux foncteurs $\text{Min} : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$ et $\text{Max} : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$, ainsi que les catégories $\text{Min}(\mathcal{C})$ et $\text{Max}(\mathcal{C})$ associées. On commence pour cela par un lemme.

LEMME 1.3.1. — *On a $\text{Min} \circ \text{Max} = \text{Min}$ et $\text{Max} \circ \text{Min} = \text{Max}$ (sur les objets et sur les morphismes).*

Démonstration. — Pour les objets, c'est immédiat au vu des définitions. Pour les morphismes, c'est une conséquence du lemme 1.2.1. \square

COROLLAIRE 1.3.2. — *Les restrictions $\text{Min} : \text{Max}(\mathcal{C}) \rightarrow \text{Min}(\mathcal{C})$ et $\text{Max} : \text{Min}(\mathcal{C}) \rightarrow \text{Max}(\mathcal{C})$ définissent des équivalences de catégories inverses l'une de l'autre.*

Démonstration. — D'après le lemme 1.3.1, il suffit de montrer que le foncteur Min (resp. Max) est isomorphe au foncteur identité sur la catégorie $\text{Min}(\mathcal{C})$ (resp. $\text{Max}(\mathcal{C})$), ce qui est immédiat par définition de cette catégorie. \square

Remarque. — Puisque les deux catégories $\text{Min}(\mathcal{C})$ et $\text{Max}(\mathcal{C})$ s'obtiennent comme localisation de \mathcal{C} par rapport au même ensemble de morphismes (Proposition 1.2.7), on savait déjà qu'elles étaient équivalentes. Le corollaire précédent précise cela en donnant les foncteurs réalisant cette équivalence.

COROLLAIRE 1.3.3. — Les fibrations $T_{\max}: \text{Max}(\mathcal{C}) \rightarrow \mathcal{A}$ et $T_{\min}: \text{Min}(\mathcal{C}) \rightarrow \mathcal{A}$ satisfont toutes les deux les axiomes **(Ax0)**, **(Ax2)**, **(Ax3)**, **(Ax2*)** et **(Ax3*)**.

Démonstration. — Par la proposition 1.2.9, on sait déjà que $\text{Max}(\mathcal{C})$ satisfait **(Ax0)**, **(Ax2)** et **(Ax3)**. En dualisant cette proposition, on trouve que $\text{Min}(\mathcal{C})$ satisfait **(Ax2*)** et **(Ax3*)**. Maintenant, les foncteurs Min et Max commutant à T , le corollaire 1.3.2 entraîne que les fibrations T_{\max} et T_{\min} sont isomorphes. La conclusion s’ensuit. \square

Remarque. — Les sommes amalgamées et produits fibrés dans $\text{Min}(\mathcal{C})$ (resp. $\text{Max}(\mathcal{C})$) s’obtiennent en appliquant le foncteur Min (resp. Max) aux constructions correspondantes dans la catégorie \mathcal{C} .

PROPOSITION 1.3.4. — On suppose en plus **(Ax4)**. Alors, pour $C \in \mathcal{C}$, on a $\text{Max}(C^*) \simeq \text{Min}(C)^*$ et $\text{Min}(C^*) \simeq \text{Max}(C)^*$. En particulier, la dualité de \mathcal{C} permute les catégories $\text{Min}(\mathcal{C})$ et $\text{Max}(\mathcal{C})$.

Le foncteur $C \mapsto \text{Max}(C^*)$ (resp. $C \mapsto \text{Min}(C^*)$) définit une dualité de $\text{Max}(\mathcal{C})$ (resp. $\text{Min}(\mathcal{C})$) compatible au foncteur T_{\max} (resp. T_{\min}).

Démonstration. — La première partie de la proposition résulte de ce que la dualité de \mathcal{C} induit une anti-équivalence de catégories entre $F_{T(\mathcal{C})}$ et $F_{T(C^*)}$.

Si $D(C) = \text{Max}(C^*)$, on a, pour $C \in \text{Max}(\mathcal{C})$:

$$\begin{aligned} D(D(C)) &= \text{Max}(\text{Max}(C^*)^*) \simeq \text{Max}(\text{Min}(C^{**})) \\ &\simeq \text{Max}(\text{Min}(C)) = \text{Max}(C) \simeq C \end{aligned}$$

dans l’ordre d’après la première partie de la proposition, la définition d’une dualité, le lemme 1.3.1, et finalement le fait que C soit maximal. Ce calcul assure que D est une dualité. La compatibilité à T_{\max} est immédiate. Finalement, le même argument fonctionne pour $C \mapsto \text{Min}(C^*)$. \square

1.4. Catégories fibrées en (semi-)treillis, pylonets

Dans les applications que l’on a en vue, on ne vérifiera jamais **(Ax3)** directement, mais on empruntera un chemin légèrement détourné que l’on explique ci-dessous. Tout au long de ce paragraphe, on suppose **(Ax1)**.

LEMME 1.4.1. — Soient C et C' deux objets d’une fibre F_A . Alors $\text{Hom}_{F_A}(C, C')$ a au plus un élément.

Démonstration. — Tout $f \in \text{Hom}_{\mathcal{F}_A}(C, C')$ vérifie par définition $T(f) = \text{id}_A$. Le lemme résulte alors de la fidélité de T . \square

On rappelle qu'une catégorie vérifiant la condition du lemme correspond simplement à un préordre sur l'« ensemble » de ses objets : un objet C est plus petit que C' s'il existe effectivement un morphisme de C dans C' . On rappelle également que les constructions usuelles sur les ensembles (pré)ordonnés ont en général des équivalents simples en langage des catégories : par exemple, pour ne citer que celles qui vont nous intéresser dans la suite, une borne supérieure est une somme directe, et un élément maximal est un objet final⁽⁵⁾. Sachant cela, on démontre facilement (supposant toujours **(Ax1)**) que **(Ax3)** est impliqué par les deux axiomes suivants :

(Ax3a) Les catégories \mathcal{F}_A admettent des sommes directes (finies).

(Ax3b) Les catégories \mathcal{F}_A satisfont la condition de chaîne croissante (c.c.c) : pour tout suite infinie de morphismes

$$C_1 \xrightarrow{f_1} C_2 \xrightarrow{f_2} C_3 \xrightarrow{f_3} \dots \xrightarrow{f_{n-1}} C_n \xrightarrow{f_n} \dots$$

il existe un entier N tel que f_n soit un isomorphisme pour tout $n \geq N$.

Bien entendu, il existe des versions duales de ces axiomes à savoir :

(Ax3a*) Les catégories \mathcal{F}_A admettent des produits (finis).

(Ax3b*) Les catégories \mathcal{F}_A satisfont la condition de chaîne décroissante (c.c.d) : pour tout suite infinie de morphismes

$$C_1 \xleftarrow{f_1} C_2 \xleftarrow{f_2} C_3 \xleftarrow{f_3} \dots \xleftarrow{f_{n-1}} C_n \xleftarrow{f_n} \dots$$

il existe un entier N tel que f_n soit un isomorphisme pour tout $n \geq N$.

Sous l'hypothèse **(Ax1)**, ils impliquent **(Ax3*)**. Par ailleurs, si l'on suppose **(Ax4)**, les énoncés **(Ax3a)** et **(Ax3a*)** d'une part, et **(Ax3b)** et **(Ax3b*)** d'autre part sont équivalents.

Terminons ce paragraphe par quelques remarques et un peu de terminologie. En théorie des ordres, un ensemble ordonné satisfaisant les (équivalents des) axiomes **(Ax3a)** et **(Ax3a*)** est ce que l'on appelle un *treillis*. De même, les conditions qui apparaissent dans **(Ax3b)** et **(Ax3b*)** sont ainsi nommées car les propriétés correspondantes sur les ensembles ordonnés portent ces noms. Tout ceci conduit à poser la définition suivante.

DÉFINITION 1.4.2. — Une fibration $T: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{A}$ vérifiant les axiomes **(Ax1)**, **(Ax2)**, **(Ax3a)** (resp. **(Ax3a*)**) est appelée une catégorie fibrée en sup-semi-treillis (resp. une catégorie fibrée en inf-semi-treillis). Si les

⁽⁵⁾ Ce que justifie la notation Max pour le foncteur construit précédemment.

deux axiomes **(Ax3a)** et **(Ax3a*)** sont vérifiés, on parlera simplement de catégorie fibrée en treillis.

On dit que T vérifie c.c.c (resp. c.c.d) si l'axiome **(Ax3b)** (resp. **(Ax3b*)**) est satisfait. On dit qu'elle est autoduale si l'axiome **(Ax4)** est satisfait.

Remarque. — On pourra s'étonner de ne pas voir apparaître **(Ax0)** dans la définition précédente, alors que toute la théorie que nous avons développée semble reposer sur cet axiome. Toutefois, comme cela a été expliqué en 1.1, on peut toujours remplacer \mathcal{C} par une catégorie équivalente pour laquelle **(Ax0)** est satisfait. Nous préférons ne pas inclure **(Ax0)** dans la définition précédente, car il ne sera en fait pas vérifié dans les exemples que nous allons manipuler par la suite.

Pour simplifier la terminologie, nous introduisons la définition suivante.

DÉFINITION 1.4.3. — Une catégorie fibrée en sup-semi-treillis satisfaisant c.c.c est appelée un pylonet.

Remarque. — Cette terminologie est basée sur la concaténation des deux mots *pylone* et *net*. Le premier d'entre eux se rapporte aux fibres de T qui, en un sens imagée, ressemblent à des pylônes électriques (voir photo ci-contre), la structure métallique de ceux-ci pouvant évoquer un ordre admettant des bornes supérieures finies et satisfaisant c.c.c (voire la condition plus forte **(Ax3c)** donnée plus bas). Le mot *net*, quant à lui, est un anglicisme à prendre dans le sens de réseau : il faut imaginer que ces pylônes sont reliés par tout un tissu de câbles (électriques) qui correspondent aux morphismes de la catégorie \mathcal{C} dont l'image par T n'est pas l'identité. La propriété fondamentale des pylonets est que tout pylône (*i.e.* toute fibre) admet un sommet (*i.e.* un élément maximal) et qu'à tout câble reliant deux pylônes (*i.e.* tout morphisme de \mathcal{C}), il est associé un unique câble reliant les sommets des pylônes correspondants.



Si le foncteur T est contravariant, on dira que le pylonet est lui-même *contravariant*.

Finalement, il est possible d'imaginer une version forte des axiomes **(Ax3b)** et **(Ax3b*)** qui est :

(Ax3c) Les catégories \mathcal{F}_A sont de hauteur finie, dans le sens où il existe un entier N (qui dépend de A) telle que toute suite de N morphismes

$$C_1 \xrightarrow{f_1} C_2 \xrightarrow{f_2} C_3 \xrightarrow{f_3} \cdots \xrightarrow{f_N} C_{N+1}$$

contient au moins un isomorphisme.

Contrairement à **(Ax3b)** et **(Ax3b*)**, l'axiome **(Ax3c)** est autodual, et comme nous l'avons dit (ou du moins sous-entendu) précédemment, il implique à lui seul les deux énoncés **(Ax3b)** et **(Ax3b*)**. Encore une fois, signalons que la terminologie « de hauteur finie » est recopiée de celle couramment utilisée pour les treillis.

1.5. Le cas additif

Nous étudions à présent le cas particulier décrit par l'axiome suivant.

(Ax5) La catégorie \mathcal{C} est additive, la catégorie \mathcal{A} est abélienne et le foncteur T est additif.

On dira dans ce cas que la fibration T est additive. En particulier, on pourra parler de catégories fibrées en (semi-)treillis additives, et même de pylons additifs.

Remarquons que, sous **(Ax5)**, la condition **(Ax2)** (resp. **(Ax2*)**) est équivalente à l'existence de conoyaux (resp. de noyaux) dans \mathcal{C} et au fait que T commute à la formation de ceux-ci. Supposons à partir de maintenant, en plus de **(Ax5)**, les axiomes **(Ax0)**, **(Ax2)**, **(Ax3)**. D'après la discussion menée en 1.2, on dispose d'un foncteur $\text{Max} : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$ et d'une sous-catégorie pleine $\text{Max}(\mathcal{C})$ vérifiant un certain nombre de propriétés sympathiques.

LEMME 1.5.1. — *Le foncteur Max est additif.*

Démonstration. — Le lemme peut se voir comme une conséquence du corollaire 3.1 de [17]. Pour la commodité du lecteur, nous adaptons ci-dessous la preuve à notre contexte et l'écrivons dans le langage que nous venons de mettre en place.

Il suffit de montrer que $\text{Max}(C \oplus C')$ est naturellement isomorphe à $\text{Max}(C) \oplus \text{Max}(C')$. Or, les inclusions canoniques $C \rightarrow C \oplus C'$ et $C' \rightarrow C \oplus C'$ permettent de construire un morphisme $\alpha : \text{Max}(C) \oplus \text{Max}(C') \rightarrow \text{Max}(C \oplus C')$, tandis que les projections $C \oplus C' \rightarrow C$ et $C \oplus C' \rightarrow C'$ donnent un morphisme $\beta : \text{Max}(C \oplus C') \rightarrow \text{Max}(C) \oplus \text{Max}(C')$. Il est formel de vérifier que $\beta \circ \alpha$ est l'identité. Par ailleurs, du fait que T est additif,

on déduit que $T(\alpha \circ \beta) = \text{id}_{T(\mathcal{C} \oplus \mathcal{C}')}$. Ainsi $\alpha \circ \beta$ est un endomorphisme de l'objet final de $F_{T(\mathcal{C} \oplus \mathcal{C}')}$; il ne peut donc être que l'identité et le lemme en découle. \square

Supposons maintenant en supplément de ce qui précède les axiomes duaux **(Ax2*)** et **(Ax3*)**. Ils permettent à leur tour de construire un foncteur additif $\text{Min} : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$ et une sous-catégorie $\text{Min}(\mathcal{C})$.

PROPOSITION 1.5.2. — *Dans la situation précédente, les catégories $\text{Max}(\mathcal{C})$ et $\text{Min}(\mathcal{C})$ sont abéliennes et la restriction du foncteur T à ces catégories est exact.*

Démonstration. — Nous ne donnons la preuve que pour $\text{Max}(\mathcal{C})$, le cas de $\text{Min}(\mathcal{C})$ se traitant pareillement. Par le lemme 1.5.1, $\text{Max}(\mathcal{C})$ contient l'objet nul et est stable par somme directe ; c'est donc déjà une catégorie additive. Sachant cela, le corollaire 1.3.3 entraîne l'existence de noyaux et de conoyaux dans $\text{Max}(\mathcal{C})$. Pour conclure, il suffit de montrer que si f est une flèche dans $\text{Max}(\mathcal{C})$, le morphisme induit $\bar{f} : \text{coim } f \rightarrow \text{im } f$ est un isomorphisme. Or, comme T commute à la formation des noyaux et conoyaux dans $\text{Max}(\mathcal{C})$ (Corollaire 1.3.3), $T(\bar{f})$ s'identifie au morphisme $\text{coim } T(f) \rightarrow \text{im } T(f)$ induit par $T(f)$. Comme \mathcal{A} est une catégorie abélienne, $T(\bar{f})$ est un isomorphisme, et donc, par le lemme 1.2.5, $\text{Max}(\bar{f})$ également. Finalement, étant donné que par construction \bar{f} est un morphisme entre deux objets maximaux, il s'identifie à $\text{Max}(\bar{f})$ et est par suite lui aussi un isomorphisme.

Il reste à montrer que la restriction de T à $\text{Max}(\mathcal{C})$ est exact, mais ceci découle directement de la commutation de ce foncteur à la formation des noyaux et des conoyaux. \square

Terminons ce paragraphe en soulignant qu'il est possible d'obtenir un substitut à la proposition précédente dans une situation légèrement différente. Précisément, on remplace **(Ax3*)** par la nouvelle hypothèse **(Ax1)**. Ce cas paraît de prime abord un peu bâtard car il ne permet pas de définir le foncteur Min . Malgré tout, on dispose de la proposition suivante :

PROPOSITION 1.5.3. — *Dans la situation précédente, la catégorie $\text{Max}(\mathcal{C})$ est abélienne et la restriction du foncteur T à cette catégorie est exacte.*

Démonstration. — Prouvons tout d'abord que Max est un foncteur fidèle. Soit f un morphisme de \mathcal{C} tel que $\text{Max}(f) = 0$. En appliquant T à cette dernière égalité, on obtient $T(f) = 0$, puis $f = 0$ par fidélité de T . Ceci démontre notre assertion.

Par le lemme 1.5.1, $\text{Max}(\mathcal{C})$ est une catégorie additive. Par la première partie de la proposition 1.2.9, $\text{Max}(\mathcal{C})$ admet des conoyaux et la formation de ceux-ci commute au foncteur T . Il reste à montrer qu'il en est de même pour les noyaux. En effet, après, on pourra appliquer le même raisonnement que dans la preuve de la proposition 1.5.2 pour obtenir l'isomorphisme entre image et coimage.

Nous montrons en fait le résultat plus général suivant : si $f : C \rightarrow C'$ est un morphisme dans \mathcal{C} et si K est son noyau, alors $\text{Max}(K)$ est le noyau dans $\text{Max}(\mathcal{C})$ du morphisme $\text{Max}(f)$. Soit X un objet de $\text{Max}(\mathcal{C})$ muni d'un morphisme $G : X \rightarrow \text{Max}(\mathcal{C})$ tel que $\text{Max}(f) \circ G = 0$. Nous voulons montrer que G se factorise de façon unique par $\text{Max}(K)$. Notons $X' = X \times_{\text{Max}(\mathcal{C})} C$ le produit fibré de X et C au-dessus de $\text{Max}(\mathcal{C})$. Quitte à remplacer X' par un objet isomorphe grâce à l'axiome **(Ax0)**, on a $T(X') = T(X)$, d'où il suit $\text{Max}(X') \simeq X$. De plus, le morphisme canonique $g : X' \rightarrow C$ vérifie $\text{Max}(g) = G$, d'où on déduit $\text{Max}(f \circ g) = 0$ puis $f \circ g = 0$ par fidélité de Max . Puisque K est le noyau de f , il suit que g se factorise par K , et donc par functorialité, $G = \text{Max}(g)$ se factorise par $\text{Max}(K)$. L'unicité de cette factorisation résulte à nouveau de la fidélité de Max . \square

1.6. Avant-goût des applications

Comme nous le disions au début de cette partie, l'exemple fondamental duquel tout ce travail est inspiré est le suivant : \mathcal{C} est la catégorie des schémas en groupes commutatifs finis et plats annulés par p (ou une puissance de p) sur l'anneau des entiers d'un corps p -adique K , alors que le foncteur T est celui qui à un tel groupe associe la représentation galoisienne donnée par ses \bar{K} -points. Il résulte des travaux de Raynaud (voir [25], §2.2) que cette fibration T est un pylonet autodual⁽⁶⁾ (Définitions 1.4.2 et 1.4.3) et additif (*i.e.* satisfaisant **(Ax5)**). Un autre exemple apparaît dans un travail antérieur de l'auteur en collaboration avec Liu (voir [13]) ; cet exemple, essentiel pour cet article, sera expliqué plus en détail en 2.1 (voir en particulier le théorème 2.1.2).

Le but de cet article est de montrer que certains foncteurs T qui apparaissent dans la théorie de Breuil sont eux aussi des pylonets additifs et autoduaux, c'est-à-dire, d'après les définitions, qu'ils obéissent à **(Ax1)**, **(Ax2)**, **(Ax3a)**, **(Ax3b)**, **(Ax4)** et **(Ax5)**. De façon générale, la vérification de **(Ax5)** sera toujours immédiate, alors que celle de **(Ax4)**, **(Ax1)**

⁽⁶⁾ Les dualités sont d'une part la dualité de Cartier sur les schémas en groupes, et d'autre part la dualité usuelle twistée (par le twist de Tate) sur les représentations galoisiennes.

et **(Ax3b)** résultera directement de *loc. cit.* Ainsi, l'essentiel du travail consistera en l'établissement des énoncés **(Ax2)** et **(Ax3a)**. Après cela, on pourra déduire toute une liste de propriétés agréables sur la fibration T . Afin de faciliter la tâche du lecteur (et bien que cela fasse certainement redite), nous avons choisi de les regrouper dans le théorème suivant :

THÉORÈME 1.6.1. — *Soit $T: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{A}$ un pylonet contravariant additif et autodual. Alors :*

- (cf. § 1.4) *Pour tout $C \in \mathcal{C}$, il existe un unique (à isomorphisme unique près) couple $(\text{Max}(C), \iota_{\text{max}}^C: C \rightarrow \text{Max}(C))$ (resp $(\text{Min}(C), \iota_{\text{min}}^C: \text{Min}(C) \rightarrow C)$) satisfaisant la propriété universelle suivante :*
 - *le \mathcal{A} -morphisme $T(\iota_{\text{max}}^C)$ (resp. $T(\iota_{\text{min}}^C)$) est un isomorphisme ;*
 - *pour tout $C' \in \mathcal{C}$ muni d'une flèche $f: C \rightarrow C'$ (resp. $f: C' \rightarrow C$) telle que $T(f)$ est un isomorphisme, il existe un unique $g: C' \rightarrow \text{Max}(C)$ (resp. $g: \text{Min}(C) \rightarrow C'$) tel que $g \circ f = \iota_{\text{max}}^C$ (resp. $f \circ g = \iota_{\text{min}}^C$).*
- (cf. § 1.2) *Ceci conduit à un foncteur « idempotent » $\text{Max}: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$ (resp. $\text{Min}: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$).*

Si l'on note $\text{Max}(C)$ (resp. $\text{Min}(C)$) l'image essentielle de Max (resp. Min), on a :

- (cf. Proposition 1.2.6) *La corestriction $\text{Max}: \mathcal{C} \rightarrow \text{Max}(C)$ (resp. $\text{Min}: \mathcal{C} \rightarrow \text{Min}(C)$) est un adjoint à gauche (resp. à droite) du morphisme d'inclusion.*
- (cf. Proposition 1.2.7 et Corollaire 1.3.2) *Les foncteurs $\text{Max}: \mathcal{C} \rightarrow \text{Max}(C)$ et $\text{Min}: \mathcal{C} \rightarrow \text{Min}(C)$ réalisent tous les deux la localisation de la catégorie \mathcal{C} par rapport aux morphismes f tels que $T(f)$ est un isomorphisme. En particulier, les catégories $\text{Max}(C)$ et $\text{Min}(C)$ sont équivalentes et, concrètement, cette équivalence se réalise via les foncteurs Min et Max .*
- (cf. Proposition 1.2.8) *La restriction du foncteur T à $\text{Max}(C)$ d'une part, et à $\text{Min}(C)$ d'autre part est fidèle et conservative.*
- (cf. Proposition 1.3.4) *La dualité sur \mathcal{C} permute les catégories $\text{Max}(C)$ et $\text{Min}(C)$. La composition de celle-ci avec le foncteur Max (resp. Min) induit une dualité sur $\text{Max}(C)$ (resp. sur $\text{Min}(C)$) qui commute au foncteur T .*
- (cf. Proposition 1.5.2) *La catégorie $\text{Max}(C)$ (resp. $\text{Min}(C)$) est abélienne, les noyaux et conoyaux s'obtenant en appliquant le foncteur Max (resp. Min) aux constructions correspondantes dans \mathcal{C} . La restriction du foncteur T à cette sous-catégorie est exacte.*

2. Application à la théorie de Hodge p -adique

Nous reprenons à partir de maintenant les notations de l'introduction : p est un nombre premier, k un corps parfait de caractéristique p , W l'anneau des vecteurs de Witt à coefficients dans k , K_0 son corps des fractions et K une extension totalement ramifiée de K_0 de degré e . Fixons en outre \bar{K} une clôture algébrique de K et notons $G_K = \text{Gal}(\bar{K}/K)$ le groupe de Galois absolu de K . Appelons \mathcal{O}_K (resp. $\mathcal{O}_{\bar{K}}$) l'anneau des entiers de K (resp. de \bar{K}). Soient également π une uniformisante de K et (π_n) (resp. (p_n)) un système compatible de racines p^n -ièmes de π (resp. de p). Soient $G_s \subset G_K$ le groupe de Galois absolu de l'extension $K(\pi_s)$ et $G_\infty = \bigcup_{s \geq 0} G_s$.

Dans tout le reste de l'article, on fixe un entier $r \in \{1, \dots, p-2\}$. Nous préférons éviter dès à présent le cas $r = 0$ car, bien que fondamentalement plus simple, il conduit souvent à des discussions assez peu intéressantes, et dans tous les cas, il vérifie certainement l'inégalité $er < p-1$ et donc relève de l'étude menée dans [11]. Remarquons qu'ainsi, on peut supposer $p > 2$ (sinon aucun r ne convient).

2.1. Rappel sommaire de la théorie de Breuil

On se borne dans cette sous-section à présenter les aspects « annulés par p » de la théorie de Breuil (développée de façon générale dans [3], [4] et [11]). Certaines définitions (ou constantes) que nous allons introduire sont motivées par les aspects entiers de cette théorie (qui n'apparaîtront que superficiellement dans cet article en 4.3) et pourront de fait paraître étrange au lecteur qui n'est pas familier. Pour palier ce manque, nous renvoyons aux articles précédemment cités.

Les catégories de modules

Posons $\tilde{S} = k[u]/u^{ep}$. Si $E(u) = pa_0 + pa_1u + \dots + pa_{e-1}u^{e-1} + u^e$ est le polynôme minimal de π sur K_0 (c'est un polynôme d'Eisenstein), notons $c = \bar{a}_0^p + \bar{a}_1^p u^p + \dots + \bar{a}_{e-1}^p u^{p(e-1)} \in \tilde{S}$ où $\bar{a}_i \in k$ désigne la réduction modulo p de $a_i \in W$. On définit plusieurs catégories de modules sur \tilde{S} . Tout d'abord, une grosse catégorie $\text{Fil}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ (la notation deviendra claire en 3.1) dont les objets sont la donnée de :

1. un \tilde{S} -module \mathcal{M} ;
2. un sous-module $\text{Fil}^r \mathcal{M} \subset \mathcal{M}$ contenant $u^{er} \mathcal{M}$;

3. un opérateur (dit de Frobenius) $\phi_r: \text{Fil}^r \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}$ semi-linéaire par rapport au Frobenius (c'est-à-dire l'élevation à la puissance p) sur \tilde{S} ;
4. un opérateur (dit de monodromie) $N: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}$ vérifiant :
 - (condition de Leibniz) $N(ux) = uN(x) - ux$ pour tout $x \in \mathcal{M}$;
 - (transversalité de Griffith) $u^e N(\text{Fil}^r \mathcal{M}) \subset \text{Fil}^r \mathcal{M}$;
 - le diagramme suivant est commutatif :

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Fil}^r \mathcal{M} & \xrightarrow{\phi_r} & \mathcal{M} \\
 u^e N \downarrow & & \downarrow cN \\
 \text{Fil}^r \mathcal{M} & \xrightarrow{\phi_r} & \mathcal{M}
 \end{array}$$

Les morphismes dans $'\text{Fil}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ sont sans surprise les applications \tilde{S} -linéaires qui commutent à toutes les structures supplémentaires. Pour tout entier $t \leq r$, l'anneau \tilde{S} lui-même muni de $\text{Fil}^r \tilde{S} = u^{et} \tilde{S}$, de ϕ_r défini par $\phi_r(u^{et}) = c^t$ et de l'opérateur N tel que $N(1) = 0$ est un exemple d'objet de $'\text{Fil}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$. Avant de passer à la définition des autres catégories, signalons que l'on dispose d'une notion de suite exacte dans $'\text{Fil}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$: une suite d'objets de cette catégorie est dite exacte, si elle est exacte en tant que suite de \tilde{S} -modules, et si elle induit une suite exacte de \tilde{S} -modules au niveau des Fil^r .

Soit $'\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ la sous-catégorie pleine de $'\text{Fil}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ regroupant les objets \mathcal{M} pour lesquels $\phi_r(\text{Fil}^r \mathcal{M})$ engendre \mathcal{M} comme \tilde{S} -module. La catégorie qui nous intéresse particulièrement ici est encore une sous-catégorie de $'\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$; c'est celle qui regroupe les objets $\mathcal{M} \in '\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ qui sont des \tilde{S} -modules libres de type fini. On la note $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ (sans l'apostrophe donc).

Foncteur vers Galois

La catégorie $'\text{Fil}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ est munie d'un foncteur T_{st} vers la catégorie $\text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$ des \mathbb{F}_p -représentations du groupe G_K . Pour le définir, nous avons besoin d'introduire des anneaux de périodes : comme nous restons toujours dans le cas des représentations annulées par p , ces anneaux sont exceptionnellement faciles à décrire. Le premier d'entre eux est, en tant que k -algèbre, $\hat{A}_0 = k \otimes_{(\phi), k} \mathcal{O}_{\bar{K}}/p$. Il est muni de l'action naturelle de G_K . Pour $0 \leq i \leq r$, on définit $\text{Fil}^i \hat{A}_0$ comme l'idéal principal engendré par $1 \otimes p_1^i$ (où l'on rappelle que p_1 est une racine p -ième de p fixée) : cela forme une filtration (finie) décroissante. On définit aussi pour les mêmes entiers i

une application $\phi_i: \text{Fil}^i \widehat{A}_0 \rightarrow \widehat{A}_0$ en envoyant $1 \otimes p_1^i x$ sur la réduction modulo p de $(-1)^i \otimes \hat{x}^p$ où $\hat{x} \in \mathcal{O}_{\widehat{K}}$ est un relevé quelconque de x . (On montre que le résultat ne dépend que de $p_1^i x$, et pas de x ni de son relevé \hat{x} .)

L'anneau de périodes qui nous intéressera le plus est \widehat{A} , défini comme suit. En tant que k -algèbre, il vaut $\widehat{A}_0 \langle X \rangle$ où la notation $\langle \cdot \rangle$ fait référence à l'algèbre polynomiale à puissance divisées. Nous noterons encore ϕ le Frobenius, c'est-à-dire le morphisme d'élévation à la puissance p , agissant sur \widehat{A} . Soit $\text{Fil}^r \widehat{A}$ l'idéal de \widehat{A} engendré par les produits $\text{Fil}^{r-i} \widehat{A}_0 \cdot X^i$ pour $0 \leq i \leq r$ et par les $\gamma_i(X) = \frac{X^i}{i!}$ pour $i > r$. On introduit le morphisme $\phi_r: \text{Fil}^r \widehat{A} \rightarrow \widehat{A}$ qui, par définition, envoie les éléments $\gamma_i(X)$ ($i > r$) sur 0 et l'élément aX^i ($0 \leq i \leq r$, $a \in \text{Fil}^{r-i} \widehat{A}_0$) sur $\phi_{r-i}(a)Y^i$ avec $Y = \frac{(1+X)^p - 1}{p}$, le calcul de cette dernière fraction se faisant bien entendu dans $\mathbb{Z}_p[X]$ avant d'être réduit dans \widehat{A} . L'action de G_K se prolonge à \widehat{A} grâce à la formule $g(X) = \frac{g(\pi_1)}{\pi_1}(1+X) - 1$. L'anneau \widehat{A} est également muni d'un opérateur k -linéaire $N: \widehat{A} \rightarrow \widehat{A}$ défini par $f(X) \mapsto (1+X)f'(X)$ où f' désigne la dérivée au sens usuel. Enfin \widehat{A} apparaît comme une \widetilde{S} -algèbre grâce au morphisme $\widetilde{S} \rightarrow \widehat{A}$, $u \mapsto \frac{\pi_1}{1+X}$. Tout cela fait de \widehat{A} un objet de $\text{Fil}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}$, ce qui nous permet de poser pour tout objet $\mathcal{M} \in \text{Fil}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}$

$$T_{\text{st}}(\mathcal{M}) = \text{Hom}_{\text{Fil}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}}(\mathcal{M}, \widehat{A}).$$

On définit comme ceci un foncteur contravariant $T_{\text{st}}: \text{Fil}_{\widetilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$.

Dualité

La catégorie $\text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}$ est munie d'une dualité introduite dans le chapitre V de [10]. Rappelons que si \mathcal{M} en est un objet, son dual \mathcal{M}^* est défini comme suit :

1. $\mathcal{M}^* = \text{Hom}_{\widetilde{S}\text{-mod}}(\mathcal{M}, S)$;
2. $\text{Fil}^r \mathcal{M}^* = \{f \in \mathcal{M}^* / f(\text{Fil}^r \mathcal{M}) \subset u^{er} S\}$;
3. pour $f \in \text{Fil}^r \mathcal{M}^*$, $\phi_r^*(f)$ est l'unique application vérifiant $\phi_r^*(f)(\phi_r(x)) = \phi_r \circ f(x)$ pour tout $x \in \text{Fil}^r \mathcal{M}$ où $\phi_r: u^{er} \widetilde{S} \rightarrow \widetilde{S}$ est l'unique application semi-linéaire envoyant u^{er} sur c^r ;
4. pour $f \in \mathcal{M}^*$, $N^*(f) = N \circ f - f \circ N$.

L'association $\mathcal{M} \mapsto \mathcal{M}^*$ définit une dualité dans le sens du paragraphe 1.3. De plus, par le théorème V.4.3.1 de *loc. cit.* et la remarque qui le suit :

$$(2.1) \quad T_{\text{st}}(\mathcal{M}^*) = T_{\text{st}}(\mathcal{M})^\vee(r)$$

où par définition « (r) » désigne le twist de Tate et où T^\vee est la représentation contragrédiente $\text{Hom}_{\mathbb{F}_p\text{-mod}}(T, \mathbb{F}_p)$. Autrement dit, si l'on munit la catégorie $\text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$ de la dualité $T \mapsto T^* = T^\vee(r)$ le foncteur T_{st} vérifie l'axiome **(Ax4)**.

Sans l'opérateur de monodromie

Il sera important dans la suite de considérer un analogue des objets précédents dans lequel l'opérateur de monodromie est omis. Ceci nous amène à définir tout d'abord la catégorie $'\text{Fil}_{/\tilde{S}}^\phi$ dont les objets sont les \tilde{S} -modules \mathcal{M} munis d'un $\text{Fil}^r \mathcal{M}$ et d'un Frobenius $\phi_r : \text{Fil}^r \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}$ (mais pas d'un opérateur N) vérifiant les mêmes axiomes que précédemment. On isole ensuite deux sous-catégories, à savoir $'\text{Mod}_{/\tilde{S}}^\phi$, $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^\phi$, les définitions de celles-ci étant identiques à celles de leurs analogues.

Le morphisme $\tilde{S} \rightarrow \hat{A}_0$, $u \mapsto \pi_1$ fait de \hat{A}_0 une \tilde{S} -algèbre et permet de voir \hat{A}_0 comme un objet de $'\text{Fil}_{/\tilde{S}}^\phi$. On définit alors

$$T_{\text{qst}}(\mathcal{M}) = \text{Hom}_{\text{Fil}_{/\tilde{S}}^\phi}(\mathcal{M}, \hat{A}_0)$$

pour $\mathcal{M} \in '\text{Mod}_{/\tilde{S}}^\phi$. Il faut toutefois faire attention au point suivant : le module $T_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ n'est pas une représentation de G_K , mais seulement du sous-groupe G_1 étant donné que le morphisme structural $\tilde{S} \rightarrow \hat{A}_0$ n'est pas G_K -équivariant (mais seulement G_1 -équivariant). On a malgré tout un lemme important qui permet de comparer les foncteurs T_{st} et T_{qst} .

LEMME 2.1.1. — Soit \mathcal{M} un objet de $'\text{Mod}_{/\tilde{S}}^\phi$. La projection \hat{A}_0 -linéaire $\hat{A} \rightarrow \hat{A}_0$, $\gamma_n(X) \mapsto 0$ ($n \geq 1$) induit un isomorphisme G_1 -équivariant $T_{\text{st}}(\mathcal{M}) \rightarrow T_{\text{qst}}(\mathcal{M})$.

Démonstration. — La preuve est une version simplifiée de celle du lemme 2.3.1.1 de [4] que l'on ne recopie pas. On notera par contre que celle-ci donne une formule explicite pour l'inverse $T_{\text{qst}}(\mathcal{M}) \rightarrow T_{\text{st}}(\mathcal{M})$: à $f_0 \in T_{\text{qst}}(\mathcal{M})$, on associe l'application f définie par

$$(2.2) \quad f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} f_0(N^i(x)) \gamma_i(\log(1 + X))$$

où la somme converge pour la topologie « X -adique ». □

Ces catégories « sans N » sont intéressantes car elles admettent une description alternative plus simple que nous présentons maintenant. Considérons l'anneau $\tilde{\mathfrak{S}} = k[[u]]$ et munissons-le de l'opérateur $\phi : \tilde{\mathfrak{S}} \rightarrow \tilde{\mathfrak{S}}$ qui

agit comme l'élevation à la puissance p . Lorsque \mathfrak{M} est un module sur $\tilde{\mathfrak{S}}$, on notera $\phi^*\mathfrak{M} = \tilde{\mathfrak{S}} \otimes_{(\phi), \tilde{\mathfrak{S}}} \mathfrak{M}$. Introduisons $\text{Mod}_{/\tilde{\mathfrak{S}}}^\phi$ la catégorie dont les objets sont la donnée de :

1. un $\tilde{\mathfrak{S}}$ -module \mathfrak{M} ;
2. un opérateur ϕ -semi-linéaire $\phi: \mathfrak{M} \rightarrow \mathfrak{M}$ tel que le conoyau de $\text{id} \otimes \phi: \phi^*\mathfrak{M} \rightarrow \mathfrak{M}$ soit annulé par u^{er} .

Comme dans les cas précédents, définissons $\text{Mod}_{/\tilde{\mathfrak{S}}}^\phi$ la sous-catégorie pleine de $\text{Mod}_{/\tilde{\mathfrak{S}}}^\phi$ formée des objets libres de type fini sur $\tilde{\mathfrak{S}}$. On peut alors construire une équivalence de catégories ⁽⁷⁾ $M_{\tilde{\mathfrak{S}}}: \text{Mod}_{/\tilde{\mathfrak{S}}}^\phi \rightarrow \text{Mod}_{/\tilde{\mathfrak{S}}}^\phi$ qui jouit de propriétés intéressantes. En particulier, l'action du sous-groupe G_∞ de G_1 sur $T_{\text{qst}} \circ M_{\tilde{\mathfrak{S}}}(\mathfrak{M})$ pour $\mathfrak{M} \in \text{Mod}_{/\tilde{\mathfrak{S}}}^\phi$ est donnée par une formule relativement simple, à savoir :

$$(2.3) \quad T_{\text{qst}} \circ M_{\tilde{\mathfrak{S}}}(\mathfrak{M}) = \text{Hom}_{\tilde{\mathfrak{S}}, \phi}(\mathfrak{M}, k((u))^{\text{sep}})$$

où $k((u))^{\text{sep}}$ désigne une clôture séparable de $k((u))$ munie simultanément du Frobenius usuel (l'élevation à la puissance p) et d'une action de groupe G_∞ provenant de la théorie du corps des normes de Fontaine et Wintenberger (rappelons brièvement que cette théorie permet d'identifier le groupe de Galois absolu de $k((u))$ avec G_∞ , voir [28]). Notons $T_{\tilde{\mathfrak{S}}}$ la composée $T_{\text{qst}} \circ M_{\tilde{\mathfrak{S}}}$, c'est un foncteur de $\text{Mod}_{/\tilde{\mathfrak{S}}}^\phi$ à valeurs dans $\text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_1)$.

THÉORÈME 2.1.2. — *Le foncteur $M_{\tilde{\mathfrak{S}}}$ est une équivalence de catégories exacte. Tout quasi-inverse est également exact et, de plus, respecte les injections et les surjections.*

Le foncteur $T_{\tilde{\mathfrak{S}}}: \text{Mod}_{/\tilde{\mathfrak{S}}}^\phi \rightarrow \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_1)$ est un pylonet additif et autodual et sa restriction à $\text{Max}(\text{Mod}_{/\tilde{\mathfrak{S}}}^\phi)$ est pleinement fidèle.

Démonstration. — La première assertion est une généralisation directe (déjà utilisée par ailleurs dans la littérature) d'un résultat de Breuil (Théorème 4.1.1 de [5]). La phrase suivante concernant les injections et les surjections est prouvée dans la proposition 2.3.2 de [13].

Montrons le second alinéa. Bien que cela ne soit jamais écrit sous une forme aussi concise, il est démontré dans [13] que la composée :

$$T: \text{Mod}_{/\tilde{\mathfrak{S}}}^\phi \xrightarrow{T_{\tilde{\mathfrak{S}}}} \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_1) \rightarrow \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_\infty)$$

⁽⁷⁾ Comme les définitions précises de tous les objets qui interviennent ne nous seront pas vraiment utiles ici, nous ne nous attardons pas plus sur le sujet et nous contentons de renvoyer par exemple à [13] pour une présentation succincte de la théorie.

(où le second foncteur consiste à restreindre l'action à G_∞) est un pylonet additif et autodual. Pour conclure, il suffit donc de montrer que les fibres de $T_{\tilde{\mathcal{G}}}$ et de T sont les mêmes, c'est-à-dire que si \mathfrak{M}_1 et \mathfrak{M}_2 sont deux objets de $\text{Mod}_{/\tilde{\mathcal{G}}}^\phi$ avec $T(\mathfrak{M}_1) \simeq T(\mathfrak{M}_2)$, alors on a déjà $T_{\tilde{\mathcal{G}}}(\mathfrak{M}_1) \simeq T_{\tilde{\mathcal{G}}}(\mathfrak{M}_2)$. Or, puisque T est un pylonet, il existe $\mathfrak{M} \in \text{Mod}_{/\tilde{\mathcal{G}}}^\phi$ muni de morphismes $f_1: \mathfrak{M}_1 \rightarrow \mathfrak{M}$ et $f_2: \mathfrak{M}_2 \rightarrow \mathfrak{M}$ tels que $T(f_1)$ et $T(f_2)$ soient des isomorphismes (*a priori* seulement G_∞ -équivariants). Comme pour $i \in \{1, 2\}$, on a $T(f_i) = T_{\tilde{\mathcal{G}}}(f_i)$, il s'ensuit que $T_{\tilde{\mathcal{G}}}(f_i)$ est lui aussi un isomorphisme (G_1 -équivalent) comme voulu. \square

2.2. Opérateur de monodromie et prolongement de l'action de Galois

Dans ce paragraphe, nous démontrons un résultat essentiel (Proposition 2.2.2) qui précise les liens entre la donnée supplémentaire d'un opérateur de monodromie N et le prolongement de l'action de Galois de G_1 à G_K . Les méthodes de démonstration (ainsi que les énoncés d'ailleurs) sont très largement inspirées de celles développées par Liu dans [24].

On rappelle que $\pi_1 \in \mathcal{O}_K$ est une racine p -ième fixée de π . Pour tout $\sigma \in G_K$, on définit $\epsilon(\sigma)$ comme l'image dans \hat{A}_0 du quotient $\frac{\sigma\pi_1}{\pi_1}$; c'est une racine p -ième de l'unité, qui vaut 1 si $\sigma \in G_1$. On définit le "logarithme tronqué" de $\epsilon(\sigma)$ par

$$t(\sigma) = \sum_{i=1}^{p-2} \frac{(1 - \epsilon(\sigma))^i}{i}.$$

(On remarque que $(1 - \epsilon(\sigma))^{p-1}$ s'annule dans \hat{A}_0 , ce qui est en accord avec le fait que l'on arrête la somme à $p - 2$.) Il est clair que si $\sigma \in G_1$, alors $t(\sigma) = 0$. Sinon, $t(\sigma)$ est un élément de valuation $\frac{1}{p-1}$ et vérifie donc en particulier $t(\sigma)^{p-1} = 0$. En outre, t définit un cocycle, *i.e.* il est soumis à la relation $t(\sigma\sigma') = t(\sigma) + \sigma t(\sigma')$, valable pour σ et σ' dans G_K .

Si \mathcal{M} est un objet de $\text{Mod}_{/\tilde{\mathcal{S}}}^\phi$, le produit tensoriel $\mathcal{M} \otimes_{\tilde{\mathcal{S}}} \hat{A}_0$ est naturellement muni d'un Fil^r (défini par $\text{Fil}^r \mathcal{M} \otimes_{\tilde{\mathcal{S}}} \hat{A}_0$), d'un ϕ_r (qui provient de l'application $\phi_r: \text{Fil}^r \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}$) et d'une action de G_1 (obtenue par son action naturelle sur le second facteur). Lorsque de surcroît $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{/\tilde{\mathcal{S}}}^{\phi, N}$, on prolonge l'action de G_1 à G_K tout entier en utilisant l'opérateur de

monodromie grâce à la formule

$$(2.4) \quad \sigma(x \otimes a) = \sum_{i=0}^{p-2} N^i(x) \otimes \sigma(a) \frac{t(\sigma)^i}{i!}$$

avec $\sigma \in G_K$, $x \in \mathcal{M}$ et $a \in \widehat{A}_0$. En utilisant $t(\sigma)^i t(\sigma')^j = 0$ pour $i + j \geq p - 1$, on vérifie aisément que l'égalité (2.4) définit bien une action. De plus, on a la relation

$$(2.5) \quad N(x) \otimes t(\sigma) = \sum_{i=1}^{p-2} (-1)^{i-1} \frac{(\sigma - 1)^i}{i} (x \otimes 1)$$

pour tout $\sigma \in G_K$. Fixons τ un élément de G_K qui n'appartient pas à G_1 ; avec G_1 , il engendre G_K tout entier (puisque G_1 est d'indice premier dans G_K). Notons $\epsilon = \epsilon(\tau)$ et $t = t(\tau)$ et posons encore $\widehat{A}_0^* = \widehat{A}_0$ que l'on munit de $\text{Fil}^r \widehat{A}_0^* = \widehat{A}_0^*$ et $\phi_r = \phi$. Comme dans la démonstration du théorème 4.3.4 de [24], on construit des morphismes canoniques et fonctoriels

$$\iota_{\mathcal{M}} : \mathcal{M} \otimes_{\widetilde{S}} \widehat{A}_0 \rightarrow T_{\text{qst}}(\mathcal{M})^* \otimes_{\mathbb{F}_p} \widehat{A}_0 \quad \text{et} \quad \iota_{\mathcal{M}}^* : T_{\text{qst}}(\mathcal{M})^* \otimes_{\mathbb{F}_p} \widehat{A}_0^* \rightarrow \mathcal{M} \otimes_{\widetilde{S}} \widehat{A}_0$$

compatibles à Fil^r , ϕ_r et l'action de G_1 . Ceux-ci sont en outre soumis à la relation $\iota_{\mathcal{M}} \circ \iota_{\mathcal{M}}^* = \text{id} \otimes t^r$. Toute cette artillerie permet de démontrer les deux propositions suivantes.

PROPOSITION 2.2.1. — Soient $\mathcal{M}, \mathcal{M}'$ des objets de $\text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}$ et $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ un morphisme dans $\text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi}$. On suppose que $T_{\text{qst}}(f) : T_{\text{st}}(\mathcal{M}') \rightarrow T_{\text{st}}(\mathcal{M})$ est G_K -équivariant. Alors f commute à N (i.e. f est un morphisme dans $\text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}$).

Démonstration. — La formule (2.5) implique que f commute à tN agissant sur les produits tensoriels $\mathcal{M} \otimes_{\widetilde{S}} \widehat{A}_0$ et $\mathcal{M}' \otimes_{\widetilde{S}} \widehat{A}_0$. Dans \widehat{A}_0 , écrivons $t = qu^e$ où q est un élément de valuation $\frac{1}{p(p-1)}$. L'application $g = f \circ (u^e N) - (u^e N) \circ f$ prend alors ses valeurs dans $\mathcal{M}' \otimes_{\widetilde{S}} m_q$ où m_q est le noyau de la multiplication par q sur \widehat{A}_0 , c'est-à-dire l'idéal des éléments de valuation supérieure ou égale à $1 - \frac{1}{p(p-1)}$. Maintenant, pour $x \in \text{Fil}^r \mathcal{M}$, on a

$$\frac{1}{c} g \circ \phi_r(x) = \phi_r \circ (f \circ N - N \circ f)(x) \in \phi_r(\mathcal{M} \otimes_{\widetilde{S}} m_q) \subset \mathcal{M} \otimes_{\widetilde{S}} \phi_r(m_q) = 0$$

la dernière égalité provenant d'une simple calcul de valuation. On en déduit, comme souhaité, que f et N commutent. \square

PROPOSITION 2.2.2. — Soient $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$, $\mathcal{M}' \in \text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi}$ et $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ un morphisme surjectif dans $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi}$. On suppose que $T_{\text{qst}}(\mathcal{M}')$ (identifié grâce à $T_{\text{qst}}(f)$ à une sous- G_1 -représentation de $T_{\text{st}}(\mathcal{M})$) est stable par G_K . Alors, il existe sur \mathcal{M}' un unique opérateur de monodromie pour lequel f est un morphisme dans $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$.

On commence par démontrer deux lemmes.

LEMME 2.2.3. — Pour tout $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi}$, on a $\ker \iota_{\mathcal{M}} \subset t(\text{Fil}^r \mathcal{M} \otimes_{\tilde{S}} \widehat{A}_0)$.

Démonstration. — Notons d le rang de \mathcal{M} sur \tilde{S} . Posons $\mathcal{A} = \text{Fil}^r \mathcal{M} \otimes_{\tilde{S}} \widehat{A}_0$ et $\mathcal{B} = \iota_{\mathcal{M}}(\mathcal{A})$. En s'appuyant sur le fait que \widehat{A}_0 est un anneau de Bézout et sur l'inclusion $\text{Fil}^r \mathcal{M} \subset \text{Fil}^r S \cdot \mathcal{M}$, on montre que $\mathcal{A}/t\mathcal{A}$ est libre de rang d sur $k \otimes_{(\phi), k} \mathcal{O}_{\bar{K}}/t$. Par ailleurs, la compatibilité de $\iota_{\mathcal{M}}^*$ à Fil^r montre que l'image de $\iota_{\mathcal{M}}^*$ est incluse dans \mathcal{A} . De la relation $\iota_{\mathcal{M}} \circ \iota_{\mathcal{M}}^* = \text{id} \otimes t^r$, on déduit $t^r(T_{\text{qst}}(\mathcal{M})^* \otimes_{\mathbb{F}_p} \widehat{A}_0) \subset \mathcal{B}$, d'où il suit, comme précédemment, que $\mathcal{B}/t\mathcal{B}$ est aussi libre de rang d sur $k \otimes_{(\phi), k} \mathcal{O}_{\bar{K}}/t$. L'application $\iota_{\mathcal{M}}$ induit une surjection linéaire $\mathcal{A}/t\mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}/t\mathcal{B}$. Comme les espaces de départ et d'arrivée sont des modules libres de même rang, c'est un isomorphisme et le lemme en découle. \square

LEMME 2.2.4. — Soit $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ un morphisme surjectif dans $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi}$ (resp. $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$). Alors $\mathcal{K} = \ker f$ (avec les structures induites) est aussi dans $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi}$ (resp. $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$).

Démonstration. — Il suffit de traiter le cas de $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi}$, l'opérateur de monodromie ne posant pas de problèmes. Étant donné ce que nous avons vu, le plus simple est de passer par l'équivalence avec $\text{Mod}_{/\mathfrak{S}}^{\phi}$. D'après le théorème 2.1.2, f provient d'un morphisme surjectif $g: \mathfrak{M} \rightarrow \mathfrak{M}'$ de $\text{Mod}_{/\mathfrak{S}}^{\phi}$. D'après la définition des objets de cette catégorie, il est clair que $\ker g$ en est un objet. L'exactitude de $M_{\mathfrak{S}}^{\sim}$ (Théorème 2.1.2) montre alors que $M_{\mathfrak{S}}^{\sim}(\ker g)$ s'identifie à \mathcal{K} , d'où résulte le lemme. \square

Démonstration de la proposition 2.2.2. — Soit \mathcal{K} le noyau de f ; d'après le lemme 2.2.4, c'est un objet de $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi}$. Pour conclure, il suffit de montrer qu'il est stable par N . L'hypothèse assure que $T_{\text{qst}}(\mathcal{K})^*$ est stable par G_K dans $T_{\text{st}}(\mathcal{M})^*$. On en déduit, en utilisant l'exactitude de T_{qst} et l'égalité (2.5), que $tf \circ N(\mathcal{K}) \subset \ker \iota_{\mathcal{M}'}$. Avec le lemme 2.2.3, on récupère $tf \circ N(\mathcal{K}) \subset t(\text{Fil}^r \mathcal{M}' \otimes_{\tilde{S}} \widehat{A}_0)$. On suit alors la méthode de démonstration utilisée pour

la proposition 2.2.1 : dans \widehat{A}_0 , on peut écrire $t = qu^e$ où q est un élément de valuation $\frac{1}{p(p-1)}$. En « divisant » la dernière inclusion par q , on obtient

$$f \circ (u^e N)(\mathcal{K}) \subset (\mathcal{M}' \otimes_{\widetilde{S}} \ker m_q) + (u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}' \otimes_{\widetilde{S}} \widehat{A}_0)$$

où m_q désigne la multiplication par q sur \widehat{A}_0 . On remarque que $\ker m_q$ (resp. $\text{Fil}^r S \cdot \widehat{A}_0$) est formé des éléments de valuation supérieure ou égale à $1 - \frac{1}{p(p-1)}$ (resp. $\frac{r}{p}$). On en déduit $\ker m_q \subset u^e \text{Fil}^r S \cdot \widehat{A}_0$, puis $\mathcal{M}' \otimes_{\widetilde{S}} \ker m_q \subset u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}' \otimes_{\widetilde{S}} \widehat{A}_0$. Ainsi $f \circ (u^e N)(\mathcal{K}) \subset u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}' \otimes_{\widetilde{S}} \widehat{A}_0$. Soit maintenant $x \in \text{Fil}^r \mathcal{K}$. Posons $y = \phi_r(x)$ et $z = N(y)$. Par ce qui précède :

$$\begin{aligned} cf(z) &= f \circ (cN) \circ \phi_r(x) = f \circ \phi_r \circ (u^e N)(x) \\ &= \phi_r \circ f \circ (u^e N)(x) \in \phi_r(u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}' \otimes_{\widetilde{S}} \widehat{A}_0) = 0 \end{aligned}$$

d'où $f(z) = 0$, i.e. $z \in \mathcal{K}$ (car la flèche $\mathcal{K} \rightarrow \mathcal{K} \otimes_{\widetilde{S}} \widehat{A}_0$ est injective). Puisque $\phi_r(\text{Fil}^r \mathcal{K})$ engendre \mathcal{K} , on en déduit que \mathcal{K} est stable par N comme voulu. \square

Application : découpage par une sous-représentation

Si \mathcal{M} est un objet de $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$ (resp. $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$), tout quotient de \mathcal{M} (dans cette catégorie) détermine une sous-représentation de $T = T_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ (resp. $T = T_{\text{st}}(\mathcal{M})$). Nous donnons ici une construction dans l'autre sens : à partir d'une sous-représentation de T , on retrouve un quotient (en fait, l'unique quotient) de \mathcal{M} qui lui correspond.

PROPOSITION 2.2.5. — Soient \mathcal{M} un objet de $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$ (resp. $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$) et T' une sous- G_1 -représentation de $T = T_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ (resp. une sous- G_K -représentation de $T_{\text{st}}(\mathcal{M})$). Alors, il existe un unique quotient \mathcal{M}' de \mathcal{M} qui est un objet de $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$ (resp. $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$) et pour lequel, en notant f la projection canonique $\mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$, $T_{\text{qst}}(f)$ (resp. $T_{\text{st}}(f)$) s'identifie à l'inclusion $T' \hookrightarrow T$.

Démonstration. — On commence par traiter le cas des objets de $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$ (i.e. sans monodromie). En utilisant l'équivalence avec $\text{Mod}_{/\mathbb{E}}^{\phi}$, il revient au même de travailler dans cette dernière catégorie. Notons donc \mathfrak{M} l'objet de $\text{Mod}_{/\mathbb{E}}^{\phi}$ correspondant à \mathcal{M} . Nous allons utiliser la classification usuelle des représentations de G_{∞} à coefficients dans \mathbb{F}_p telle que développée dans [15], §A.1. Soit M' le ϕ -module étale sur $k((u))$ associé à $T'_{|G_{\infty}}$. La donnée de l'inclusion $T' \hookrightarrow T$ fait apparaître M' comme un quotient

de $M = \mathfrak{M}[1/u]$. On note \mathfrak{M}' l'image de \mathfrak{M} dans M' . C'est un objet de $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi}$ dont la G_1 -représentation associée s'identifie à T' , au moins en tant que G_{∞} -représentation. Toutefois, comme l'inclusion $T' \hookrightarrow T$ est par hypothèse G_1 -équivariante, l'isomorphisme $T_{\tilde{S}}(\mathfrak{M}') \simeq T'$ doit lui aussi être G_1 -équivariant et l'existence est démontrée. L'unicité résulte de l'égalité $\ker f = \bigcap_{h \in T'} \ker h$, elle-même conséquence du lemme 2.1.5 de [13].

Le cas « avec monodromie » s'obtient directement en combinant ce que l'on vient de démontrer avec la proposition 2.2.2. □

COROLLAIRE 2.2.6. — *Les images essentielles de T_{qst} défini sur $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi}$ et de T_{st} défini sur $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ sont stables par sous-objets et quotients.*

Démonstration. — La stabilité par sous-objets est immédiate après la proposition 2.2.5. La stabilité par quotients s'obtient par dualité. □

Énonçons pour conclure ce paragraphe un corollaire de la proposition 2.2.5 qui nous sera utile à plusieurs reprises dans la suite.

COROLLAIRE 2.2.7. — *Soient \mathcal{M} un objet de $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi}$ (resp. $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$) et T' une sous- G_1 -représentation de $T = T_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ (resp. une sous- G_K -représentation de $T = T_{\text{st}}(\mathcal{M})$). On suppose $(\bigcap_{h \in T'} \ker h) \subset u\mathcal{M}$. Alors $T = T'$.*

Démonstration. — La proposition 2.2.5 montre que l'inclusion $T' \hookrightarrow T$ provient d'un morphisme surjectif $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ dans $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi}$ (resp. $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$), alors que le lemme 2.2.4 assure que $\mathcal{K} = \ker f$ est un objet de $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi}$ (resp. $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$). Par ailleurs, on a clairement $\mathcal{K} \subset \bigcap_{h \in T'} \ker h$, d'où $\mathcal{K} \subset u\mathcal{M}$. Par liberté de \mathcal{K} sur \tilde{S} , ceci ne peut se produire que si $\mathcal{K} = 0$. Ainsi f est un isomorphisme et $T = T'$. □

2.3. Vérification des axiomes

On est à présent en mesure de montrer que le foncteur $T_{\text{st}}: \text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$ satisfait certains axiomes de la section 1. Plus précisément, nous allons montrer que ce foncteur est un pylonet additif et autodual en établissant **(Ax1)**, **(Ax2)**, **(Ax3a)**, **(Ax3b)**, **(Ax4)** et **(Ax5)**. En fait, **(Ax1)** est déjà connu (Corollaire 2.3.3 de [13]), de même que **(Ax4)** que nous avons rappelé brièvement en 2.1. L'axiome **(Ax5)**, quant à lui, est

immédiat, tandis que **(Ax3b)** résulte de la véracité de l’assertion correspondante pour la fibration T_{qst} . Il ne reste donc qu’à prouver **(Ax2)** et **(Ax3a)**. C’est l’objet des deux propositions qui suivent.

PROPOSITION 2.3.1. — *La fibration $T_{\text{st}}: \text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$ vérifie l’axiome **(Ax2)**.*

Démonstration. — Il faut prendre garde au fait que T_{st} est un foncteur contravariant. On rappelle que notre convention à ce propos est de le considérer comme un foncteur covariant de $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ dans la catégorie opposée de $\text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$. En particulier, **(Ax2)** signifie que $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ admet des conoyaux et que T_{st} transforme ceux-ci en noyaux. C’est ce que nous allons démontrer.

Soit $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ un morphisme dans $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$. On note $T = T_{\text{st}}(\mathcal{M})$ et $T' = T_{\text{st}}(\mathcal{M}')$. Soit \mathcal{C} le quotient de \mathcal{M}' associé à $K = \ker T_{\text{st}}(f) \subset T'$ par la correspondance de la proposition 2.2.5. Par définition, on a $T_{\text{st}}(\mathcal{C}) = \ker T_{\text{st}}(f)$ et il suffit donc pour conclure de montrer que \mathcal{C} est un conoyau de f dans $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$. On considère pour cela $\mathcal{X} \in \text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ muni d’un morphisme $g: \mathcal{M}' \rightarrow \mathcal{X}$ tel que $g \circ f = 0$. Notons $\text{pr}: \mathcal{M}' \rightarrow \mathcal{C}$ la projection canonique. Soit $M_{\widetilde{S}}$ un quasi-inverse de l’équivalence de catégories $M_{\widetilde{\mathcal{E}}}: \text{Mod}_{/\widetilde{\mathcal{E}}}^{\phi} \rightarrow \text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$. Via l’identification $T' = T_{\widetilde{\mathcal{E}}} \circ M_{\widetilde{S}}(\mathcal{M}')$ (voir formule (2.3)), on peut voir les éléments de T' comme des morphismes de $M_{\widetilde{S}}(\mathcal{M}')$ dans $k((u))^{\text{sep}}$, et c’est ce que nous ferons. Le lemme 2.1.5 de [13] donne alors

$$\ker M_{\widetilde{S}}(\text{pr}) = \bigcap_{h \in K} \ker h \quad \text{et} \quad \ker M_{\widetilde{S}}(g) = \bigcap_{h \in L} \ker h$$

où L est l’image de $T_{\text{st}}(g): T_{\text{st}}(\mathcal{X}) \rightarrow T'$. Du fait que $g \circ f = 0$, on déduit $L \subset K$ et donc, par les formules précédentes, que $\ker M_{\widetilde{S}}(\text{pr}) \subset \ker M_{\widetilde{S}}(g)$. Il s’ensuit que $M_{\widetilde{S}}(g)$ se factorise par $M_{\widetilde{S}}(\text{pr})$. En appliquant $M_{\widetilde{\mathcal{E}}}$, on obtient un morphisme $g': \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{X}$ dans $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$ tel que $g' \circ \text{pr} = g$. On remarque alors que $T_{\text{qst}}(g')$ n’est rien d’autre que la corestriction à T' de $T_{\text{qst}}(g) = T_{\text{st}}(g)$. Ainsi $T_{\text{qst}}(g)$ est G_K -équivariant et par la proposition 2.2.1, g' commute à N , i.e. g' est un morphisme dans la catégorie $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$. Pour montrer la propriété universelle du conoyau, il ne reste plus qu’à justifier l’unicité de g' mais elle est claire une fois que l’on a remarqué que pr est surjectif. \square

PROPOSITION 2.3.2. — *La fibration $T_{\text{st}}: \text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$ vérifie l’axiome **(Ax3a)**.*

Démonstration. — Soient T une \mathbb{F}_p -représentation de G_K , et \mathcal{M}_1 et \mathcal{M}_2 deux objets de $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ munis d’une identification $T_{\text{st}}(\mathcal{M}_1) \simeq T_{\text{st}}(\mathcal{M}_2) \simeq T$.

On pose $\mathcal{M} = \mathcal{M}_1 \oplus \mathcal{M}_2$ et on définit \mathcal{M}' comme le quotient de \mathcal{M} attachée à la représentation diagonale de $T_{\text{st}}(\mathcal{M}) \simeq T \oplus T$ via la correspondance de la proposition 2.2.5. Montrons que \mathcal{M}' est la somme directe de \mathcal{M}_1 et \mathcal{M}_2 dans la fibre au-dessus de T .

Par construction, \mathcal{M}' est muni de morphismes $f_1 : \mathcal{M}_1 \rightarrow \mathcal{M}'$ et $f_2 : \mathcal{M}_2 \rightarrow \mathcal{M}'$ (obtenus en plongeant d'abord \mathcal{M}_1 et \mathcal{M}_2 dans \mathcal{M}) qui induisent des isomorphismes après application de T_{st} . Pour conclure, il suffit de montrer que si \mathcal{N} est un objet de $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ munis de morphismes $g_1 : \mathcal{M}_1 \rightarrow \mathcal{N}$ et $g_2 : \mathcal{M}_2 \rightarrow \mathcal{N}$ induisant des isomorphismes via T_{st} , alors il existe un unique morphisme $h : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{M}'$ tel que $h \circ f_1 = g_1$ et $h \circ f_2 = g_2$, c'est-à-dire tel que $h \circ f = g$ où $f = f_1 \oplus (-f_2)$ et $g = g_1 \oplus (-g_2)$. Cela se fait de même que dans la preuve de la proposition 2.3.1. \square

Pour récapituler, on a prouvé le théorème suivant :

THÉORÈME 2.3.3. — *La fibration $T_{\text{st}} : \text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$ est un pylonet (contravariant) additif et autodual. En particulier, tous les résultats du théorème 1.6.1 s'appliquent.*

DÉFINITION 2.3.4. — *On pose $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} = \text{Max}(\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N})$ et $\text{Min}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} = \text{Min}(\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N})$.*

Terminons par quelques remarques en revenant tout d'abord un instant sur le cas de $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi}$ (i.e. sans N). Via l'équivalence avec $\text{Mod}_{/\tilde{\mathfrak{S}}}^{\phi}$, les travaux de [13] montrent que le foncteur Max s'interprète comme l'extension des scalaires de $\tilde{\mathfrak{S}}$ à $\tilde{\mathfrak{S}}[1/u]$. Malheureusement, on n'a pas de telle interprétation dans le cas de la catégorie $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$: si l'on inverse u , qui est nilpotent, on obtient 0. On peut quand même se demander s'il n'existerait pas une catégorie équivalente à $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ pour laquelle l'opération Max se réaliserait par un simple produit tensoriel.

Une des conséquences du théorème 2.3.3 est le fait que la catégorie $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ est abélienne. Un des intérêts que cela peut présenter est l'utilisation des méthodes (co)homologiques en lien avec cette catégorie. Hélas, cela ne peut se faire directement car $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ ne possède pas assez d'injectifs. Il s'agit par contre d'une catégorie dont tous les objets sont de longueur finie à laquelle on peut appliquer les méthodes de [27] : $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ se plonge de façon pleinement fidèle dans la catégorie des ind-objets $\text{Ind}(\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N})$ dans laquelle on peut calculer les foncteurs dérivés de façon classique en utilisant des résolutions injectives.

2.4. Un résultat de pleine fidélité

THÉOREME 2.4.1. — *La restriction du foncteur T_{st} à $\text{Max}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ est pleinement fidèle.*

Démonstration. — Soient \mathcal{M} et \mathcal{M}' deux objets de $\text{Max}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$. On pose $T = T_{\text{st}}(\mathcal{M})$, $T' = T_{\text{st}}(\mathcal{M}')$, et on suppose donné un morphisme G_K -équivariant $g: T' \rightarrow T$. En factorisant g par $T' \twoheadrightarrow \text{im } g \hookrightarrow T$ et en se rappelant que l'image essentielle de T_{st} est stable par sous-objets (Corollaire 2.2.6), on se ramène à supposer successivement que g est injectif puis surjectif. Si g est injectif, la proposition 2.2.5 montre l'existence d'un morphisme $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}''$ dans $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ tel que $T_{\text{st}}(f) = g$. Le morphisme $\text{Max}(f)$ relève alors g dans la catégorie $\text{Max}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$. Le cas « g surjectif » s'obtient par dualité. \square

3. Quelques formules explicites

La méthode que nous avons utilisée dans la section 2 pour démontrer le théorème 2.3.3 a l'avantage d'être efficace mais, en contrepartie, elle donne une présentation des objets construits (conoyaux, bornes supérieures dans une fibre) en termes de représentations galoisiennes. En un sens, ceci n'est pas satisfaisant car un des objectifs recherchés par l'introduction de la catégorie $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ est de pouvoir faire des calculs entièrement du côté « algèbre linéaire » sans jamais avoir affaire aux représentations galoisiennes.

Cette section a pour but de remédier à ce problème. Pour cela, après avoir fait quelques développements sur le calcul des noyaux et conoyaux dans $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ en 3.1, nous construisons une nouvelle catégorie, notée $\text{Réd}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$, d'objets que nous qualifions de T_{st} -réduits (sous-section 3.2). Nous montrons ensuite que cette catégorie est équivalente à $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ (sous-section 3.3) et nous explicitons enfin les constructions qui nous intéressent au niveau de $\text{Réd}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ (sous-section 3.4).

Finalement, dans une dernière partie, nous donnons une formule explicite qui permet de retrouver à partir d'une représentation galoisienne T appartenant à l'image essentielle de T_{st} , l'objet maximal de $\text{Réd}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ (ou $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$) qui lui est associé.

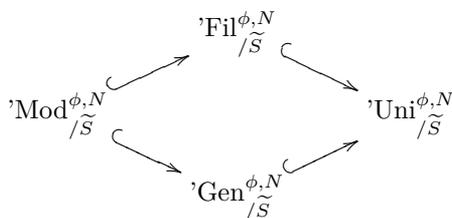
3.1. Deux adjonctions

On commence par introduire de nouvelles catégories encore plus vastes que les précédentes. La première d'entre elle est $'\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ (Uni pour « univers »). Elle regroupe les objets qui sont la donnée des points suivants :

1. un \tilde{S} -module \mathcal{M} ;
2. un \tilde{S} -module $\text{Fil}^r \mathcal{M}$ muni d'un morphisme (pas nécessairement injectif) $\iota: \text{Fil}^r \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}$ dont l'image contient $u^{er} \mathcal{M}$;
3. un morphisme ϕ -semi-linéaire $\phi_r: \text{Fil}^r \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}$;
4. des morphismes $N: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}$ et $N_{\text{Fil}}: \text{Fil}^r \mathcal{M} \rightarrow \text{Fil}^r \mathcal{M}$ vérifiant :
 - (condition de Leibniz) $N(ux) = uN(x) - ux$ pour tout $x \in \mathcal{M}$ et $N_{\text{Fil}}(ux) = uN_{\text{Fil}}(x) - ux$ pour tout $x \in \text{Fil}^r \mathcal{M}$
 - les deux diagrammes suivant sont commutatifs :

$$(3.1) \quad \begin{array}{ccc} \text{Fil}^r \mathcal{M} & \xrightarrow{\iota} & \mathcal{M} \\ N_{\text{Fil}} \downarrow & & \downarrow u^{eN} \\ \text{Fil}^r \mathcal{M} & \xrightarrow{\iota} & \mathcal{M} \end{array} \quad \begin{array}{ccc} \text{Fil}^r \mathcal{M} & \xrightarrow{\phi_r} & \mathcal{M} \\ N_{\text{Fil}} \downarrow & & \downarrow cN \\ \text{Fil}^r \mathcal{M} & \xrightarrow{\phi_r} & \mathcal{M} \end{array}$$

Les morphismes dans $'\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ sont les paires $(f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}', f_{\text{Fil}}: \text{Fil}^r \mathcal{M} \rightarrow \text{Fil}^r \mathcal{M}')$ qui sont compatibles à toutes les structures additionnelles. On isole la sous-catégorie pleine $'\text{Gen}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ de $'\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ qui regroupe les objets \mathcal{M} tels que $\phi_r(\text{Fil}^r \mathcal{M})$ engendre \mathcal{M} comme \tilde{S} -module. On dispose du diagramme suivant :



où les flèches \hookrightarrow symbolisent des foncteurs pleinement fidèles. En outre, l'image de $'\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ dans $'\text{Gen}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ (resp. de $'\text{Fil}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ dans $'\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$) est constituée des objets pour lesquels le morphisme ι est injectif. Il est finalement facile de voir que le parallélogramme précédent est cartésien, c'est-à-dire que l'intersection (calculée dans $'\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$) des catégories $'\text{Fil}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ et $'\text{Gen}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ n'est autre que $'\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$.

Les notations Gen et Fil doivent maintenant être plus claires : on utilise Gen (comme « engendre » ou « generate ») pour désigner les objets sur lesquels l'image de ϕ_r engendre tout, et Fil (comme « filtration ») pour les objets pour lesquels $\text{Fil}^r \mathcal{M}$ définit un véritable sous-module, c'est-à-dire pour lesquels l'application $\iota: \text{Fil}^r \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}$ est injective.

Le but de cette sous-section est de construire des adjoints aux quatre foncteurs d'inclusion que nous venons d'introduire. Étant donné que nous ne souhaitons pas nous limiter à une catégorie d'objets de type fini (en particulier pour les constructions menées en 3.5), la construction de ces adjonctions va reposer sur une induction transfinie. Si le lecteur n'est pas familier avec ce type de manipulations, et qu'il ne souhaite pas s'impliquer trop loin dans cette direction, nous l'invitons à supposer que tous les objets \mathcal{M} sont de type fini sur \tilde{S} , à remplacer systématiquement dans la suite le mot « ordinal » (resp. « induction transfinie ») par la locution « entier naturel » (resp. « récurrence »), et à ignorer tout ce qui concerne les ordinaux limites. L'hypothèse de type finitude, combinée au fait que \tilde{S} soit un anneau artinien, entraîne que toutes les constructions itératives que nous allons entreprendre se stabilisent au bout d'un nombre fini (et pas transfini) d'étapes.

Le foncteur Gen

Soit \mathcal{M} un objet de ${}^{\text{Uni}}_{/\tilde{S}}^{\phi_r, N}$. On définit par induction transfinie une suite décroissante $(\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}))$ (indexée par les ordinaux α) de sous-objets (dans ${}^{\text{Uni}}_{/\tilde{S}}^{\phi_r, N}$) de \mathcal{M} . Pour $\alpha = 0$, on pose simplement $\text{Gen}_0(\mathcal{M}) = \mathcal{M}$. Si α est un ordinal limite, on pose $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}) = \bigcap_{\beta < \alpha} \text{Gen}_\beta(\mathcal{M})$ et $\text{Fil}^r \text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}) = \bigcap_{\beta < \alpha} \text{Fil}^r \text{Gen}_\beta(\mathcal{M})$. Finalement, si $\alpha = \beta + 1$ est un ordinal successeur, $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M})$ est le sous- \tilde{S} -module de $\text{Gen}_\beta(\mathcal{M})$ engendré par $\phi_r(\text{Fil}^r \text{Gen}_\beta(\mathcal{M}))$. On le munit de $\text{Fil}^r \text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}) = \iota^{-1}(\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}))$. Par construction l'application ϕ_r envoie $\text{Fil}^r \text{Gen}_\beta(\mathcal{M})$ dans $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M})$ et donc induit bien par restriction un morphisme $\phi_r: \text{Fil}^r \text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Gen}_\alpha(\mathcal{M})$. De même, par définition de $\text{Fil}^r \text{Gen}_\alpha(\mathcal{M})$, le morphisme ι envoie $\text{Fil}^r \text{Gen}_\alpha(\mathcal{M})$ dans $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M})$. Les diagrammes (3.1) impliquent dans l'ordre que N stabilise $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M})$ puis que N_{Fil} stabilise $\text{Fil}^r \text{Gen}_\alpha(\mathcal{M})$. On a ainsi bien défini un objet $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M})$ de ${}^{\text{Uni}}_{/\tilde{S}}^{\phi_r, N}$, ce qui termine notre induction transfinie.

Les propriétés usuelles des ordinaux impliquent que la suite $(\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}))$ est stationnaire. On appelle $\text{Gen}(\mathcal{M})$ la valeur limite atteinte par cette

suite. Il est alors clair que $\phi_r(\text{Fil}^r \text{Gen}(\mathcal{M}))$ engendre $\text{Gen}(\mathcal{M})$, c'est-à-dire que $\text{Gen}(\mathcal{M})$ est un objet de $'\text{Gen}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. Par induction transfinie, on montre qu'un morphisme $\mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ induit par restriction des flèches $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}')$ pour tout ordinal α , et donc finalement un morphisme $\text{Gen}(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Gen}(\mathcal{M}')$. On obtient ainsi des foncteurs $\text{Gen}_\alpha: '\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow '\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ pour tout ordinal α et un foncteur limite $\text{Gen}: '\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow '\text{Gen}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. Par ailleurs, il est facile de voir que la restriction de Gen à $'\text{Fil}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ prend ses valeurs dans $'\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$.

LEMME 3.1.1. — *Le foncteur $\text{Gen}: '\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow '\text{Gen}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ (resp. $\text{Gen}: '\text{Fil}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow '\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$) est un adjoint à droite de l'inclusion canonique $'\text{Gen}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} \hookrightarrow '\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ (resp. $'\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} \hookrightarrow '\text{Fil}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$).*

Démonstration. — On ne donne la preuve que pour les catégories $'\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ et $'\text{Gen}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$, l'autre cas étant absolument semblable. Soient $\mathcal{M} \in '\text{Gen}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ et $\mathcal{M}' \in '\text{Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. Il suffit de montrer que tout morphisme $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ se factorise de façon unique par $\text{Gen}(\mathcal{M}')$. L'unicité résulte de ce que les flèches $\text{Gen}(\mathcal{M}') \rightarrow \mathcal{M}'$ et $\text{Fil}^r \text{Gen}(\mathcal{M}') \rightarrow \text{Fil}^r \mathcal{M}'$ sont injectives. Pour l'existence, il suffit de remarquer que $\text{Gen}(f)$ permet cette factorisation. \square

COROLLAIRE 3.1.2. — *La catégorie $'\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ admet des noyaux.*

Démonstration. — Soit $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ un morphisme dans $'\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. Le noyau au sens usuel de f , disons \mathcal{K} , hérite par restriction des structures supplémentaires de \mathcal{M} : on pose $\text{Fil}^r \mathcal{K} = \mathcal{K} \cap \text{Fil}^r \mathcal{M}$, et on vérifie directement $\phi_r(\text{Fil}^r \mathcal{K}) \subset \mathcal{K}$ et $N(\mathcal{K}) \subset \mathcal{K}$. On obtient comme ceci un objet de $'\text{Fil}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. Le lemme 3.1.1 assure alors que $\text{Gen}(\mathcal{K})$ est un noyau de f dans la catégorie $'\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. \square

On démontre de même une version légèrement plus précise du corollaire précédent qui dit que la catégorie $'\text{Fil}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ admet des noyaux (ceux-ci sont construits de la manière naïve) et que si $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ est un morphisme de $'\text{Fil}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ qui admet pour noyau \mathcal{K} , alors $\text{Gen}(f)$ admet pour noyau $\text{Gen}(\mathcal{K})$ dans la catégorie $'\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. On prendra garde par contre au fait que ceci n'implique aucune exactitude (au sens des suites exactes dans $'\text{Fil}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$) pour le foncteur Gen . On a toutefois, à ce sujet, le résultat très partiel suivant :

LEMME 3.1.3. — Soit $0 \rightarrow \mathcal{M}'' \rightarrow \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}' \rightarrow 0$ une suite exacte dans $'\text{Fil}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$. On suppose qu'il existe un ordinal α tel que $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}') = 0$. Alors pour tout ordinal β , on a $\text{Gen}_{\alpha+\beta}(\mathcal{M}) \subset \text{Gen}_\beta(\mathcal{M}'')$.

Démonstration. — Il suffit de prouver le lemme pour $\beta = 0$, les autres cas se déduisant de celui-ci par une induction transfinie immédiate. Or l'image de $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M})$ dans \mathcal{M}' est contenue dans $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}')$ qui est nul par hypothèse. Ainsi $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}) \subset \mathcal{M}'' = \text{Gen}_0(\mathcal{M}'')$, comme voulu. \square

COROLLAIRE 3.1.4. — Si $0 \rightarrow \mathcal{M}'' \rightarrow \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}' \rightarrow 0$ est une suite exacte et si $\text{Gen}(\mathcal{M}') = \text{Gen}(\mathcal{M}'') = 0$, alors $\text{Gen}(\mathcal{M}) = 0$.

Démonstration. — L'hypothèse $\text{Gen}(\mathcal{M}') = \text{Gen}(\mathcal{M}'') = 0$ implique l'existence d'ordinaux α et β tels que $\text{Gen}_\alpha(\mathcal{M}') = 0$ et $\text{Gen}_\beta(\mathcal{M}'') = 0$. Par le lemme précédent $\text{Gen}_{\alpha+\beta}(\mathcal{M}) = 0$ et la corollaire en résulte. \square

Le calcul de $\text{Gen}(\widehat{A})$

Si \mathcal{M} est un objet de $'\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$, on a $\text{Gen}(\mathcal{M}) = \mathcal{M}$, ce qui entraîne $T_{\text{st}}(\mathcal{M}) = \text{Hom}_{\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}}(\mathcal{M}, \widehat{A})$. Il semble donc intéressant de calculer $\text{Gen}(\widehat{A})$, et c'est ce que nous nous proposons de faire ci-après comme premier exercice de manipulation du foncteur Gen .

Du fait que tout élément de $\mathcal{O}_{\tilde{K}}$ possède certainement une racine p -ième, on déduit que $\phi_i: \text{Fil}^i(k \otimes_{(\phi), k} \mathcal{O}_{\tilde{K}}/p) \rightarrow k \otimes_{(\phi), k} \mathcal{O}_{\tilde{K}}/p$ est surjectif. De la description de l'action du Frobenius sur \widehat{A} donnée lors de la définition, il suit

$$\phi_r(\text{Fil}^r \widehat{A}) = \sum_{i=0}^r (k \otimes_{(\phi), k} \mathcal{O}_{\tilde{K}}/p) \cdot Y^i \subset \widehat{A}.$$

Par définition $\text{Gen}_1(\widehat{A})$ est le sous- \tilde{S} -module de \widehat{A} engendré par $\phi_r(\text{Fil}^r \widehat{A})$. Ainsi si l'on note \widehat{S} l'image du morphisme naturel $\tilde{S} \otimes_k \widehat{A}_0 \rightarrow \widehat{A}$, on a $\text{Gen}_1(\widehat{A}) = \sum_{i=0}^r \widehat{S} \cdot Y^i$. Il s'agit maintenant de calculer les itérés suivants, mais par chance, cela est assez simple. En effet, on remarque que l'élément $(1 \otimes \pi_1^{r-i})Y^i$ est simultanément dans $\text{Gen}_1(\widehat{A})$ et dans $\text{Fil}^r \widehat{A}$. De plus $\phi_r((1 \otimes \pi_1^{r-i})Y^i) = (-1)^{r-i}Y^i$. Ceci entraîne $\text{Gen}_2(\widehat{A}) \supset \text{Gen}_1(\widehat{A})$ puis l'égalité, l'inclusion réciproque étant contenue dans la définition. Ainsi la suite des $\text{Gen}_\alpha(\widehat{A})$ est stationnaire à partir de $\alpha = 1$. L'expression de $\text{Gen}(\widehat{A})$ en résulte directement

$$\text{Gen}(\widehat{A}) = \text{Gen}_1(\widehat{A}) = \sum_{i=0}^r \widehat{S} \cdot Y^i.$$

Le lemme suivant termine de préciser la structure algébrique de $\text{Gen}(\widehat{A})$.

LEMME 3.1.5. — *La famille des Y^i ($0 \leq i \leq r$) est libre sur \widehat{S} . Ainsi, $\text{Gen}(\widehat{A})$ est un \widehat{S} -module libre de rang $r + 1$ de base $(Y^i)_{0 \leq i \leq r}$.*

Démonstration. — Nous montrons un résultat légèrement plus fort, à savoir la liberté sur un anneau plus gros \widehat{B} . Cet anneau est défini comme la sous- $(k \otimes_{(\phi),k} \mathcal{O}_{\widehat{K}}/p)$ -algèbre de \widehat{A} engendrée par X . Il est isomorphe à $(k \otimes_{(\phi),k} \mathcal{O}_{\widehat{K}}/p)[X]/X^p$ et fait de \widehat{A} un \widehat{B} -module libre de base $(\gamma_{pj}(X))_{j \geq 0}$. Par ailleurs, un calcul direct montre que sur cette base Y^i (pour $0 \leq i \leq r$) n'a de composantes non nulles que pour $j \leq i$, et que la composante en $j = i$ est inversible (c'est un élément non nul de \mathbb{F}_p). La conclusion en découle. □

Remarque. — De ce qui précède, il résulte sans mal que l'image de $\phi_r : \text{Fil}^r \text{Gen}(\widehat{A}) \rightarrow \text{Gen}(\widehat{A})$ est le sous $(k \otimes_{(\phi),k} \mathcal{O}_{\widehat{K}}/p)$ -module (libre) engendré par les Y^i avec $0 \leq i \leq r$.

Le foncteur Fil

De façon semblable à ce qui vient d'être fait, on construit maintenant un foncteur $\text{Fil} : \text{'Uni}'_{/\widehat{S}}^{\phi, N} \rightarrow \text{'Fil}'_{/\widehat{S}}^{\phi, N}$. Soit $\mathcal{M} \in \text{'Uni}'_{/\widehat{S}}^{\phi, N}$. On définit par induction une suite transfinie $(\text{Fil}_\alpha(\mathcal{M}))$ de quotients successifs de \mathcal{M} . On pose tout d'abord $\text{Fil}_0(\mathcal{M}) = \mathcal{M}$.

Supposons que $\alpha = \beta + 1$ soit un ordinal successeur. Notons K le noyau de $\iota : \text{Fil}^r \text{Fil}_\beta(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Fil}_\beta(\mathcal{M})$ et Q le sous- \widehat{S} -module de $\text{Fil}_\beta(\mathcal{M})$ engendré par $\phi_r(K)$. Définissons :

$$\text{Fil}_\alpha(\mathcal{M}) = \frac{\text{Fil}_\beta(\mathcal{M})}{Q} \quad \text{et} \quad \text{Fil}^r \text{Fil}_\alpha(\mathcal{M}) = \frac{\text{Fil}^r \text{Fil}_\beta(\mathcal{M})}{K}.$$

Par construction, $\phi_r : \text{Fil}^r \text{Fil}_\beta(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Fil}_\beta(\mathcal{M})$ se factorise en un morphisme $\phi_r : \text{Fil}^r \text{Fil}_\alpha(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Fil}_\alpha(\mathcal{M})$. En outre, ι induit une application (injective) $\text{Fil}^r \text{Fil}_\alpha(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Fil}_\beta(\mathcal{M})$ que l'on peut composer avec la projection canonique $\text{Fil}_\beta(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Fil}_\alpha(\mathcal{M})$ pour obtenir un nouveau morphisme $\iota : \text{Fil}^r \text{Fil}_\alpha(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Fil}_\alpha(\mathcal{M})$. La commutation des diagrammes (3.1) implique dans l'ordre $N_{\text{Fil}}(K) \subset K$ puis $N(Q) \subset Q$. On en déduit des opérateurs N_{Fil} et N agissant respectivement sur les quotients $\text{Fil}^r \text{Fil}_\alpha(\mathcal{M})$ et $\text{Fil}_\alpha(\mathcal{M})$ dont il est facile de vérifier qu'ils font encore commuter les diagrammes (3.1). Au final, on a donc obtenu un objet $\text{Fil}_\alpha(\mathcal{M}) \in \text{'Uni}'_{/\widehat{S}}^{\phi, N}$ muni d'un morphisme surjectif $\text{Fil}_\beta(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Fil}_\alpha(\mathcal{M})$. Ceci montre que $\text{Fil}_\alpha(\mathcal{M})$ apparaît comme un quotient de $\text{Fil}_\beta(\mathcal{M})$ et donc aussi de \mathcal{M} .

Finalement, si α est un ordinal limite, on pose simplement $\text{Fil}_\alpha(\mathcal{M}) = \varinjlim_{\beta < \alpha} \text{Fil}_\beta(\mathcal{M})$. La suite des $\text{Fil}_\alpha(\mathcal{M})$ est stationnaire, et sa limite, notée $\text{Fil}(\mathcal{M})$, est nécessairement un objet de $\text{'Uni}_{/S}^{\phi, N}$ sur lequel ι est injectif, c'est-à-dire un objet de $\text{'Fil}_{/S}^{\phi, N}$. Par ailleurs, si $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ est un morphisme dans $\text{'Uni}_{/S}^{\phi, N}$, on vérifie par induction transfinie qu'il induit pour tout ordinal α un morphisme $\text{Fil}_\alpha(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Fil}_\alpha(\mathcal{M}')$ et donc, par passage à la limite, une flèche $\text{Fil}(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Fil}(\mathcal{M}')$. Ainsi, obtient-on pour tout ordinal α un foncteur $\text{Fil}_\alpha: \text{'Uni}_{/S}^{\phi, N} \rightarrow \text{'Uni}_{/S}^{\phi, N}$, ainsi qu'un foncteur $\text{Fil}: \text{'Uni}_{/S}^{\phi, N} \rightarrow \text{'Fil}_{/S}^{\phi, N}$. Le fait que $\text{Fil}(\mathcal{M})$ apparaisse comme un quotient de \mathcal{M} montre que Fil stabilise la catégorie $\text{'Gen}_{/S}^{\phi, N}$. Ainsi, il induit par restriction un foncteur $\text{Fil}: \text{'Gen}_{/S}^{\phi, N} \rightarrow \text{'Mod}_{/S}^{\phi, N}$.

LEMME 3.1.6. — *Le foncteur $\text{Fil}: \text{'Uni}_{/S}^{\phi, N} \rightarrow \text{'Fil}_{/S}^{\phi, N}$ (resp. $\text{Fil}: \text{'Gen}_{/S}^{\phi, N} \rightarrow \text{'Mod}_{/S}^{\phi, N}$) est un adjoint à gauche du foncteur d'inclusion $\text{'Fil}_{/S}^{\phi, N} \hookrightarrow \text{'Uni}_{/S}^{\phi, N}$ (resp. $\text{'Mod}_{/S}^{\phi, N} \hookrightarrow \text{'Gen}_{/S}^{\phi, N}$).*

Démonstration. — Soient $\mathcal{M} \in \text{'Uni}_{/S}^{\phi, N}$ et $\mathcal{M}' \in \text{'Fil}_{/S}^{\phi, N}$. Il suffit de montrer que tout morphisme $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ se factorise de façon unique par $\text{Fil}(\mathcal{M})$. L'unicité résulte de ce que la flèche $\mathcal{M} \rightarrow \text{Fil}(\mathcal{M})$ est surjective (sur les modules sous-jacents et sur les Fil^r). Pour l'existence, on remarque que $\text{Fil}(\mathcal{M}') = \mathcal{M}'$ puis que le morphisme $\text{Fil}(f)$ convient. On raisonne de même avec les catégories $\text{'Uni}_{/S}^{\phi, N}$ et $\text{'Fil}_{/S}^{\phi, N}$. □

COROLLAIRE 3.1.7. — *La catégorie $\text{'Mod}_{/S}^{\phi, N}$ admet des conoyaux.*

Démonstration. — En vertu du lemme 3.1.6, il suffit de montrer que $\text{'Gen}_{/S}^{\phi, N}$ admet des conoyaux. Soit donc $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ un morphisme dans $\text{'Gen}_{/S}^{\phi, N}$. On note \mathcal{C} (resp. $\text{Fil}^r \mathcal{C}$) le conoyau du morphisme sous-jacent à f (resp. du morphisme donné par f sur les Fil^r). Il est alors aisé de vérifier que les structures supplémentaires sur \mathcal{M}' passent au quotient pour faire de \mathcal{C} un objet de $\text{'Uni}_{/S}^{\phi, N}$ qui, est en fait dans $\text{'Gen}_{/S}^{\phi, N}$. □

Remarque. — Si $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ est strictement compatible à Fil^r dans le sens où $f(\text{Fil}^r \mathcal{M}) = f(\mathcal{M}) \cap \text{Fil}^r \mathcal{M}'$, alors le conoyau de f calculé dans $\text{'Gen}_{/S}^{\phi, N}$ est déjà un objet de $\text{'Mod}_{/S}^{\phi, N}$.

Terminons par un dernier résultat important concernant le foncteur Fil .

LEMME 3.1.8. — Pour tout objet $\mathcal{M} \in {}^{\prime}\text{Gen}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$, on a une identification canonique et fonctorielle :

$$T_{\text{st}}(\text{Fil}(\mathcal{M})) = \text{Hom}_{\text{Uni}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}}(\mathcal{M}, \widehat{A}).$$

Démonstration. — C’est une conséquence directe du lemme 3.1.6. \square

COROLLAIRE 3.1.9. — Soit $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ un morphisme dans ${}^{\prime}\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$. Si \mathcal{C} désigne son conoyau (dans ${}^{\prime}\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$), alors $T_{\text{st}}(\mathcal{C})$ est le noyau de $T_{\text{st}}(f): T_{\text{st}}(\mathcal{M}') \rightarrow T_{\text{st}}(\mathcal{M})$.

Sans la monodromie

Bien entendu, tout ce qui vient d’être fait peut se refaire sans difficulté supplémentaire avec les objets « sans N ». On notera ${}^{\prime}\text{Gen}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$, ${}^{\prime}\text{Fil}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$ et ${}^{\prime}\text{Uni}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$ les catégories obtenues et encore Gen et Fil les foncteurs adjoints. Ceci ne prête pas à confusion car on vérifie facilement que ces foncteurs commutent aux foncteurs d’oubli.

3.2. Éléments nilpotents et objets réduits

On introduit ici la catégorie $\text{Réd}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$ qui va jouer un rôle important dans la suite.

DÉFINITION 3.2.1. — Soit $\mathcal{M} \in {}^{\prime}\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$. Un élément $x \in \mathcal{M}$ est T_{st} -nilpotent si $f(x) = 0$ pour tout $f \in T_{\text{st}}(\mathcal{M})$. L’ensemble des éléments T_{st} -nilpotents de \mathcal{M} est noté $\text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M})$.

Le module \mathcal{M} est dit T_{st} -réduit si $\text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M}) = 0$.

Remarque. — Les définitions précédentes auraient un sens pour une catégorie plus générale que ${}^{\prime}\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$, mais finalement que peu d’intérêt pour les applications que nous souhaitons développer ici. Pour simplifier un peu la présentation, nous nous restreignons donc au cas de ${}^{\prime}\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$.

On vérifie sans mal que cette construction définit un foncteur $\text{Nil}_{\text{st}}: {}^{\prime}\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow {}^{\prime}\text{Fil}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$. Soit $\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M})$ le quotient de \mathcal{M} par $\text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M})$. Les structures supplémentaires sur \mathcal{M} passent au quotient et font de $\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M})$ un objet de ${}^{\prime}\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi, N}$. De plus, l’application de passage au quotient $\mathcal{M} \rightarrow$

$\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M})$ induit un isomorphisme $T_{\text{st}}(\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M})) \simeq T_{\text{st}}(\mathcal{M})$. Il en résulte que $\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M})$ est un objet T_{st} -réduit, ou si l'on préfère que $\text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Réd}_{\text{st}} = \text{Réd}_{\text{st}}$. L'objet $\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M})$ est appelé le T_{st} -réduit de \mathcal{M} . On note $'\text{Réd}_{/S}^{\phi, N}$ (resp. $\text{Réd}_{/S}^{\phi, N}$) la sous-catégorie pleine de $'\text{Mod}_{/S}^{\phi, N}$ qui regroupe les objets T_{st} -réduits (resp. T_{st} -réduits et de type fini sur S). On a le diagramme suivant :

$$(3.2) \quad \begin{array}{ccc} \text{Mod}_{/S}^{\phi, N} \hookrightarrow & & '\text{Mod}_{/S}^{\phi, N} \\ \text{Réd}_{\text{st}} \downarrow & & \uparrow \downarrow \text{Réd}_{\text{st}} \\ \text{Réd}_{/S}^{\phi, N} \hookrightarrow & & '\text{Réd}_{/S}^{\phi, N} \end{array}$$

où les flèches \hookrightarrow symbolisent les inclusions et la flèche \rightarrow un foncteur essentiellement surjectif. Par un argument analogue à celui utilisé dans la preuve du lemme 3.1.6, on obtient :

LEMME 3.2.2. — *Le foncteur $\text{Réd}_{\text{st}} : '\text{Mod}_{/S}^{\phi, N} \rightarrow '\text{Réd}_{/S}^{\phi, N}$ est un adjoint à gauche du foncteur d'inclusion.*

COROLLAIRE 3.2.3. — *Les catégories $'\text{Réd}_{/S}^{\phi, N}$ et $\text{Réd}_{/S}^{\phi, N}$ admettent des conoyaux. De plus, si f est un morphisme dans une de ces deux catégories, et si \mathcal{C} est le conoyau de f , alors $T_{\text{st}}(\mathcal{C})$ s'identifie au noyau de $T_{\text{st}}(f)$.*

Démonstration. — Soit $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ un morphisme dans $'\text{Réd}_{/S}^{\phi, N}$. Le corollaire 3.1.7 assure que f admet un conoyau \mathcal{C} dans $'\text{Mod}_{/S}^{\phi, N}$. Le lemme 3.2.2 montre que $\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{C})$ est un conoyau de f dans $'\text{Réd}_{/S}^{\phi, N}$. Par ailleurs, si \mathcal{M}' est de type fini, il en est de même de \mathcal{C} puis de $\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{C})$ puisque ce sont des quotients successifs de \mathcal{M}' . Donc, si f est un morphisme dans $\text{Réd}_{/S}^{\phi, N}$, son conoyau dans $'\text{Réd}_{/S}^{\phi, N}$ est un objet de $\text{Réd}_{/S}^{\phi, N}$. Ainsi $\text{Réd}_{/S}^{\phi, N}$ admet, elle aussi, des conoyaux.

La propriété de compatibilité au foncteur T_{st} résulte du corollaire 3.1.9 et de l'identification canonique $T_{\text{st}}(\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{C})) \simeq T_{\text{st}}(\mathcal{C})$. □

Voici encore un lemme, qui découle directement des définitions, mais qui nous sera utile à plusieurs reprises dans la suite.

LEMME 3.2.4. — *Soit $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ un morphisme dans la catégorie $\text{Mod}_{/S}^{\phi, N}$. On suppose que $T_{\text{st}}(f)$ est surjectif. Alors $\text{Réd}_{\text{st}}(f)$ est injectif.*

Démonstration. — On peut bien sûr supposer que \mathcal{M} et \mathcal{M}' sont T_{st} -réduits, et on veut alors montrer que f , lui-même, est injectif. Soit $x \in \ker f$.

Par hypothèse, tout $g \in T_{\text{st}}(\mathcal{M})$ se factorise par f et donc s'annule sur x . On en déduit que $x \in \text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M})$ et donc que $x = 0$ comme souhaité. \square

Sans la monodromie

Évidemment, il est possible de rejouer la chanson en omettant partout l'opérateur N . Si \mathcal{M} est un objet de $\text{'Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi}$, on dit que $x \in \mathcal{M}$ est T_{qst} -nilpotent si $f(x) = 0$ pour tout $f \in T_{\text{qst}}(\mathcal{M})$; on note $\text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ l'ensemble des éléments T_{qst} -nilpotents et $\text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M}) = \mathcal{M}/\text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$. La projection canonique $\mathcal{M} \rightarrow \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ est envoyé sur un isomorphisme par le foncteur T_{qst} . Les équivalents des lemmes 3.2.2, 3.2.4 et du corollaire 3.2.3 sont encore vrais dans ce contexte et on définit de façon analogue les catégories $\text{'Réd}_{/\tilde{S}}^{\phi}$ et $\text{Réd}_{/\tilde{S}}^{\phi}$; elles apparaissent dans un diagramme analogue à (3.2).

Question terminologie, un objet \mathcal{M} pour lequel $\text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M}) = 0$ est dit T_{qst} -réduit et $\text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ est appelé le T_{qst} -réduit de \mathcal{M} . Malheureusement, si N est un objet de $\text{'Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$, les notions « T_{qst} -nilpotent » et « T_{st} -nilpotent » ne coïncident pas; il est donc nécessaire de faire la distinction dans l'écriture et la terminologie. On a malgré tout le lemme suivant.

LEMME 3.2.5. — Soit $\mathcal{M} \in \text{'Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. Alors

$$\text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M}) = \{x \in \mathcal{M} / \forall i \geq 0, N^i(x) \in \text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M})\}.$$

En particulier $\text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M}) \subset \text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ et la projection $\mathcal{M} \rightarrow \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ se factorise par $\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M})$.

De plus $\text{Nil}_{\text{qst}}(\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M}))$ est l'image de $\text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ dans $\text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M})$, et $\text{Réd}_{\text{qst}} \circ \text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M}) = \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$.

Démonstration. — La première partie du lemme est une conséquence directe du lemme 2.1.1 et de la remarque faite dans sa démonstration. De $\text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M}) \subset \text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$, on déduit que la projection $\mathcal{M} \rightarrow \text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M})$ induit un isomorphisme après application de T_{qst} . La dernière partie du lemme résulte facilement de cette remarque. \square

3.3. Des équivalences de catégories

Le but de cette sous-section est de démontrer le théorème suivant.

THÉORÈME 3.3.1. — Les foncteurs $\text{Réd}_{\text{qst}} : \text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi} \rightarrow \text{Réd}_{/\tilde{S}}^{\phi}$ et $\text{Réd}_{\text{st}} : \text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow \text{Réd}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ sont des équivalences de catégories.

Remarque. — Combiné à ce qui a été développé précédemment, ce théorème permet de construire un objet de $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^\phi$ (resp. $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi,N}$) à partir de n'importe quel objet de type fini de $\text{'Uni}_{/\tilde{S}}^\phi$ (resp. $\text{'Uni}_{/\tilde{S}}^{\phi,N}$), simplement en lui appliquant successivement les foncteurs Fil, Gen, Réd_{qst} (resp. Réd_{st}) puis $\text{Réd}_{\text{qst}}^{-1}$ (resp. $\text{Réd}_{\text{st}}^{-1}$). Ceci nous sera particulièrement utile dans la suite pour mener à bien un certain nombre de constructions.

Définition des quasi-inverses

Soit $\text{Mod}_{\text{qst}} : \text{Réd}_{/\tilde{S}}^\phi \rightarrow \text{Mod}_{/\tilde{S}}^\phi$ le foncteur défini par la formule usuelle :

$$\text{Mod}_{\text{qst}}(\mathcal{M}) = \tilde{S} \otimes_{(\phi), k[u]/u^e} \frac{\text{Fil}^r \mathcal{M}}{u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}}$$

les structures additionnelles s'obtenant comme suit. Remarquons tout d'abord que l'on dispose d'un morphisme \tilde{S} -linéaire $\text{pr} = \text{id} \otimes \phi_r : \text{Mod}_{\text{qst}}(\mathcal{M}) \rightarrow \mathcal{M}$. Celui-ci est surjectif puisque par hypothèse $\phi_r(\text{Fil}^r \mathcal{M})$ engendre \mathcal{M} . On pose $\text{Fil}^r \text{Mod}_{\text{qst}}(\mathcal{M}) = \text{pr}^{-1}(\text{Fil}^r \mathcal{M})$ et $\phi_r(x) = 1 \otimes \text{pr}(x)$ pour $x \in \text{Fil}^r \text{Mod}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$. Ainsi, $\text{Mod}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ est un objet $\text{'Mod}_{/\tilde{S}}^\phi$, qui est bien entendu de type fini de \tilde{S} . Il reste à voir qu'il est bien dans $\text{Mod}_{/\tilde{S}}^\phi$, c'est-à-dire qu'il est libre sur \tilde{S} . Cela résulte directement de la proposition 3.3.3 (ci-dessous) dont la démonstration est basée sur le lemme suivant.

LEMME 3.3.2. — Soit $y \in \text{Fil}^r \hat{A}_0$. On suppose $\phi_r(y) \neq 0$. Alors $u^{e-1}y \neq 0$.

Démonstration. — Comme $\phi_r(y)$ est non nul, y est lui-même non nul et possède une valuation p -adique v bien définie (on rappelle que \hat{A}_0 est isomorphe en tant qu'anneau à $\mathcal{O}_{\tilde{K}}/p$). De $\phi_r(y) \neq 0$, il découle $pv - r < 1$. Il s'ensuit $v < \frac{r+1}{p} \leq 1 - \frac{1}{p}$ puis $u^{e-1}y = \pi_1^{e-1}y \neq 0$. □

PROPOSITION 3.3.3. — Soit $\mathcal{M} \in \text{Réd}_{/\tilde{S}}^\phi$. Alors $\text{Fil}^r \mathcal{M}/u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}$ est libre sur $k[u]/u^e$.

Démonstration. — Puisque \mathcal{M} est de type fini, il existe un $k[[u]]$ -module libre de rang fini $\widehat{\mathcal{M}}$ muni d'un morphisme surjectif $\text{pr} : \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \mathcal{M}$. On peut en outre supposer que $\widehat{\mathcal{M}}$ est de rang minimal, ce qui entraîne facilement via la théorie des diviseurs élémentaires que $\ker \text{pr} \subset u\widehat{\mathcal{M}}$, c'est-à-dire que pr induit un isomorphisme $\widehat{\mathcal{M}}/u\widehat{\mathcal{M}} \simeq \mathcal{M}/u\mathcal{M}$. Notons d le rang de $\widehat{\mathcal{M}}$. Soit $\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}}$ l'image réciproque par f de $\text{Fil}^r \mathcal{M}$. Il existe $\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_d$ une base de $\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}}$ et des entiers n_1, \dots, n_d tels que $u^{n_1}\hat{x}_1, \dots, u^{n_d}\hat{x}_d$ soit une base de $\ker \text{pr}$. Soit $x_i \in \mathcal{M}$ l'image de \hat{x}_i . Du fait que $\phi_r(\text{Fil}^r \mathcal{M})$ engendre \mathcal{M} , on

déduit que la famille des $\phi_r(x_i) \pmod u$ engendre $\mathcal{M}/u\mathcal{M}$. Comme elle est de cardinal d , elle en est une base. En particulier, aucun des $\phi_r(x_i)$ n'est nul. Comme \mathcal{M} est T_{qst} -réduit, il existe pour tout i , un élément $f_i \in T_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ tel que $f_i(\phi_r(x_i)) \neq 0$. Fixons un indice i et posons $y = f_i(x_i) \in \text{Fil}^r \widehat{A}_0$. On a $\phi_r(y) \neq 0$, et donc par le lemme 3.3.2, $f_i(u^{e-1}x_i) = u^{e-1}y \neq 0$. On en déduit que $u^{e-1}x_i$ est lui-même non nul, i.e $u^{e-1}\hat{x}_i \notin \ker \text{pr}$. Ainsi $n_i \geq e$, et comme ceci est vrai pour tout i , la proposition est démontrée. \square

On peut procéder de même lorsque l'opérateur de monodromie est présent : à un objet \mathcal{M} de $\text{Réd}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}$, on associe $\text{Mod}_{\text{st}}(\mathcal{M})$ défini par les mêmes formules que $\text{Mod}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ auxquelles on ajoute $N(s \otimes x) = c^{-1} \otimes u^e N(x) - us' \otimes x$ ($s \in \widetilde{S}, x \in \text{Fil}^r \mathcal{M}/u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}$) où s' désigne la dérivée de s vu comme polynôme en u . La liberté (sur $k[u]/u^e$) du quotient $\text{Fil}^r \mathcal{M}/u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}$ s'obtient alors comme dans la preuve de la proposition 3.3.3 en remplaçant (« T_{qst} » par « T_{st} » et) la référence au lemme 3.3.2 par une référence au lemme suivant.

LEMME 3.3.4. — Soit $y \in \text{Fil}^r \widehat{A}$. On suppose que $\phi_r(y) \neq 0$. Alors $u^{e-1}y \neq 0$.

Démonstration. — Comme u et π_1 diffèrent d'une unité, il suffit de montrer que $\pi_1^{e-1}y$ ne s'annule pas. Par définition, y s'écrit de façon unique sous la forme :

$$y = a_0 + a_1X + a_2\frac{X^2}{2} + \dots + a_n\frac{X^n}{n!}$$

pour un certain entier n , avec $a_i \in \text{Fil}^{r-i} \widehat{A}_0$ (où par convention $\text{Fil}^j \widehat{A}_0 = \widehat{A}_0$ pour $j \leq 0$). On a alors $\phi_r(y) = \phi_r(a_0) + \phi_{r-1}(a_1)Y + \dots + \phi_0(a_r)\frac{Y^r}{r!}$ (où on rappelle que $Y = \frac{(1+X)^p - 1}{p}$). Comme $\phi_r(y) \neq 0$, il existe un indice $i \in \{0, \dots, r\}$ tel que $\phi_{r-i}(a_i) \neq 0$. Le lemme 3.3.2 assure alors que $\pi_1^{e-1}a_i$ est non nul, et donc qu'il en est de même de $\pi_1^{e-1}y$. \square

Calcul des composées

Nous allons montrer que Mod_{qst} (resp. Mod_{st}) est un quasi-inverse de Réd_{qst} (resp. Réd_{st}) simplement en calculant les composées dans les deux sens. Nous commençons par le calcul de $\text{Mod}_{\text{qst}} \circ \text{Réd}_{\text{qst}}$ (resp. $\text{Mod}_{\text{st}} \circ \text{Réd}_{\text{st}}$) largement basé sur le lemme suivant.

LEMME 3.3.5. — Soit \mathcal{M} un objet de $\text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi}$ (resp. $\text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}$). Alors $\text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ (resp. $\text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M})$) est inclus dans $u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}$.

Démonstration. — Grâce à l'inclusion $\text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M}) \subset \text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ énoncée dans le lemme 3.2.5, il suffit de montrer le résultat lorsqu'il n'y a pas d'opérateur de monodromie.

Notons d le rang de \mathcal{M} comme \tilde{S} -module. Montrons tout d'abord que $\text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M}) \subset u\mathcal{M}$. On remarque à cet effet que $\text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})/u\text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ est naturellement un quotient de $\mathcal{M}/u\mathcal{M}$. Soit d' sa dimension (sur k). On a $d' \leq d$. Par ailleurs, en relevant une famille génératrice de $\text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})/u\text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$, on montre que $\text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ est lui aussi engendré (sur \tilde{S}) par d' éléments. Autrement dit, il existe un morphisme surjectif \tilde{S} -linéaire $f: \mathcal{N} \rightarrow \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ où \mathcal{N} est un \tilde{S} -module libre de rang d' . Posons $\text{Fil}^r \mathcal{N} = f^{-1}(\text{Fil}^r \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M}))$. En appliquant la théorie des diviseurs élémentaires à l'inclusion $\text{Fil}^r \mathcal{N} \subset \mathcal{N}$, on définit facilement une application $\phi_r: \text{Fil}^r \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{N}$ qui fait de \mathcal{N} un objet de $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi}$ et de f un morphisme dans cette catégorie. On en déduit une injection $T_{\text{qst}}(\mathcal{M}) \simeq T_{\text{qst}}(\text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})) \hookrightarrow T_{\text{qst}}(\mathcal{N})$. L'espace de départ est un \mathbb{F}_p -espace vectoriel de dimension d , alors que celui d'arrivée est de dimension d' . Il en résulte $d \leq d'$, et puis $d = d'$. Ainsi $\text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})/u\text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M}) = \mathcal{M}/u\mathcal{M}$, ce qui entraîne $\text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M}) \subset u\mathcal{M}$ comme annoncé.

La fin de la preuve consiste à répéter l'argument de la démonstration de la proposition 3.3.3 en appliquant la théorie des diviseurs élémentaires non pas à l'inclusion $\ker \text{pr} \subset \text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}}$ mais aux deux sous-modules $\text{pr}^{-1}(\text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M}))$ et $\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}}$, les entiers n_i qui apparaissent étant alors *a priori* relatifs. Nous laissons au lecteur le soin de faire ces modifications mineures. □

COROLLAIRE 3.3.6. — *Pour tout objet \mathcal{M} de $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi}$ (resp. $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi,N}$), on a un isomorphisme canonique et fonctoriel :*

$$\text{Mod}_{\text{qst}} \circ \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M}) \simeq \mathcal{M} \quad (\text{resp. } \text{Mod}_{\text{st}} \circ \text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M}) \simeq \mathcal{M}).$$

Démonstration. — On n'écrit la preuve que pour $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi}$, l'autre cas étant entièrement analogue. Par le lemme 3.3.5, le morphisme canonique $\mathcal{M} \rightarrow \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ induit un isomorphisme

$$\text{Fil}^r \mathcal{M}/u^e \text{Fil}^r \mathcal{M} \simeq \text{Fil}^r \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})/u^e \text{Fil}^r \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M}).$$

Il s'ensuit que $\text{Mod}_{\text{qst}} \circ \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ s'identifie à $\tilde{S} \otimes_{(\phi),k[u]/u^e} \text{Fil}^r \mathcal{M}/u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}$. Le morphisme $\text{pr} = \text{id} \otimes \phi_r$ induit une application surjective (compatible aux structures additionnelles) $\text{Mod}_{\text{qst}} \circ \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M}) \rightarrow \mathcal{M}$. Comme les espaces de départ et d'arrivée sont des \tilde{S} -modules libres de même rang, c'est un isomorphisme et le corollaire est démontré. □

On termine à présent la preuve du théorème 3.3.1 en faisant le calcul de $\text{Réd}_{\text{qst}} \circ \text{Mod}_{\text{qst}}$ (resp. $\text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Mod}_{\text{st}}$).

PROPOSITION 3.3.7. — *Pour tout objet \mathcal{M} de $\text{Réd}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$ (resp. $\text{Réd}_{/\widetilde{S}}^{\phi,N}$), on a un isomorphisme canonique et fonctoriel :*

$$\text{Réd}_{\text{qst}} \circ \text{Mod}_{\text{qst}}(\mathcal{M}) \simeq \mathcal{M} \quad (\text{resp. } \text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Mod}_{\text{st}}(\mathcal{M}) \simeq \mathcal{M}).$$

Démonstration. — Comme précédemment, on ne donne la preuve que pour $\text{Réd}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$. Posons $\mathcal{M}' = \text{Mod}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ et notons $\text{pr} = \text{id} \otimes \phi_r : \mathcal{M}' \rightarrow \mathcal{M}$ la projection canonique. Nous allons montrer que $\text{Réd}_{\text{qst}}(\text{pr})$ est un isomorphisme (ce qui permettra de conclure). Étant donné que pr est surjectif, il est clair déjà que $\text{Réd}_{\text{qst}}(\text{pr})$ l'est aussi. D'après le lemme 3.2.4, pour prouver qu'il est injectif, il suffit de montrer que $T_{\text{qst}}(\text{pr}) : T_{\text{qst}}(\mathcal{M}) \hookrightarrow T_{\text{qst}}(\mathcal{M}')$ est surjectif. Or, du fait que \mathcal{M} est T_{qst} -réduit, on a

$$\{x \in \mathcal{M}' / \forall h \in T_{\text{qst}}(\mathcal{M}), h(x) = 0\} = \ker \text{pr} \subset u\widehat{\mathcal{M}'}$$

la dernière inclusion se vérifiant aisément à la main (on pourra remarquer que pr induit une application surjective — et donc un isomorphisme — de $\mathcal{M}'/u\mathcal{M}'$ dans $\mathcal{M}/u\mathcal{M}$). Le corollaire 2.2.7 s'applique alors et termine la preuve. □

3.4. La structure de pylonet en termes d'objets réduits

Le théorème 2.3.3 montre que la catégorie $\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi,N}$ admet une structure riche. Le but de cette partie est de la comprendre en termes d'objets T_{st} -réduits, c'est-à-dire sous l'équivalence de catégories Réd_{st} . On commence par un lemme très simple qui nous sera utile à plusieurs reprises dans la suite.

LEMME 3.4.1. — *Soit $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ un morphisme dans la catégorie $'\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi}$ (resp. $'\text{Mod}_{/\widetilde{S}}^{\phi,N}$). On suppose que f est injectif et que \mathcal{M}' est T_{qst} -réduit (resp. T_{st} -réduit). Alors \mathcal{M} l'est aussi.*

Démonstration. — De la fonctorialité de Nil_{qst} (resp. Nil_{st}), on déduit que f envoie $\text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ sur $\text{Nil}_{\text{qst}}(\mathcal{M}') = 0$ (resp. $\text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M})$ sur $\text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M}') = 0$). Le lemme résulte alors de l'injectivité de f . □

Noyaux, images et conoyaux

Considérons $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ un morphisme dans $\text{Réd}_{/\widetilde{S}}^{\phi,N}$. D'après les axiomes **(Ax2)** et **(Ax2*)**, f admet un noyau et un conoyau dans $\text{Réd}_{/\widetilde{S}}^{\phi,N}$ que l'on

note respectivement \mathcal{K} et \mathcal{C} . Il résulte facilement des diverses propriétés d'adjonction démontrées précédemment et du lemme 3.4.1 que \mathcal{K} et \mathcal{C} se calculent explicitement comme suit :

$$(3.3) \quad \mathcal{K} = \text{Gen}(\ker f) \quad \text{et} \quad \mathcal{C} = \text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Fil}(\text{coker } f)$$

où $\ker f$ et $\text{coker } f$ sont respectivement le noyau et le conoyau de f au sens usuel. La formule pour le noyau est intéressante car elle ne fait plus intervenir à aucun moment les représentations galoisiennes ! Malheureusement, ce n'est pas le cas pour le conoyau puisque la formule que l'on obtient fait apparaître le foncteur Réd_{st} dans la définition duquel intervient de façon essentielle le foncteur T_{st} . Malgré tout, avec un peu de pratique, il ne semble pas très difficile d'avoir une intuition du résultat final et de le démontrer *a posteriori*. Dans tous les cas, si le calcul pose vraiment un problème, on a toujours comme recours l'utilisation de la dualité.

Il n'est sans doute finalement pas anodin de remarquer que l'on dispose également d'une formule — qui plus est très simple — pour le calcul de l'image (c'est-à-dire le noyau du conoyau) dans $\text{Réd}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ puisque celle-ci s'identifie à l'image usuelle.

La relation d'ordre

Soit T une \mathbb{F}_p -représentation galoisienne dans l'image essentielle de T_{st} . D'après le théorème 2.3.3, la fibre au-dessus de T (c'est-à-dire l'ensemble des $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ dont l'image par T_{st} est T) a une structure de treillis. Il se trouve que celle-ci se comprend très bien en termes d'objets T_{st} -réduits. En effet, il résulte du lemme 3.2.4 que tous les morphismes dans la catégorie fibre \mathcal{F}_T sont injectifs ; ainsi l'ordre que l'on cherche à décrire correspond simplement à l'inclusion naturelle sur les objets T_{st} -réduits. On a en outre un petit rabiot qui montre en un certain sens qu'il n'y a pas de « trous ».

PROPOSITION 3.4.2. — *Soient $\mathcal{M}' \subset \mathcal{M}''$ des objets de $\text{Réd}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$. On note ι l'inclusion de \mathcal{M}' dans \mathcal{M}'' et on suppose que $T_{\text{st}}(\iota)$ est un isomorphisme. Soit $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ tel que $\mathcal{M}' \subset \mathcal{M} \subset \mathcal{M}''$. Alors $\mathcal{M} \in \text{Réd}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ et les deux flèches déduites par functorialité :*

$$T_{\text{st}}(\mathcal{M}'') \rightarrow T_{\text{st}}(\mathcal{M}) \rightarrow T_{\text{st}}(\mathcal{M}')$$

sont des isomorphismes.

Démonstration. — Soit d la dimension sur \mathbb{F}_p de $T = T_{\text{st}}(\mathcal{M}')$; c'est aussi le rang de $\text{Mod}_{\text{qst}}(\mathcal{M}')$, d'où on déduit que \mathcal{M}' est engendré par au plus d

éléments. Comme par hypothèse $T_{\text{st}}(\mathcal{M}') \simeq T_{\text{st}}(\mathcal{M}'')$, la même conclusion vaut par \mathcal{M}'' . Étant donné que \tilde{S} est un anneau principal (non intègre), on en déduit que \mathcal{M} est lui aussi engendré par au plus d éléments. En particulier, il est de type fini. D'autre part, le lemme 3.4.1 entraîne que \mathcal{M} est T_{st} -réduit. Ainsi, \mathcal{M} est bien un objet de $\text{Réd}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$.

La composée des morphismes $T_{\text{st}}(\mathcal{M}'') \rightarrow T_{\text{st}}(\mathcal{M}) \rightarrow T_{\text{st}}(\mathcal{M}')$ est bijective car elle s'identifie à $T_{\text{st}}(\iota)$. Par ailleurs, la dimension (sur \mathbb{F}_p) de $T_{\text{st}}(\mathcal{M})$ est égale au rang de $\text{Mod}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ et donc majorée par d . La proposition en résulte. \square

Forts de ces résultats, il devient possible de décrire le calcul des bornes supérieures et inférieures dans la fibre F_T . Donnons-nous pour cela $\mathcal{M} \in \text{Réd}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ un objet maximal et posons $T = T_{\text{st}}(\mathcal{M})$. Soient également \mathcal{M}_1 et \mathcal{M}_2 deux objets de $\text{Réd}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ dont l'image par T_{st} s'identifie à T . D'après la définition des objets maximaux et le lemme 3.2.4, \mathcal{M}_1 et \mathcal{M}_2 apparaissent comme des sous-objets de \mathcal{M} . Dans ces conditions, la borne supérieure de \mathcal{M}_1 et \mathcal{M}_2 s'identifie à leur somme dans \mathcal{M} tandis que leur borne inférieure est $\text{Gen}(\mathcal{M}_1 \cap \mathcal{M}_2)$. (La vérification est immédiate et laissée au lecteur.) On notera que ceci vaut encore pour n'importe quelle famille $(\mathcal{M}_i)_{i \in I}$ par nécessairement finie.

3.5. Une formule de réciprocité

Nous avons vu que la restriction de T_{st} à $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ est pleinement fidèle. Ainsi, étant donnée une représentation T dans l'image essentielle de T_{st} , il y a un unique objet de $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ qui lui correspond. Nous montrons ci-après qu'il est possible de retrouver cet objet par une formule explicite.

Le foncteur M_{st}

Soit T une \mathbb{F}_p -représentation de G_K . Le \tilde{S} -module $\text{Hom}_{\mathbb{F}_p[G_K]}(T, \hat{A})$ hérite des structures supplémentaires de \hat{A} , ce qui en fait un objet de la catégorie $'\text{Fil}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. L'association

$$T \mapsto M_{\text{st}}(T) = \text{Gen}(\text{Hom}_{\mathbb{F}_p[G_K]}(T, \hat{A}))$$

définit un foncteur contravariant $M_{\text{st}}: \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K) \rightarrow '\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. Pour $\mathcal{M} \in '\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ et $T \in \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$, on dispose en outre d'applications de bidualité

$$\alpha_{\text{st}}(\mathcal{M}): \mathcal{M} \rightarrow M_{\text{st}} \circ T_{\text{st}}(\mathcal{M}) \quad \text{et} \quad \beta_{\text{st}}(T): T \rightarrow T_{\text{st}} \circ M_{\text{st}}(T)$$

qui sont des morphismes respectivement dans $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ et $\text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$. De plus, en déroulant les définitions, on obtient $\ker \alpha_{\text{st}}(\mathcal{M}) = \text{Nil}_{\text{st}}(\mathcal{M})$, tandis qu'une vérification simple montre que $T_{\text{st}}(\alpha_{\text{st}}(\mathcal{M})) \circ \beta_{\text{st}}(T_{\text{st}}(\mathcal{M})) = \text{id}_{T_{\text{st}}(\mathcal{M})}$ et donc que $T_{\text{st}}(\mathcal{M})$ apparaît (via $\beta_{\text{st}}(T_{\text{st}}(\mathcal{M}))$) comme un facteur direct de $T_{\text{st}} \circ M_{\text{st}} \circ T_{\text{st}}(\mathcal{M})$.

LEMME 3.5.1. — Soit \mathcal{M} un objet de $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$. Posons $T = T_{\text{st}}(\mathcal{M})$ et $\mathcal{M}' = M_{\text{st}}(T)$. Alors :

$$\{x \in \mathcal{M}' / \forall h \in T, \beta_{\text{st}}(T)(h)(x) = 0\}$$

est réduit à 0.

Démonstration. — C'est évident après avoir remarqué que les $x \in \mathcal{M}'$ sont des morphismes (G_K -équivariants) de T dans \hat{A} et que $\beta_{\text{st}}(T)(h)(x)$ n'est rien d'autre que $x(h)$. □

COROLLAIRE 3.5.2. — Soit $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$. Alors $M_{\text{st}} \circ T_{\text{st}}(\mathcal{M})$ est T_{st} -réduit.

PROPOSITION 3.5.3. — Soit T une \mathbb{F}_p -représentation de dimension finie de G_K . Alors $M_{\text{st}}(T)$ est un \tilde{S} -module de type fini.

Démonstration. — Soit L une extension finie de K dont le groupe de Galois absolu, noté G_L , agit trivialement sur T . Quitte à agrandir L , on peut supposer $\pi_1 \in L$. Les morphismes G_K -équivariants de T dans \hat{A} prennent alors leurs valeurs dans \hat{A}^{G_L} , d'où on déduit

$$M_{\text{st}}(T) = \text{Gen}(\text{Hom}_{\mathbb{F}_p[G_K]}(T, \hat{A}^{G_L})).$$

Une induction transfinie à partir de la définition de Gen montre directement l'inclusion

$$M_{\text{st}}(T) \subset \text{Hom}_{\mathbb{F}_p[G_K]}(T, \text{Gen}(\hat{A}^{G_L})).$$

Ainsi, puisque \tilde{S} est noethérien, il suffit pour conclure de montrer que $\text{Gen}(\hat{A}^{G_L})$ est de type fini sur \tilde{S} . Nous allons en fait montrer que $\text{Gen}_1(\hat{A}^{G_L})$ est déjà de type fini sur \tilde{S} . Soit $a = a_0 + a_1X + \dots + a_n \frac{X^n}{n!} \in \hat{A}^{G_L} \cap \text{Fil}^r \hat{A}$. Ici, donc, les a_i sont a priori des éléments de $\text{Fil}^{r-i} \hat{A}_0$. Étant donné que G_L n'agit pas sur X (on rappelle que l'on a supposé $\pi_1 \in L$), le fait que $a \in \hat{A}^{G_L}$ implique que chacun des a_i est lui-même fixe par G_L . Soit L_1 une extension de L obtenue en ajoutant une racine p -ième d'une uniformisante de L , et soit v_p la valuation p -adique sur \bar{K} normalisée par $v_p(p) = 1$. D'après le théorème 1.7 de [22], on peut écrire $a_i = b_i + c_i$ avec $b_i \in \mathcal{O}_{L_1}/p$

et $v_p(c_i) \geq 1 - \frac{1}{p(p-1)}$. La dernière condition sur la valuation montre que c_i (et donc aussi b_i) est dans $\text{Fil}^{r-i} \widehat{A}_0$ et que $\phi_{r-i}(c_i) = 0$. Ainsi trouve-t-on

$$\phi_r(a) = \phi_r(b_0) + \phi_{r-1}(b_1)Y + \cdots + \phi_1(b_{r-1})\frac{Y^{r-1}}{(r-1)!} + \phi(b_r)\frac{Y^r}{r!}$$

où on rappelle que $Y = \frac{(1+X)^p - 1}{p}$. On en déduit que $\text{Gen}_1(\widehat{A}^{GL})$ est inclus dans le \widetilde{S} -module engendré par les éléments de la forme $\phi_{r-i}(b)Y^i$ pour $b \in \mathcal{O}_{L_1}/p$ et $0 \leq i \leq r$. Comme \mathcal{O}_{L_1}/p est de type fini sur \mathcal{O}_K/p (puisque L_1 est une extension finie de K), on a bien montré que $\text{Gen}_1(\widehat{A}^{GL})$ est de type fini sur \widetilde{S} . □

La composée $M_{\text{st}} \circ T_{\text{st}}$

Le corollaire 3.5.2 combiné à la proposition 3.5.3 montre que la composée $M_{\text{st}} \circ T_{\text{st}}$ définit un foncteur de $\text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi_i, N}$ dans $\text{Réd}_{\widetilde{S}}^{\phi_i, N}$.

THÉORÈME 3.5.4. — *Pour tout $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi_i, N}$, le morphisme*

$$\alpha_{\text{st}}(\text{Max}(\mathcal{M})) : \text{Max}(\mathcal{M}) \rightarrow M_{\text{st}} \circ T_{\text{st}}(\text{Max}(\mathcal{M})) \simeq M_{\text{st}} \circ T_{\text{st}}(\mathcal{M})$$

est surjectif.

Démonstration. — Quitte à remplacer \mathcal{M} par $\text{Max}(\mathcal{M})$, on peut bien sûr supposer que \mathcal{M} est maximal. Notons $T = T_{\text{st}}(\mathcal{M})$, $\mathcal{M}' = M_{\text{st}}(T)$, $T' = T_{\text{st}}(\mathcal{M}')$ et $f : \text{Réd}_{\text{st}}(\mathcal{M}) \hookrightarrow \mathcal{M}'$ le morphisme (injectif) induit par $\alpha_{\text{st}}(\mathcal{M})$. Il s'agit de montrer que f est un isomorphisme.

On a vu que T apparaît via $\beta_{\text{st}}(T)$ comme une sous-représentation (et même un facteur direct) de T' . Par ailleurs, le lemme 3.5.1 donne :

$$\begin{aligned} & \{x \in \text{Mod}_{\text{st}}(\mathcal{M}') / \forall h \in T, h(x) = 0\} \\ & = \text{Nil}_{\text{st}}(\text{Mod}_{\text{st}}(\mathcal{M}')) \subset u\text{Mod}_{\text{st}}(\mathcal{M}') \end{aligned}$$

la dernière inclusion provenant du lemme 3.3.5. Le corollaire 2.2.7 entraîne $T = T'$, i.e. $T_{\text{st}}(f)$ est un isomorphisme. Étant donné que \mathcal{M} est maximal, ceci implique l'existence d'un morphisme $g : \mathcal{M}' \rightarrow \text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})$ tel que $g \circ f = \text{id}_{\text{Réd}_{\text{qst}}(\mathcal{M})}$. Par le lemme 3.2.4, g est injectif. Il s'ensuit, comme annoncé, que f est un isomorphisme. □

COROLLAIRE 3.5.5. — *Soient \mathcal{M} un objet de $\text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi_i, N}$ et $T = T_{\text{st}}(\mathcal{M})$. On a un isomorphisme canonique et fonctoriel $\text{Max}(\mathcal{M}) \simeq \text{Mod}_{\text{st}} \circ M_{\text{st}}(T)$.*

Démonstration. — En vertu du théorème précédent, l'isomorphisme est donné par $\text{Mod}_{\text{st}}(\alpha_{\text{st}}(\text{Max}(\mathcal{M})))$. □

Combinant ce corollaire avec le résultat principal de [12], on obtient le résultat suivant.

COROLLAIRE 3.5.6. — *On suppose $er < p - 1$. Soit X un schéma propre et lisse sur K admettant un modèle semi-stable⁽⁸⁾ \mathcal{X} sur \mathcal{O}_K . Alors*

$$H^r((X_n/\tilde{S})_{\text{log-cris}}, \mathcal{O}_{X_n/\tilde{S}}) = \text{Mod}_{\text{st}} \circ M_{\text{st}}(H^r_{\text{ét}}(X_{\bar{K}}, \mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^\vee(r))$$

où $X_{\bar{K}} = X \times_K \bar{K}$, où « \vee » désigne la représentation duale et « (r) » le twist de Tate.

Remarque. — Un des intérêts du corollaire 3.5.5 est de pouvoir relever facilement au niveau de $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$ des applications vivant *a priori* sur les représentations galoisiennes. Par exemple, voici comment on peut l'utiliser pour donner une seconde preuve de la pleine fidélité de $T_{\text{st}} : \text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N} \rightarrow \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$. Soient \mathcal{M} et \mathcal{M}' dans $\text{Max}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}$. Posons $T = T_{\text{st}}(\mathcal{M})$ et $T' = T_{\text{st}}(\mathcal{M}')$. D'après le théorème 3.3.1 et le corollaire 3.5.5, la composée :

$$\begin{aligned} \text{Hom}_{\text{Mod}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}}(\mathcal{M}, \mathcal{M}') &\xrightarrow{v} \text{Hom}_{\mathbb{F}_p[G_K]}(T', T) \\ &\xrightarrow{w} \text{Hom}_{\text{Réd}_{/\tilde{S}}^{\phi, N}}(M_{\text{st}}(T), M_{\text{st}}(T')) \end{aligned}$$

est un isomorphisme. On veut montrer que v est un isomorphisme, et pour cela il suffit de justifier que w est injective. Or, tout $f \in \ker w$ s'insère dans le diagramme commutatif suivant :

$$\begin{array}{ccc} T' & \xrightarrow{\beta_{\text{st}}(T')} & T_{\text{st}} \circ M_{\text{st}}(T') \\ f \downarrow & & \downarrow 0 \\ T & \xrightarrow{\beta_{\text{st}}(T)} & T_{\text{st}} \circ M_{\text{st}}(T) \end{array}$$

à partir duquel on déduit directement que $f = 0$ en utilisant l'injectivité de $\beta_{\text{st}}(T)$ (on rappelle que ce dernier morphisme admet $T_{\text{st}}(\alpha_{\text{st}}(\mathcal{M}))$ pour rétraction).

Pour certaines applications même, le corollaire 3.5.5 peut s'appliquer alors que la pleine fidélité ne sera *a priori* d'aucun secours. C'est typiquement ce qui se passe lorsque l'on souhaite relever des applications qui ne sont linéaires (mais par exemple semi-linéaires), ou que l'on s'intéresse à

⁽⁸⁾ Cela signifie que la fibre spéciale de \mathcal{X} définit un diviseur à croisements normaux dans \mathcal{X} .

des représentations dans des espaces vectoriels munis de structures supplémentaires (par exemple une forme quadratique ou symplectique). Nous verrons une application de cela en 4.2.

4. Compléments

4.1. Variante avec coefficients

Dans la pratique, il arrive souvent que l'on ait besoin d'étudier les représentations semi-stables, non pas à coefficients dans \mathbb{F}_p mais dans une extension finie⁽⁹⁾ E de \mathbb{F}_p . Une telle représentation V peut également être vue comme une \mathbb{F}_p -représentation munie d'un morphisme d'anneaux $E \rightarrow \text{End}_{\mathbb{F}_p[G_K]}(V)$. On est donc amené à considérer la catégorie $\text{Mod}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N}$ dont les objets sont les couples (\mathcal{M}, ν) où $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ et $\nu: E \rightarrow \text{End}_{\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}}(\mathcal{M})$ est un morphisme d'anneaux. Bien sûr, la notation est justifiée par le fait que la donnée de ν équivaut à celle d'une structure de E -espace vectoriel — et donc de $(\tilde{S} \otimes_{\mathbb{F}_p} E)$ -module⁽¹⁰⁾ — sur \mathcal{M} . Toutefois, pour ce que nous voulons faire ici, la première description que nous avons donnée sera plus adaptée.

On dispose bien entendu d'un foncteur oubli $\text{Oub}_E: \text{Mod}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N} \rightarrow \text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$, $(\mathcal{M}, \nu) \mapsto \mathcal{M}$. Il est fidèle et conservatif. Par ailleurs, le foncteur T_{st} se prolonge en $T_{\text{st}, E}: \text{Mod}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N} \rightarrow \text{Rep}_E(G_K)$ obtenu simplement en faisant agir E sur $T_{\text{st}}(\mathcal{M})$ via $\lambda \cdot x = T_{\text{st}}(\nu(\lambda))(x)$.

THÉOREME 4.1.1. — *La fibration $T_{\text{st}, E}$ est un pylonet (contravariant) additif et autodual. En outre, si $(\mathcal{M}, \nu) \in \text{Mod}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N}$, on a :*

$\text{Max}(\mathcal{M}, \nu) = (\text{Max}(\mathcal{M}), \text{Max}(\nu))$ et $\text{Min}(\mathcal{M}, \nu) = (\text{Min}(\mathcal{M}), \text{Min}(\nu))$
 où $\text{Max}(\nu): E \rightarrow \text{End}_{\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}}(\text{Max}(\mathcal{M}))$, $\lambda \mapsto \text{Max}(\nu(\lambda))$ (et de même pour $\text{Min}(\nu)$).

Démonstration. — Le premier point ne pose aucune difficulté particulière : on peut par exemple reprendre la démonstration de la section 2 en

⁽⁹⁾ Étant donné que l'on ne s'intéresse qu'à des représentations de dimension finie, il est toujours possible de faire cette hypothèse.

⁽¹⁰⁾ On prendra garde au fait que le Frobenius sur $\tilde{S} \otimes_{\mathbb{F}_p} E$ est bien l'élévation à la puissance p sur \tilde{S} , mais l'identité sur E !

ajoutant l'action de E à chaque étape, ce que nous laissons au lecteur. Pour la seconde assertion, on remarque d'abord que $T_{\text{st},E}(\text{Max}(\mathcal{M}), \text{Max}(\nu)) \simeq T_{\text{st},E}(\mathcal{M}, \nu)$. Ainsi, par définition des objets maximaux, on a un morphisme canonique $f : (\text{Max}(\mathcal{M}), \text{Max}(\nu)) \rightarrow \text{Max}(\mathcal{M}, \nu)$ dans la catégorie $\text{Mod}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N}$. Le morphisme $\text{Oub}_E(f)$ s'envoie sur un isomorphisme par T_{st} et a pour source un objet maximal (de $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$). On en déduit que c'est un isomorphisme, et puis que c'est aussi le cas de f en utilisant la conservativité de Oub_E . Le cas des objets minimaux se traite pareillement. \square

Comme pour $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$, on note $\text{Max}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N} = \text{Max}(\text{Mod}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N})$ et $\text{Min}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N} = \text{Min}(\text{Mod}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N})$.

THÉOREME 4.1.2. — *La restriction de $T_{\text{st},E}$ à $\text{Max}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N}$ (resp. $\text{Min}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N}$) est pleinement fidèle et son image essentielle est stable par sous-objets et quotients.*

Démonstration. — La pleine fidélité est une conséquence directe du théorème 2.4.1 et de la formule $\text{Max}(\mathcal{M}, \nu) = (\text{Max}(\mathcal{M}), \text{Max}(\nu))$ (resp. $\text{Min}(\mathcal{M}, \nu) = (\text{Min}(\mathcal{M}), \text{Min}(\nu))$). La stabilité découle du résultat analogue pour $\text{Mod}_{\tilde{S}}^{\phi, N}$ et de la pleine fidélité puisque cette dernière permet de relever l'action de E . \square

4.2. Passage à une extension finie, donnée de descente

Dans ce paragraphe, on cherche à comprendre comment les catégories précédentes (et les représentations qu'elles produisent) se comportent lorsqu'on change le corps K . Pour cela, on fixe L une extension finie de K dont on note \mathcal{O}_L l'anneau des entiers, ℓ le corps résiduel et G_L le groupe de Galois absolu. On note L_0 la plus grande extension non ramifiée (sur \mathbb{Q}_p) contenue dans L ; elle s'identifie à $W(\ell)[1/p]$. Soit $e_L = [L : L_0]$.

À cette situation, il est attaché de nouvelles catégories de modules définis sur l'anneau $\tilde{S}_L = \ell[u]/u^{e_L p}$. Afin d'éviter les confusions, nous indiquerons dans la suite, les constantes, les catégories et les foncteurs par les lettres K ou L selon qu'elles se réfèrent au corps K ou L ; par exemple, nous noterons e_K et e_L , π_K et π_L pour les uniformisantes choisies, $\text{Mod}_{\tilde{S}_K}^{\phi, N}$ et $\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi, N}$, ou encore $T_{K\text{-st}}$ et $T_{L\text{-st}}$ (pour ne pas confondre avec $T_{\text{st},E}$).

Cas d'une extension non ramifiée

On suppose d'abord que L/K est non ramifiée. L'uniformisante $\pi \in \mathcal{O}_K$ reste une uniformisante de L dont le polynôme minimal sur L_0 est encore $E(u)$. On a donc $e_K = e_L$ et on note à nouveau e cette valeur commune. L'extension des scalaires de k à ℓ définit un foncteur fidèle $\text{Mod}_{\tilde{S}_K}^{\phi, N} \rightarrow \text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi, N}$ et on vérifie directement que pour $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{\tilde{S}_K}^{\phi, N}$, la flèche naturelle $T_{K\text{-st}}(\mathcal{M}) \rightarrow T_{L\text{-st}}(\mathcal{M} \otimes_k \ell)$ est un isomorphisme G_L -équivalent.

PROPOSITION 4.2.1. — *On se donne L une extension non ramifiée de K . Soit E une extension finie de \mathbb{F}_p . Soit T une E -représentation de G_K . On suppose que la restriction de T à G_L est dans $T_{L\text{-st}}(\text{Mod}_{\tilde{S}_L \otimes E}^{\phi, N})$. Alors T est dans $T_{K\text{-st}}(\text{Mod}_{\tilde{S}_K \otimes E}^{\phi, N})$.*

Démonstration. — Par les propriétés de pleine fidélité, on se ramène facilement au cas « sans coefficients ». La clôture galoisienne M de L est encore une extension non ramifiée de K et la restriction de T à G_M provient d'un objet de $\text{Mod}_{\tilde{S}_M \otimes E}^{\phi, N}$; on peut donc supposer que L/K est galoisienne. Soit \mathcal{M}_L l'objet de $\text{Max}_{\tilde{S}_L}^{\phi, N}$ associé à $T|_{G_L}$. On a une action naturelle de G_K sur $M_{L\text{-st}}(T)$ donnée par $(\sigma f)(x) = \sigma f(\sigma^{-1}x)$, qui se factorise à travers $\text{Gal}(L/K) \simeq \text{Gal}(\ell/k)$ puisque les $f \in M_{L\text{-st}}(T)$ sont par définition G_L -équivalents. Par ailleurs, le corollaire 3.5.5 assure que $\mathcal{M}_L = \text{Mod}_{\text{st}}(M_{L\text{-st}}(T))$. Ceci permet de remonter l'action de $\text{Gal}(\ell/k)$ à \mathcal{M}_L . De la nullité de $H^1(\text{Gal}(\ell/k), \text{GL}_{\text{erd}}(\ell))$ (où d est la dimension de T), on déduit $\mathcal{M}_L^{\text{Gal}(\ell/k)} \otimes_k \ell \simeq \mathcal{M}_L$. On pose alors $\mathcal{M}_K = \mathcal{M}_L^{\text{Gal}(\ell/k)}$ et on vérifie à la main que l'isomorphisme $T_{K\text{-st}}(\mathcal{M}_K) \simeq T_{L\text{-st}}(\mathcal{M}_L) = T$ est G_K -équivalent. □

Cas d'une extension modérément ramifiée

On suppose maintenant que l'extension L/K est totalement et modérément ramifiée. Notons n son degré; il est premier avec p , et on fixe un entier m tel que $mn \equiv 1 \pmod{p}$. On suppose de surcroît que K contient toutes les racines n -ièmes de l'unité⁽¹¹⁾. Si π_K une uniformisante de \mathcal{O}_K , le lemme de Hensel assure que L s'obtient en ajoutant à K une racine n -ième

⁽¹¹⁾ Quitte à remplacer K par une extension non ramifiée, cette hypothèse est toujours satisfaite. Par ailleurs, comme cela a été expliqué précédemment, le passage à une extension non ramifiée ne pose pas réellement problème.

de π_K . Cette racine n -ième est en outre une uniformisante de L , et c'est elle que nous choisissons pour π_L . L'extension L/K est galoisienne et son groupe de Galois $\text{Gal}(L/K)$ s'identifie au groupe des racines n -ièmes de l'unité par l'application $\sigma \mapsto \frac{\sigma(\pi_L)}{\pi_L}$. Soit encore $\pi_{1,L}$ une racine p -ième de π_L . On pose $\pi_{1,K} = \pi_{1,L}^n$; c'est bien une racine p -ième de π_K .

Nous notons u_K (resp. u_L) la variable intervenant dans les polynômes éléments de \tilde{S}_K (resp. \tilde{S}_L) et $\hat{A}_K = \hat{A}_0 \langle X_K \rangle$ (resp. $\hat{A}_L = \hat{A}_0 \langle X_L \rangle$) l'anneau de périodes associé. On dispose d'une inclusion $\tilde{S}_K \hookrightarrow \tilde{S}_L$, $u_K \mapsto u_L^n$ qui fait de \tilde{S}_L un \tilde{S}_K -module libre de rang n . On a également une flèche $\psi_{K,L}: \hat{A}_K \rightarrow \hat{A}_L$ défini comme l'unique application \hat{A}_0 -linéaire envoyant $\gamma_i(X_K)$ sur $\gamma_i((1 + X_L)^n - 1)$ pour tout $i \geq 0$; c'est un isomorphisme d'anneaux G_L -équivariant d'inverse $\psi_{L,K}$ défini comme l'unique application \hat{A}_0 -linéaire envoyant $\gamma_i(X_L)$ sur $\gamma_i((1 + X_K)^m - 1)$ pour tout $i \geq 0$. Le diagramme suivant est commutatif :

$$\begin{array}{ccc}
 \tilde{S}_K & \xrightarrow{u_K \mapsto \frac{\pi_{1,K}}{1+X_K}} & \hat{A}_K \\
 u_K \mapsto u_L^n \downarrow & & \psi_{L,K} \updownarrow \psi_{K,L} \\
 \tilde{S}_L & \xrightarrow{u_L \mapsto \frac{\pi_{1,L}}{1+X_L}} & \hat{A}_L
 \end{array}$$

L'extension des scalaires de \tilde{S}_K à \tilde{S}_L définit de façon évidente un foncteur exact et fidèle $\text{Mod}_{\tilde{S}_K}^{\phi,N} \rightarrow \text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi,N}$.

PROPOSITION 4.2.2. — Soit $\mathcal{M}_K \in \text{Mod}_{\tilde{S}_K}^{\phi,N}$. Alors le morphisme

$$T_{K\text{-st}}(\mathcal{M}_K) \rightarrow T_{L\text{-st}}(\mathcal{M}_K \otimes_{\tilde{S}_K} \tilde{S}_L), \quad f \mapsto (\psi_{K,L} \circ f) \otimes_{\tilde{S}_K} \tilde{S}_L$$

est un isomorphisme G_L -équivariant.

Démonstration. — On vérifie directement la G_L -équivariance et l'injectivité du morphisme de la proposition. La surjectivité résulte alors de ce que les espaces de départ et d'arrivée sont des \mathbb{F}_p -espaces vectoriels de même dimension (en l'occurrence le rang de \mathcal{M}_K sur \tilde{S}_K). □

Nous souhaitons à présent décrire les représentations de G_K dont la restriction à G_L provient d'un objet de $\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi,N}$. Pour cela, on a besoin au préalable d'étendre l'action galoisienne sur \hat{A}_L à tout G_K . Ceci se fait tout simplement en utilisant l'isomorphisme $\psi_{L,K}$ (qui est déjà, rappelons-le, G_L -équivariant). De façon concrète, G_K agit de façon habituelle sur \hat{A}_0 et

sur X_L par la formule

$$\sigma X_L = \left(\frac{\sigma \pi_{1,K}}{\pi_{1,K}} \right)^m (1 + X_L) - 1$$

valable pour tout $\sigma \in G_K$. En particulier, l'action de G_K sur $\frac{\pi_{1,L}}{1+X_L}$ n'est pas triviale, mais se fait via le caractère $\omega: \text{Gal}(L/K) \rightarrow k^*$ défini par

$$\omega(\bar{\sigma}) = \left(\frac{\sigma \pi_{1,L}}{\pi_{1,L}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma \pi_{1,K}}{\pi_{1,K}} \right)^{-m} = \left(\frac{\sigma \pi_{1,L}}{\pi_{1,L}} \right)^{1-nm}$$

où $\sigma \in G_K$ relève $\bar{\sigma}$. La formule précédente a bien un sens car, d'une part, la valeur du membre de droite ne dépend pas du relevé choisi, et d'autre part, par définition de m , l'exposant $1 - nm$ est multiple de p , ce qui assure que ω prend ses valeurs dans le groupe des racines n -ièmes de l'unité de \bar{K} qui sont par hypothèse toutes dans \mathcal{O}_K^* (et que l'on identifie ensuite aux racines n -ièmes de l'unité de k^* grâce au lemme de Hensel). Ceci nous conduit à définir une action de $\text{Gal}(L/K)$ sur \tilde{S}_L en décrétant qu'il agit trivialement sur k et par l'intermédiaire de ω sur u_L . Le morphisme habituel $\tilde{S}_L \rightarrow \hat{A}_L$, $u_L \mapsto \frac{\pi_{1,L}}{1+X_L}$ est alors G_K -équivariant.

DÉFINITION 4.2.3. — Soit \mathcal{M}_L un objet de $\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi,N}$. Une donnée de descente (de L à K) sur \mathcal{M}_L est une action semi-linéaire de $\text{Gal}(L/K)$ sur \mathcal{M}_L respectant $\text{Fil}^r \mathcal{M}_L$ et commutant à ϕ_r et N .

On note $\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi,N,\text{dd}}$ la catégorie dont les objets sont la donnée de $\mathcal{M}_L \in \text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi,N}$ et d'une donnée de descente sur \mathcal{M}_L .

La catégorie $\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi,N,\text{dd}}$ est additive et équipée d'une dualité obtenue en définissant sur $\mathcal{M}_L^\vee = \text{Hom}_{\tilde{S}_L}(\mathcal{M}_L, \tilde{S}_L)$ une action de $\text{Gal}(L/K)$ par la formule $(\sigma f)(x) = \sigma f(\sigma^{-1}x)$ (pour $\sigma \in \text{Gal}(L/K)$, $f \in \mathcal{M}_L^\vee$ et $x \in \mathcal{M}_L$). En outre, si $\mathcal{M}_L \in \text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi,N,\text{dd}}$, la G_L -représentation $T_{L\text{-st}}(\mathcal{M}_L) = \text{Hom}_{\text{Fil}_{\tilde{S}_L}^{\phi,N}}(\mathcal{M}_L, \hat{A}_L)$ se prolonge naturellement à G_K par la même formule que précédemment : $\sigma f(x) = \sigma f(\bar{\sigma}^{-1}x)$ où $\bar{\sigma}$ est l'image de σ dans $\text{Gal}(L/K)$. On définit comme ceci un foncteur exact et fidèle $\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi,N,\text{dd}} \rightarrow \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$ noté encore $T_{L\text{-st}}$.

THÉOREME 4.2.4. — Le foncteur $T_{L\text{-st}}: \text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi,N,\text{dd}} \rightarrow \text{Rep}_{\mathbb{F}_p}(G_K)$ est un pylonet additif et autodual. En outre, si \mathcal{M}_L est un objet de $\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi,N,\text{dd}}$, l'action de $\text{Gal}(L/K)$ s'étend à $\text{Max}(\mathcal{M}_L)$ (resp. $\text{Min}(\mathcal{M}_L)$) calculé dans

$\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi, N}$ et en fait un objet de $\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi, N, \text{dd}}$ qui s'identifie à $\text{Max}(\mathcal{M}_L)$ (resp. $\text{Min}(\mathcal{M}_L)$) calculé dans $\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi, N, \text{dd}}$.

De plus, les restrictions de $T_{L\text{-st}}$ à $\text{Max}(\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi, N, \text{dd}})$ et $\text{Min}(\text{Mod}_{\tilde{S}_L}^{\phi, N, \text{dd}})$ sont exactes et pleinement fidèles, et leur image essentielle est stable par sous-objets et quotients.

Démonstration. — Elle est semblable à celle des théorèmes 4.1.1 et 4.1.2. □

Remarque. — Bien entendu, on peut aussi fabriquer des catégories en administrant simultanément des données de descente et l'action de coefficients. Le théorème précédent se généralise directement à cette situation composite.

4.3. Quotients de réseaux

Nous nous intéressons ici aux E -représentations qui peuvent s'écrire comme un quotient (annulé par p) de deux réseaux dans une $W(E)[1/p]$ -représentation semi-stable dont les poids de Hodge-Tate sont dans $\{0, \dots, r\}$. Pour expliquer le lien avec la théorie que nous avons développée dans les pages précédentes, nous avons besoin dans un premier temps d'introduire la notion de *module fortement divisible* due à Breuil.

Soit S le complété p -adique de l'enveloppe à puissances divisées (compatibles aux puissances divisées canoniques sur p) de $W[u]$ par rapport au noyau de $s: W[u] \rightarrow \mathcal{O}_K, u \mapsto \pi$. Il est muni :

- d'une filtration $\text{Fil}^i S$ définie comme le complété p -adique de la filtration donnée par les puissances divisées ;
- d'un Frobenius $\phi: S \rightarrow S$ défini comme l'unique morphisme d'anneaux, continu pour la topologie p -adique, qui agit sur K_0 comme le Frobenius et qui envoie u sur u^p ;
- d'un opérateur de monodromie $N: S \rightarrow S$ défini comme l'unique application continue W -linéaire qui envoie u^n sur $-nu^n$.

Pour $i < p - 1$ (et, donc, en particulier pour $i = r$), on a $\phi(\text{Fil}^i S) \subset p^i S$, ce qui permet de définir l'application $\phi_i = \frac{\phi}{p^i}: \text{Fil}^i S \rightarrow S$. On remarque que le polynôme minimal de π sur K_0 , traditionnellement noté $E(u)$, est un polynôme d'Eisenstein d'où on déduit que $\phi_1(E(u))$ est une unité de S . On dispose en outre d'un morphisme évident $S \rightarrow \tilde{S}, u \mapsto u, \gamma_i(u^e) \mapsto 0$ pour $i \geq p$. Il permet de voir \tilde{S} comme une S -algèbre et se factorise par $S_1 = S/pS$. Un module fortement divisible est alors la donnée des points suivants :

- 1. un S -module libre de rang fini $\widehat{\mathcal{M}}$;
- 2. un sous-module $\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}} \subset \widehat{\mathcal{M}}$ contenant $\text{Fil}^r S \widehat{\mathcal{M}}$;
- 3. un opérateur ϕ -semi-linéaire $\phi_r: \text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \widehat{\mathcal{M}}$ vérifiant

$$(\forall s \in \text{Fil}^r S) (\forall x \in \widehat{\mathcal{M}}) \quad \phi_r(sx) = \phi_r(s) \cdot \frac{\phi_r(E(u)^r x)}{\phi_1(E(u))^r}$$

et dont l'image engendre \mathcal{M} ;

- 4. un opérateur $N: \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \widehat{\mathcal{M}}$ vérifiant :
 - (condition de Leibniz) $N(sx) = sN(x) + N(s)x$ pour tout $x \in \widehat{\mathcal{M}}$ et $s \in S$;
 - (transversalité de Griffith) $E(u)N(\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}}) \subset \text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}}$;
 - le diagramme suivant est commutatif :

$$(4.1) \quad \begin{array}{ccc} \text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}} & \xrightarrow{\phi_r} & \widehat{\mathcal{M}} \\ E(u)N \downarrow & & \downarrow \phi_1(E(u))N \\ \text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}} & \xrightarrow{\phi_r} & \widehat{\mathcal{M}} \end{array}$$

On note $\text{Mod}_{/S}^{\phi,N}$ la catégorie des modules fortement divisibles, les morphismes étant naturellement les applications S -linéaires commutant aux structures supplémentaires. On définit de même la catégorie $\text{Mod}_{/S_1}^{\phi,N}$ en remplaçant partout S par $S_1 = S/pS$. Une adaptation immédiate de la proposition 2.2.2.1 de [3] montre que le fonction $T: \mathcal{M} \mapsto \mathcal{M} \otimes_{S_1} \widetilde{S}$ donne naissance à une équivalence de catégories entre $\text{Mod}_{/S_1}^{\phi,N}$ et $\text{Mod}_{/S}^{\phi,N}$ dont un quasi-inverse est donné par la formule

$$T^{-1}(\mathcal{M}) = S_1 \otimes_{(\phi),k[u]/u^e} \frac{\text{Fil}^r \mathcal{M}}{u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}}.$$

D'autre part, on dispose d'un foncteur $\widehat{T}_{\text{st}}: \text{Mod}_{/S}^{\phi,N} \rightarrow \text{Rep}_{\mathbb{Z}_p}(G_K)$ dont la définition est analogue à celle de T_{st} mais fait intervenir un anneau de période plus compliqué que nous ne souhaitons pas décrire ici. Quoi qu'il en soit, dans [24], Liu a montré que \widehat{T}_{st} induit une anti-équivalence entre $\text{Mod}_{/S}^{\phi,N}$ et la catégorie des réseaux dans les représentations semi-stables à poids de Hodge-Tate compris entre 0 et r . Finalement, on montre qu'un morphisme surjectif $\widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \mathcal{M}$ (avec $\widehat{\mathcal{M}} \in \text{Mod}_{/S}^{\phi,N}$ et $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{/S_1}^{\phi,N}$) induit une surjection $\widehat{T}_{\text{st}}(\widehat{\mathcal{M}}) \rightarrow T_{\text{st}} \circ T(\mathcal{M})$ et donc fait apparaître $T_{\text{st}} \circ T(\mathcal{M})$ comme un quotient d'un réseau dans une représentation semi-stable.

LEMME 4.3.1. — Soient $\widehat{\mathcal{M}} \in \text{Mod}_{/S}^{\phi,N}$, $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{/S_1}^{\phi,N}$. Notons $\text{pr}: \mathcal{M} \rightarrow T(\mathcal{M})$ la projection canonique. Soit f un morphisme S -linéaire $\widehat{\mathcal{M}} \rightarrow T(\mathcal{M})$

compatible aux structures additionnelles. Alors, il existe un unique morphisme S -linéaire et compatible aux structures additionnelles $g: \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \mathcal{M}$ tel que $f = \text{pr} \circ g$. De plus, g est surjectif si, et seulement si f l'est.

Démonstration. — L'unicité de g est facile et laissée au lecteur. Pour l'existence, on remarque d'abord que f passe au quotient pour définir un morphisme $\bar{f}: \widehat{\mathcal{M}} \otimes_S \widetilde{S} \rightarrow T(\mathcal{M})$ dans la catégorie $\text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}$. L'image de \bar{f} par T^{-1} est alors un morphisme de $\widehat{\mathcal{M}}/p\widehat{\mathcal{M}}$ dans \mathcal{M} , qui composé avec la projection $\widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \widehat{\mathcal{M}}/p\widehat{\mathcal{M}}$ fournit un g adéquat. Évidemment si g est surjectif, f l'est aussi. Réciproquement si f est surjectif, $g \otimes_S W = f \otimes_S W$ l'est aussi, ce qui suffit à assurer la surjectivité de g lui-même. \square

Remarque. — On montre de même qu'un morphisme $f: \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \text{Réd}_{\text{st}}(T(\mathcal{M}))$ se relève en une unique flèche $g: \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \mathcal{M}$.

Tout cela nous conduit à poser la définition suivante :

DÉFINITION 4.3.2. — On note $\text{Mod}_{\widetilde{S} \otimes E}^{\text{st}}$ la sous-catégorie pleine de $\text{Mod}_{\widetilde{S} \otimes E}^{\phi, N}$ formée des objets (\mathcal{M}, ν) pour lesquels il existe un module fortement divisible $\widehat{\mathcal{M}}$, un morphisme de \mathbb{Z}_p -algèbres $\hat{\nu}: W(E) \rightarrow \text{End}_{\text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}}(\widehat{\mathcal{M}})$ et un morphisme surjectif S -linéaire compatible à toutes les structures $f: \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \mathcal{M}$ tels que pour tout $\hat{\lambda} \in W(E)$, $\hat{\nu}(\hat{\lambda})$ stabilise $\ker f$ et induise sur \mathcal{M} l'application $\nu(\lambda)$ où λ est la réduction de $\hat{\lambda}$ modulo p .

LEMME 4.3.3. — Soient $\widehat{\mathcal{M}} \in \text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}$, $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{\widetilde{S}_1}^{\phi, N}$ et $f: \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \mathcal{M}$ un morphisme surjectif compatible à Fil^r et ϕ_r . Alors le morphisme $\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \text{Fil}^r \mathcal{M}$ induit par f est surjectif.

Démonstration. — Soit $\mathcal{F} = f(\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}})$. De la surjectivité de f , on déduit que le module engendré par $\phi_r(\mathcal{F})$ est \mathcal{M} tout entier. L'isomorphisme

$$S_1 \otimes_{(\phi), k[u]/u^e} \frac{\text{Fil}^r \mathcal{M}}{u^e \text{Fil}^r \mathcal{M} + \text{Fil}^p S_1 \mathcal{M}} \simeq S_1 \otimes_{(\phi), k[u]/u^e} \frac{\text{Fil}^r T(\mathcal{M})}{u^e \text{Fil}^r T(\mathcal{M})} \xrightarrow{\sim} \mathcal{M}$$

montre alors que $\text{Fil}^r \mathcal{M} = \mathcal{F} + u^e \text{Fil}^r \mathcal{M} + \text{Fil}^p S_1 \mathcal{M}$. Or on a $\text{Fil}^p S_1 \mathcal{M} \subset \text{Fil}^r S_1 \mathcal{M} = f(\text{Fil}^r S \widehat{\mathcal{M}}) \subset \mathcal{F}$, ce qui donne $\text{Fil}^r \mathcal{M} = \mathcal{F} + u^e \text{Fil}^r \mathcal{M}$. La conclusion s'ensuit facilement en remarquant que la suite des puissances de u^e (dans S_1) s'annule à partir d'un certain rang (en l'occurrence u^{ep}). \square

THÉORÈME 4.3.4. — La restriction de T_{st} à $\text{Mod}_{\widetilde{S} \otimes E}^{\text{st}}$ est un pylonet additif et autodual.

Démonstration. — Il faut vérifier les axiomes **(Ax1)**, **(Ax2)**, **(Ax3a)**, **(Ax3b)**, **(Ax4)** et **(Ax5)**. Éventuellement en utilisant les énoncés analogues pour le foncteur T_{st} défini sur la catégorie $\text{Mod}_{\widetilde{S \otimes E}}^{\phi, N}$ tout entière, on établit facilement **(Ax1)**, **(Ax3b)** et **(Ax5)**. L'axiome **(Ax3a)** ne pose pas non plus véritablement problème : en reprenant les notations de la démonstration de la proposition 2.3.2, il suffit de montrer que si \mathcal{M}_1 et \mathcal{M}_2 sont dans $\text{Mod}_{\widetilde{S \otimes E}}^{\text{st}}$, alors il en est de même de \mathcal{M}' , ce qui est clair puisque \mathcal{M}' est défini comme un quotient de $\mathcal{M}_1 \oplus \mathcal{M}_2$. La vérification de **(Ax2)** est, elle aussi, très simple : il suffit de justifier que si $f: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ est un morphisme dans $\text{Mod}_{\widetilde{S \otimes E}}^{\text{st}}$, alors $\mathcal{M}'' = \text{coker } f$ (calculé dans $\text{Mod}_{\widetilde{S \otimes E}}^{\phi, N}$) est dans $\text{Mod}_{\widetilde{S \otimes E}}^{\text{st}}$ et pour cela, d'après le lemme 4.3.1, il suffit d'établir la surjectivité de $g: \mathcal{M}' \rightarrow \mathcal{M}''$, ce qui résulte directement de la construction.

Il ne reste finalement qu'à vérifier **(Ax4)**. On suppose pour simplifier que $E = \mathbb{F}_p$, le cas général s'obtenant de la même façon en ajoutant l'action de E ou de $W(E)$ à chaque étape. Soit $\mathcal{M} \in \text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\text{st}}$. Par hypothèse, il existe $\widehat{\mathcal{M}} \in \text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}$ muni d'un morphisme surjectif $f: \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \mathcal{M}$. Par le lemme 4.3.1, celui-ci se relève en un morphisme surjectif $g: \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow T^{-1}(\mathcal{M})$ et par le lemme 4.3.3, g induit aussi une surjection au niveau des Fil^r . En utilisant les équivalences de catégories données par les théorèmes 2.2.1 et 2.3.1 de [13], on montre aisément que $\widehat{\mathcal{M}}' = \ker g$ est encore un objet de $\text{Mod}_{\widetilde{S}}^{\phi, N}$. Ainsi on obtient une suite exacte $0 \rightarrow \widehat{\mathcal{M}}' \rightarrow \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow T^{-1}(\mathcal{M}) \rightarrow 0$ qui induit également une suite exactement au niveau des Fil^r . Le lemme V.3.4.1 de [10] montre alors l'existence d'une nouvelle suite exacte ⁽¹²⁾ :

$$0 \rightarrow \widehat{\mathcal{M}}^* \rightarrow \widehat{\mathcal{M}}'^* \rightarrow T^{-1}(\mathcal{M}^*) \rightarrow 0$$

à partir de laquelle on obtient le morphisme surjectif que l'on cherchait. \square

Notons Max^{st} et Min^{st} les foncteurs $\text{Mod}_{\widetilde{S \otimes E}}^{\text{st}} \rightarrow \text{Mod}_{\widetilde{S \otimes E}}^{\text{st}}$ qui découlent du théorème précédent. Notez bien que si \mathcal{M} est dans $\text{Mod}_{\widetilde{S \otimes E}}^{\text{st}}$, c'est aussi un objet de $\text{Mod}_{\widetilde{S \otimes E}}^{\phi, N}$ auquel on peut donc appliquer les deux foncteurs Max et Max^{st} . Je ne sais pas si ces foncteurs coïncident en général, et c'est la raison pour laquelle je préfère introduire deux notations distinctes. Définissons également $\text{Max}_{\widetilde{S \otimes E}}^{\text{st}}$ (resp. $\text{Min}_{\widetilde{S \otimes E}}^{\text{st}}$) comme l'image essentielle de Max^{st} (resp. Min^{st}).

⁽¹²⁾Dans *loc. cit.*, on utilise la notation « \vee » à la place de « \star ».

THÉORÈME 4.3.5. — *La restriction de T_{st} à $\text{Max}_{/\widetilde{S} \otimes E}^{\text{st}}$ (resp. $\text{Min}_{/\widetilde{S} \otimes E}^{\text{st}}$) est pleinement fidèle et son image essentielle est stable par sous-objets et quotients.*

Démonstration. — On ne traite que le cas des objets maximaux, l'autre s'obtenant par dualité. La fidélité ne pose aucun problème. Soient \mathcal{M} et \mathcal{M}' des objets de $\text{Max}_{/\widetilde{S} \otimes E}^{\text{st}}$ et $f: T_{\text{st},E}(\mathcal{M}') \rightarrow T_{\text{st},E}(\mathcal{M})$ une application G_K -équivariante. Par le théorème 4.1.2, f provient d'un morphisme $g: \text{Max}(\mathcal{M}) \rightarrow \text{Max}(\mathcal{M}')$. Par ailleurs, par le lemme 3.2.4, $\text{Réd}_{\text{st}}(\text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M}))$ et $\text{Réd}_{\text{st}}(\text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M}'))$ apparaissent respectivement comme des sous-modules de $\text{Réd}_{\text{st}}(\text{Max}(\mathcal{M}))$ et $\text{Réd}_{\text{st}}(\text{Max}(\mathcal{M}'))$. Pour établir la pleine fidélité, il suffit de montrer que $\text{Réd}_{\text{st}}(g)$ envoie $\text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M})$ sur $\text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M}')$. Considérons $\widehat{\mathcal{M}}$ et $\widehat{\mathcal{M}'}$ des modules fortement divisibles munis de surjections $h: \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M})$ et $h': \widehat{\mathcal{M}'} \rightarrow \text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M}')$ et attardons-nous sur le morphisme

$$(\text{Réd}_{\text{st}}(g) \circ h) \oplus h': \widehat{\mathcal{M}} \oplus \widehat{\mathcal{M}'} \rightarrow \text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Max}(\mathcal{M}').$$

Soit \mathcal{M}'' son image. Par la proposition 3.4.2, $T_{\text{st},E}(\mathcal{M}'') \simeq T_{\text{st},E} \circ \text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M})$ (la compatibilité à l'action de E venant de la fonctorialité), et donc par maximalité de $\text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M}')$, on obtient $\mathcal{M}'' \subset \text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M}')$. Ceci entraîne $\text{Réd}_{\text{st}}(g) \circ h(\widehat{\mathcal{M}}) \subset \text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M}')$, i.e. $\text{Réd}_{\text{st}}(g)(\text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M})) \subset \text{Réd}_{\text{st}} \circ \text{Max}^{\text{st}}(\mathcal{M}')$ comme voulu.

Lorsque $E = \mathbb{F}_p$, la stabilité par sous-objets découle directement de la proposition 2.2.5. La stabilité par quotients s'obtient par dualité, tandis que le cas des coefficients quelconques se fait en relevant l'action de E grâce à la pleine fidélité. □

Représentations cristallines

On peut également s'intéresser aux réseaux à l'intérieur de représentations cristallines plutôt que semi-stables ; au niveau des modules fortement divisibles, ceci correspond à $N \equiv 0 \pmod{uS + \text{Fil}^p S}$, c'est-à-dire $N(\widehat{\mathcal{M}}) \subset (uS + \text{Fil}^p S)\widehat{\mathcal{M}}$. En réalité, on peut légèrement simplifier cette condition comme l'affirme le lemme suivant.

LEMME 4.3.6. — *Soit $\widehat{\mathcal{M}}$ un module fortement divisible tel que $N(\widehat{\mathcal{M}}) \subset (uS + \text{Fil}^p S)\widehat{\mathcal{M}}$. Alors $N(\widehat{\mathcal{M}}) \subset u\widehat{\mathcal{M}}$.*

Démonstration. — Le diagramme (4.1) montre que $N \circ \phi_r(\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}})$ est inclus dans $\phi_r(\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}})$. Pour estimer ce dernier, on utilise la proposition 4.1.2 de [24] qui assure l'existence de $x_1, \dots, x_d \in \text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}}$ tels que

- $\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}}$ est engendré par les x_i et $\text{Fil}^p S \widehat{\mathcal{M}}$;
- les $e_i = \phi_r(x_i)$ forment une base de $\widehat{\mathcal{M}}$;
- les $E(u)^r e_i$ s'expriment comme une combinaison linéaire à coefficients dans S des x_i .

Ainsi, en définissant

$$T = \left\{ \sum_{i \geq 0} a_i \frac{E(u)^i}{(i+r)!}, \quad a_i \in W[u], \lim_{i \rightarrow \infty} a_i = 0 \right\}$$

on a l'inclusion $\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}} \subset Tx_1 + \dots + Tx_r$ (où tout est vu par exemple dans $\widehat{\mathcal{M}} \otimes_S K_0[[u]]$). Par suite, $\phi_r(\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}})$ est contenu dans le $\phi(T)$ -module engendré par les e_i .

Montrons que $\phi(T) \cap (uS + \text{Fil}^p S) \subset uS$. Soit $x \in \phi(T) \cap (uS + \text{Fil}^p S)$. On peut écrire $x = \phi(y)$ avec $y = \sum_{i \geq 0} a_i \frac{E(u)^i}{(i+r)!}$ où la suite des $a_i \in W[u]$ converge vers 0. En regardant modulo $uS + \text{Fil}^p S$, on obtient $\sum_{i \geq 0} a_i(0) \frac{E(0)^i}{(i+r)!} = 0$, puis

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i \geq 0} \phi(a_i) \frac{\phi(E(u))^i - \phi(E(0))^i}{(i+r)!} + \sum_{i \geq 0} [\phi(a_i) - \phi(a_i(0))] \frac{\phi(E(0))^i}{(i+r)!} \\ &= [\phi(E(u)) - \phi(E(0))] \sum_{s,t \geq 0} \phi(a_{s+t+1}) \frac{\phi(E(u))^s \phi(E(0))^t}{(s+t+r+1)!} \\ &\quad + \sum_{i \geq 0} [\phi(a_i) - \phi(a_i(0))] \frac{\phi(E(0))^i}{(i+r)!}. \end{aligned}$$

Étant donné que u — et même à vrai dire u^p — divise $\phi(E(u)) - \phi(E(0))$ et $\phi(a_i) - \phi(a_i(0))$, il suffit de justifier pour montrer que $x \in uS$ que $\frac{\phi(E(u))^s \phi(E(0))^t}{(s+t+r+1)!} \in S$ pour tous entiers s et t . Le numérateur de cette dernière fraction est manifestement divisible par p^{s+t} . De plus,

$$\begin{aligned} v_p \left(\frac{p^{s+t}}{(s+t+r+1)!} \right) &> s+t - \frac{s+t+r+1}{p-1} \\ &= \frac{p-2}{p-1}(s+t) - \frac{r+1}{p-1} \geq -\frac{r+1}{p-1} \geq -1 \end{aligned}$$

d'où on déduit que $\frac{p^{s+t}}{(s+t+r+1)!} \in W \subset S$. Au final, $\frac{\phi(E(u))^s \phi(E(0))^t}{(s+t+r+1)!} \in S$ comme voulu.

On conclut maintenant la preuve du lemme comme suit. Par ce qui précède, on a $N \circ \phi_r(\text{Fil}^r \widehat{\mathcal{M}}) \subset u\widehat{\mathcal{M}}$, et donc en particulier $N(e_i) \in u\widehat{\mathcal{M}}$ pour tout $i \in \{1, \dots, d\}$. Par ailleurs, on vérifie tout de suite que pour tout $s \in S$, $N(s)$ est divisible par u . Ainsi $N(se_i) = N(s)e_i + sN(e_i)$ est lui aussi

multiple de u . La valeur de N sur n importe quelle combinaison linéaire des e_i est donc multiple de u . Comme les e_i forment une base de S , on a bien démontré que $N(\widehat{\mathcal{M}}) \subset u\widehat{\mathcal{M}}$. □

On peut alors adapter la définition 4.3.2 dans ce contexte :

DÉFINITION 4.3.7. — On note $\text{Mod}_{/S \otimes E}^{\text{cris}}$ la sous-catégorie pleine de $\text{Mod}_{/S \otimes E}^{\phi, N}$ formée des objets (\mathcal{M}, ν) pour lesquels il existe un module fortement divisible $\widehat{\mathcal{M}}$ avec $N(\widehat{\mathcal{M}}) \subset u\widehat{\mathcal{M}}$, un morphisme de \mathbb{Z}_p -algèbres $\hat{\nu}: W(E) \rightarrow \text{End}_{\text{Mod}_{/S}^{\phi, N}}(\widehat{\mathcal{M}})$ et un morphisme surjectif S -linéaire compatible à toutes les structures $f: \widehat{\mathcal{M}} \rightarrow \mathcal{M}$ tels que pour tout $\hat{\lambda} \in W(E)$, $\hat{\nu}(\hat{\lambda})$ stabilise $\ker f$ et induise sur \mathcal{M} l'application $\nu(\lambda)$ où λ est la réduction de $\hat{\lambda}$ modulo p .

THÉORÈME 4.3.8. — La restriction de T_{st} à $\text{Mod}_{/S \otimes E}^{\text{cris}}$ est un pylonet additif et autodual. La restriction de T_{st} à la catégorie des objets maximaux (resp. minimaux) correspondants est pleinement fidèle et son image essentielle est stable par sous-objets et quotients.

Démonstration. — C'est la même que dans le cas semi-stable. □

De façon similaire, on peut considérer la sous-catégorie pleine de $\text{Mod}_{/S \otimes E}^{\phi, N}$ comprenant les objets \mathcal{M} pour lesquels $N(\mathcal{M}) \subset u\mathcal{M}$ (sans demander, donc, qu'il existe un relèvement sous forme de module fortement divisible). Par les mêmes méthodes, on a encore un théorème analogue dans cette dernière situation.

4.4. Objets simples

On suppose dans cette sous-section $er \geq p - 1$ (le cas $er < p - 1$ a déjà été étudié dans [11]). On note $K^{\text{nr}} \subset \bar{K}$ l'extension maximale non ramifiée de K . Son corps résiduel s'identifie à une clôture algébrique de k , notée \bar{k} . Pour tout entier d , on note \mathbb{F}_{p^d} l'unique sous-corps de \bar{k} de cardinal p^d . On fixe par ailleurs E une extension finie de \mathbb{F}_p de degré h , ainsi qu'un isomorphisme $\tau: E \rightarrow \mathbb{F}_{p^h}$. Dans la suite, on supposera toujours que l'image de τ est incluse dans k et on utilisera cette hypothèse pour identifier E à un sous-corps de k .

Soit \mathcal{R}_h l'ensemble des classes d'équivalence d'éléments de $\mathbb{Z}_{(p)}$ (le localisé de \mathbb{Z} en p) pour la relation d'équivalence suivante : $a \sim b$ si, et seulement si, il existe un entier n tel que $a \equiv p^{hn}b \pmod{\mathbb{Z}}$. Via l'écriture en base p , les

éléments de \mathcal{R}_h s'identifient à l'ensemble des suites (a_i) périodiques (depuis le début) d'entiers compris entre 0 et $p - 1$ où on a identifié la suite (a_i) à la suite (a_{i+h}) , et où on a ôté la suite constante égale à $p - 1$. À tout $a \in \mathcal{R}_h$, on associe un objet $(\mathcal{M}(a), \nu_a)$ de $\text{Max}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N}$ défini comme suit. On choisit (a_i) une suite périodique qui représente a , on note d sa plus petite période, $d_h = \text{PPCM}(d, h)$ et on définit :

- $\mathcal{M}(a) = \bigoplus_{i \in \mathbb{Z}/d_h\mathbb{Z}} \tilde{S} \cdot e_i$;
- $\text{Fil}^r \mathcal{M}(a) = \sum_{i \in \mathbb{Z}/d_h\mathbb{Z}} \tilde{S} \cdot u^{er-a_i} e_i$;
- $\phi_r(u^{er-a_i} e_i) = (-1)^r e_{i+1}$;
- $N(e_i) = 0$;
- $\nu_a(\lambda)(e_i) = \lambda^{p^i} e_i$ ($\lambda \in E \subset k$).

À partir de la proposition 3.6.7 de [13], on montre facilement que $\mathcal{M}(a)$ est un objet de $\text{Max}_{\tilde{S} \otimes E}^{\phi, N}$. De plus, on vérifie sans mal qu'il ne dépend pas (à isomorphisme près) du choix du représentant (a_i) .

On peut en outre déterminer la restriction au groupe d'inertie, noté I_K , de la représentation galoisienne associée à \mathcal{R}_h . Pour cela, on a tout d'abord besoin de rappeler la définition des caractères fondamentaux de Serre. Pour tout entier d , on considère η_d une racine $(p^d - 1)$ -ième de π et on définit $\theta_d: I_K \rightarrow \mu_{p^d-1}(\bar{K}) \simeq \mathbb{F}_{p^d}^*$, $g \mapsto \frac{g\eta_d}{\eta_d}$, l'isomorphisme entre $\mu_{p^d-1}(\bar{K})$ et $\mathbb{F}_{p^d}^*$ étant induit par la réduction modulo l'idéal maximal.

PROPOSITION 4.4.1. — Soient $a \in \mathcal{R}_h$, (a_i) une suite périodique représentant a et d sa plus petite période. Posons $d_h = \text{PPCM}(d, h)$. Alors, en tant que E -représentation de I_K :

$$\begin{aligned} T_{\text{st}, E}(\mathcal{M}(a), \nu_a) &= \mathbb{F}_{p^{d_h}}(\theta_d^{p^{d-1}a_1 + \dots + pa_{d-1} + a_d}) \\ &= \mathbb{F}_{p^d}(\theta_d^{p^{d-1}a_1 + \dots + pa_{d-1} + a_d}) \otimes_{\mathbb{F}_{p^d} \cap E} E \end{aligned}$$

où, si L est un corps, $L(\psi)$ désigne la L -représentation de G_K de dimension 1 où l'action se fait par le caractère $\psi: G_K \rightarrow L^*$.

Démonstration. — Pour tout entier $i \geq 0$, posons $s_i = p^{d-1}a_i + p^{d-2}a_{i+1} + \dots + a_{i+d-1}$. Quitte à passer à une extension non ramifiée (ce qui ne modifie pas le groupe d'inertie I_K), on peut supposer que $\mathbb{F}_{p^{d_h}} \subset k$. Pour tout $\mu \in \mathbb{F}_{p^{d_h}}$, considérons alors l'unique application k -linéaire $f_\mu: \mathcal{M}(a) \rightarrow \hat{A}_0 = k \otimes_{(\phi), k} \mathcal{O}_{\bar{K}}/p$ qui envoie e_i sur $\mu^{p^i} \otimes \eta_d^{s_i}$. On vérifie que les f_μ sont dans $T_{\text{st}}(\mathcal{M}(a))$ (c'est-à-dire qu'ils commutent à Fil^r , ϕ_r et N) et que l'application $\mathbb{F}_{p^{d_h}} \rightarrow T_{\text{st}}(\mathcal{M}(a))$, $\mu \mapsto f_\mu$ est injective. Elle est donc bijective puisque $\mathbb{F}_{p^{d_h}}$ et $T_{\text{st}}(\mathcal{M}(a))$ ont même cardinal p^{d_h} . Par ailleurs,

pour $\sigma \in I_K$ et $\mu \in \mathbb{F}_{p^{d_h}}$, on a

$$\begin{aligned} (\sigma f_\mu)(e_i) &= \mu^{p^i} \otimes \sigma(\eta_d^{s_i}) = \mu^{p^i} \otimes \theta_d(\sigma)^{s_i} \eta_d^{s_i} \\ &= \mu^{p^i} \theta_d(\sigma)^{ps_i} \otimes \eta_d^{s_i} = (\mu \theta_d(\sigma)^{s_1})^{p^i} \otimes \eta_d^{s_i} \end{aligned}$$

la dernière égalité étant vraie car $ps_i \equiv p^i s_1 \pmod{p^d - 1}$. On obtient donc $\sigma f_\mu = f_{\theta_d(\sigma)^{s_1} \mu}$. Un calcul analogue conduit à $f_\mu \circ \nu_a(\lambda) = f_{\lambda \mu}$ pour tout $\lambda \in E$ et $\mu \in \mathbb{F}_{p^{d_h}}$. La première formule de la proposition résulte de ces calculs tandis que la deuxième s'en déduit aisément. \square

COROLLAIRE 4.4.2. — *On suppose $er \geq p - 1$ et k algébriquement clos. Les objets simples de $\text{Max}_{\sqrt[\sim]{S \otimes E}}^{\phi, N}$ sont exactement les $\mathcal{M}(a)$, $a \in \mathcal{R}_h$. De plus, ils sont deux à deux non isomorphes.*

Démonstration. — Les arguments des paragraphes 1.6 et 1.7 de [26] montrent que les E -représentations irréductibles de $G_K = I_K$ sont exactement les $T_{\text{st}, E}(\mathcal{M}(a), \nu_a)$ et qu'elles sont deux à deux non isomorphes. Le corollaire provient alors de la pleine fidélité de $T_{\text{st}, E} : \text{Max}_{\sqrt[\sim]{S \otimes E}}^{\phi, N} \rightarrow \text{Rep}_E(G_K)$ (Théorème 4.1.2). \square

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. BREUIL, « Topologie log-syntomique, cohomologie log-cristalline et cohomologie de Čech », *Bull. Soc. Math. France* **124** (1996), n° 4, p. 587-647.
- [2] ———, « Cohomologie étale de p -torsion et cohomologie cristalline en réduction semi-stable », *Duke Math. J.* **95** (1998), n° 3, p. 523-620.
- [3] ———, « Construction de représentations p -adiques semi-stables », *Ann. Sci. École Norm. Sup. (4)* **31** (1998), n° 3, p. 281-327.
- [4] ———, « Représentations semi-stables et modules fortement divisibles », *Invent. Math.* **136** (1999), n° 1, p. 89-122.
- [5] ———, « Une application de corps des normes », *Compositio Math.* **117** (1999), n° 2, p. 189-203.
- [6] ———, « Groupes p -divisibles, groupes finis et modules filtrés », *Ann. of Math. (2)* **152** (2000), n° 2, p. 489-549.
- [7] C. BREUIL, B. CONRAD, F. DIAMOND & R. TAYLOR, « On the modularity of elliptic curves over \mathbf{Q} : wild 3-adic exercises », *J. Amer. Math. Soc.* **14** (2001), n° 4, p. 843-939.
- [8] K. BUZZARD, F. DIAMOND & F. JARVIS, « On Serre's conjecture for mod l Galois representations over totally real fields », *Duke Math. J.* **155** (2010), n° 1, p. 105-161.
- [9] X. CARUSO, « Schémas en groupes et poids de Diamond-Serre », preprint (2007).
- [10] ———, « Conjecture de l'inertie modérée de Serre », Thèse, Paris 13, 2005.
- [11] ———, « Représentations semi-stables de torsion dans le case $er < p - 1$ », *J. Reine Angew. Math.* **594** (2006), p. 35-92.

- [12] ———, « Conjecture de l'inertie modérée de Serre », *Invent. Math.* **171** (2008), n° 3, p. 629-699.
- [13] X. CARUSO & T. LIU, « Quasi-semi-stable representations », *Bull. Soc. Math. France* **137** (2009), n° 2, p. 185-223.
- [14] X. CARUSO & D. SAVITT, « Polygones de Hodge, de Newton et de l'inertie modérée des représentations semi-stables », *Math. Ann.* **343** (2009), n° 4, p. 773-789.
- [15] J.-M. FONTAINE, « Représentations p -adiques des corps locaux. I », in *The Grothendieck Festschrift, Vol. II*, Progr. Math., vol. 87, Birkhäuser Boston, Boston, MA, 1990, p. 249-309.
- [16] J.-M. FONTAINE & G. LAFFAILLE, « Construction de représentations p -adiques », *Ann. Sci. École Norm. Sup. (4)* **15** (1982), n° 4, p. 547-608 (1983).
- [17] P. GABRIEL & M. ZISMAN, *Calculus of fractions and homotopy theory*, Ergebnisse der Mathematik und ihrer Grenzgebiete, Band 35, Springer-Verlag New York, Inc., New York, 1967, x+168 pages.
- [18] T. GEE, « On the weights of mod p Hilbert modular forms », à paraître dans *Invent. Math.*
- [19] S. HATTORI, « On a ramification bound of torsion semi-stable representations over a local field », *J. Number Theory* **129** (2009), n° 10, p. 2474-2503.
- [20] K. KATO, « Logarithmic structures of Fontaine-Illusie », in *Algebraic analysis, geometry, and number theory (Baltimore, MD, 1988)*, Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, MD, 1989, p. 191-224.
- [21] M. KISIN, « Crystalline representations and F -crystals », in *Algebraic geometry and number theory*, Progr. Math., vol. 253, Birkhäuser Boston, Boston, MA, 2006, p. 459-496.
- [22] J. LE BORGNE, « Optimisation du théorème d'Ax-Sen-Tate et application à un calcul de cohomologie galoisienne p -adique », *Ann. Inst. Fourier* **60** (2010), n° 3, p. 1105-1123.
- [23] T. LIU, « Torsion p -adic Galois representations and a conjecture of Fontaine », *Ann. Sci. École Norm. Sup. (4)* **40** (2007), n° 4, p. 633-674.
- [24] ———, « On lattices in semi-stable representations : a proof of a conjecture of Breuil », *Compos. Math.* **144** (2008), n° 1, p. 61-88.
- [25] M. RAYNAUD, « Schémas en groupes de type (p, \dots, p) », *Bull. Soc. Math. France* **102** (1974), p. 241-280.
- [26] J.-P. SERRE, « Propriétés galoisiennes des points d'ordre fini des courbes elliptiques », *Invent. Math.* **15** (1972), n° 4, p. 259-331.
- [27] J. WILDESHAUS, « On derived functors on categories without enough injectives », *J. Pure Appl. Algebra* **150** (2000), n° 2, p. 207-213.
- [28] J.-P. WINTENBERGER, « Le corps des normes de certaines extensions infinies de corps locaux ; applications », *Ann. Sci. École Norm. Sup. (4)* **16** (1983), n° 1, p. 59-89.

Manuscrit reçu le 8 janvier 2009,
révisé le 1^{er} décembre 2009,
accepté le 27 juillet 2010.

Xavier CARUSO
Université de Rennes 1
Laboratoire IRMAR
Campus de Beaulieu
35042 Rennes Cedex (France)
xavier.caruso@normalesup.org