
$\mathbf{B}_{\text{cris}}^{\varphi=1}$ -REPRÉSENTATIONS ET (φ, Γ) -MODULES

par

Laurent Berger

Résumé. — On étudie la catégorie des B -paires (W_e, W_{dR}^+) où W_e est un $\mathbf{B}_{\text{cris}}^{\varphi=1}$ -module libre muni d'une action semi-linéaire et continue de G_K et où W_{dR}^+ est un $\mathbf{B}_{dR}^+$ -réseau stable par G_K de $\mathbf{B}_{dR} \otimes_{\mathbf{B}_{\text{cris}}^{\varphi=1}} W_e$. Cette catégorie contient celle des représentations p -adiques, et est naturellement équivalente à la catégorie de tous les (φ, Γ) -modules sur l'anneau de Robba.

Abstract. — We study the category of B -pairs (W_e, W_{dR}^+) where W_e is a free $\mathbf{B}_{\text{cris}}^{\varphi=1}$ -module with a semilinear and continuous action of G_K and where W_{dR}^+ is a G_K -stable $\mathbf{B}_{dR}^+$ -lattice in $\mathbf{B}_{dR} \otimes_{\mathbf{B}_{\text{cris}}^{\varphi=1}} W_e$. This category contains the category of p -adic representations and is naturally equivalent to the category of all (φ, Γ) -modules over the Robba ring.

Table des matières

Introduction.....	2
1. Rappels et compléments.....	4
1.1. L'anneau $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ et ses petits camarades.....	4
1.2. Les (φ, Γ) -modules sur l'anneau de Robba.....	10
2. Les B -paires.....	12
2.1. La catégorie des B -paires.....	12
2.2. Construction de (φ, Γ) -modules.....	13
2.3. Théorie de Hodge p -adique.....	17
3. Les (φ, Γ) -modules.....	19
3.1. Modification de (φ, Γ) -modules.....	19
3.2. Classification des objets isoclines.....	22
3.3. Les (φ, Γ) -modules de hauteur finie.....	23
Appendice A. Liste des notations.....	29
Références.....	29

Classification mathématique par sujets (2000). — 11F80; 11F85; 11S15; 11S20; 11S25; 14F30.

Mots clefs. — théorie de Hodge p -adique; (φ, Γ) -modules; pentes de Frobenius; B -paires.

Introduction

Dans tout cet article, p est un nombre premier, k est un corps parfait de caractéristique p , et K est une extension finie totalement ramifiée de $K_0 = W(k)[1/p]$. On s'intéresse aux représentations p -adiques du groupe de Galois $G_K = \text{Gal}(\overline{K}/K)$. La théorie de Hodge p -adique (cf. [Fon94a, Fon94b]) a pour but de décrire certaines de ces représentations, celles qui « proviennent de la géométrie », en termes d'objets plus maniables, les (φ, N) -modules filtrés. Le résultat le plus satisfaisant dans cette direction est le théorème de Colmez-Fontaine, qui dit que le foncteur $V \mapsto D_{\text{st}}(V)$ réalise une équivalence de catégories entre la catégorie des représentations p -adiques semi-stables et la catégorie des (φ, N) -modules filtrés admissibles.

Si D est un φ -module filtré qui provient de la cohomologie d'un schéma propre X sur $\mathcal{O}_K$, alors le φ -module sous-jacent ne dépend que de la fibre spéciale de X (c'en est la cohomologie cristalline) alors que la filtration ne dépend que de la fibre générique (c'est la filtration de Hodge de la cohomologie de de Rham, dans laquelle se plonge la cohomologie cristalline). Si $V = V_{\text{cris}}(D)$ et $\mathbf{B}_e = \mathbf{B}_{\text{cris}}^{\varphi=1}$, alors on voit que $\mathbf{B}_e \otimes_{\mathbf{Q}_p} V = (\mathbf{B}_{\text{cris}} \otimes_{K_0} D)^{\varphi=1}$ ne dépend que de la structure de φ -module de D et de plus, les φ -modules D_1 et D_2 sont isomorphes si et seulement si les $\mathbf{B}_e$ -représentations $\mathbf{B}_e \otimes_{\mathbf{Q}_p} V_1$ et $\mathbf{B}_e \otimes_{\mathbf{Q}_p} V_2$ le sont (cf. la proposition 8.2 de [Fon03]). Par ailleurs, les modules filtrés $K \otimes_{K_0} D_1$ et $K \otimes_{K_0} D_2$ sont isomorphes si et seulement si les $\mathbf{B}_{\text{dR}}^+$ -représentations $\mathbf{B}_{\text{dR}}^+ \otimes_{\mathbf{Q}_p} V_1$ et $\mathbf{B}_{\text{dR}}^+ \otimes_{\mathbf{Q}_p} V_2$ le sont.

L'idée de cet article est d'isoler les phénomènes liés à la « fibre spéciale » et à la « fibre générique » en considérant non pas des représentations p -adiques V , mais des B -paires $W = (W_e, W_{\text{dR}}^+)$ où W_e est un $\mathbf{B}_e$ -module libre muni d'une action semi-linéaire et continue de G_K et où W_{dR}^+ est un $\mathbf{B}_{\text{dR}}^+$ -réseau stable par G_K de $W_{\text{dR}} = \mathbf{B}_{\text{dR}} \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e$. Rappelons que les anneaux $\mathbf{B}_{\text{cris}}$ et $\mathbf{B}_{\text{dR}}$ sont reliés, en plus de l'inclusion $\mathbf{B}_{\text{cris}} \subset \mathbf{B}_{\text{dR}}$, par la *suite exacte fondamentale* :

$$0 \rightarrow \mathbf{Q}_p \rightarrow \mathbf{B}_{\text{cris}}^{\varphi=1} \rightarrow \mathbf{B}_{\text{dR}}/\mathbf{B}_{\text{dR}}^+ \rightarrow 0.$$

Si V est une représentation p -adique, alors on lui associe la B -paire $W(V) = (\mathbf{B}_e \otimes_{\mathbf{Q}_p} V, \mathbf{B}_{\text{dR}}^+ \otimes_{\mathbf{Q}_p} V)$ et ce foncteur est pleinement fidèle car $\mathbf{B}_e \cap \mathbf{B}_{\text{dR}}^+ = \mathbf{Q}_p$ ce qui fait que $V = W_e(V) \cap W_{\text{dR}}^+(V)$.

L'un des principaux outils dont on dispose pour étudier les représentations p -adiques est la théorie des (φ, Γ) -modules. De fait, on a une équivalence de catégories entre la catégorie des représentations p -adiques et la catégorie des (φ, Γ) -modules étales sur l'anneau de Robba (en combinant des résultats de Fontaine, Cherbonnier-Colmez et Kedlaya). Le premier résultat de cet article est que l'on peut associer à toute B -paire W un (φ, Γ) -module $D(W)$ sur l'anneau de Robba, et que ce foncteur est alors une équivalence de catégories.

Théorème A. — *Le foncteur $W \mapsto D(W)$ réalise une équivalence de catégories entre la catégorie des B -paires et la catégorie des (φ, Γ) -modules sur l'anneau de Robba.*

La sous-catégorie pleine des B -paires de la forme $W(V)$ correspond à la sous-catégorie pleine des (φ, Γ) -modules étales. On peut alors se demander à quoi correspondent les (φ, Γ) -modules isoclines. Si $h \geq 1$ et $a \in \mathbf{Z}$ sont premiers entre eux, soit $\text{Rep}(a, h)$ la catégorie dont les objets sont les $\mathbf{Q}_{p^h}$ -espaces vectoriels $V_{a,h}$ de dimension finie, munis d'une action semi-linéaire de G_K et d'un Frobenius lui aussi semi-linéaire $\varphi : V_{a,h} \rightarrow V_{a,h}$ qui commute à G_K et qui vérifie $\varphi^h = p^a$. Si $V_{a,h} \in \text{Rep}(a, h)$, alors on pose $W_e(V_{a,h}) = (\mathbf{B}_{\text{cris}} \otimes_{\mathbf{Q}_{p^h}} V_{a,h})^{\varphi=1}$ et $W_{dR}^+(V_{a,h}) = \mathbf{B}_{dR}^+ \otimes_{\mathbf{Q}_{p^h}} V_{a,h}$.

Théorème B. — *Si $V_{a,h} \in \text{Rep}(a, h)$, alors $W(V_{a,h}) = (W_e(V_{a,h}), W_{dR}^+(V_{a,h}))$ est une B -paire et le foncteur $V_{a,h} \mapsto W(V_{a,h})$ définit une équivalence de catégories entre $\text{Rep}(a, h)$ et la catégorie des B -paires W telles que $D(W)$ est isocline de pente a/h .*

Si la catégorie des B -paires est plus riche que la catégorie des représentations p -adiques, la morale de cet article est qu'elle est aussi plus maniable. Ceci est dû au fait qu'il est plus facile de travailler avec tous les (φ, Γ) -modules sur l'anneau de Robba que de se restreindre à ceux qui sont étales. La généralisation du théorème de Colmez-Fontaine aux B -paires devient alors un simple exercice d'algèbre linéaire. Si D est un (φ, N) -module filtré, et si $W_e(D) = (\mathbf{B}_{\text{st}} \otimes_{K_0} D)^{\varphi=1, N=0}$ et $W_{dR}^+(D) = \text{Fil}^0(\mathbf{B}_{dR} \otimes_K D_K)$, alors $W(D) = (W_e(D), W_{dR}^+(D))$ est une B -paire, qui est semi-stable en un sens évident. Le foncteur $D \mapsto W(D)$ réalise alors une équivalence de catégories entre la catégorie des B -paires semi-stables et la catégorie des (φ, N) -modules filtrés.

Pour retrouver le théorème de Colmez-Fontaine à partir de cet énoncé, il faut identifier quelles sont les B -paires semi-stables qui proviennent des (φ, N) -modules filtrés admissibles. On peut faire cela en passant par les (φ, Γ) -modules, c'est ce qui est fait dans [Ber04b], où l'on démontre suffisamment pour impliquer aussi le théorème de monodromie p -adique pour les B -paires : toute B -paire de de Rham est potentiellement semi-stable.

Dans la suite de l'article, nous donnons quelques applications du théorème A. Par exemple, on montre que pour tout (φ, Γ) -module D , il existe (après extension éventuelle des scalaires) un (φ, Γ) -module étale $M \subset D[1/t]$ tel que $M[1/t] = D[1/t]$. Comme $D(W)[1/t]$ « correspond » à W_e , on déduit de cet énoncé le résultat suivant qui répond à une question de Fontaine.

Théorème C. — *Si W_e est une $\mathbf{B}_e$ -représentation de G_K , alors il existe une extension finie L de K et une représentation p -adique V de G_L telle que $W_{e|L} = \mathbf{B}_e \otimes_{\mathbf{Q}_p} V$.*

Enfin, nous donnons (quand $K \subset K_0(\mu_{p^\infty})$) une construction des (φ, Γ) -modules de *hauteur finie* (ce sont ceux qui ont une base dans laquelle les matrices de φ et de $\gamma \in \Gamma_K$ n'ont pas de dénominateurs en X) à partir de « φ -modules filtrés sur K_0 avec action de Γ_K ». Cela permet d'éclaircir la structure des B -paires de hauteur finie, et donc en particulier des représentations de hauteur finie. Un φ -module filtré sur K_0 avec action de Γ_K est un φ -module D sur K_0 muni d'une action de Γ_K commutant à φ et d'une filtration stable par Γ_K sur $D_\infty = K_\infty \otimes_{K_0} D$.

Théorème D. — *Si D est un φ -module filtré sur K_0 avec action de Γ_K , alors la B -paire $W(D) = ((\mathbf{B}_{\max} \otimes_{K_0} D)^{\varphi=1}, \mathbf{B}_{\mathrm{dR}}^+ \otimes_{K_\infty} D_\infty)$ est de hauteur finie.*

De plus, toute B -paire de hauteur finie s'obtient de cette manière et $W(D_1) = W(D_2)$ si et seulement s'il existe un isomorphisme $K_0[t, t^{-1}] \otimes_{K_0} D_1 = K_0[t, t^{-1}] \otimes_{K_0} D_2$ compatible à φ et Γ_K , et compatible à la filtration quand on étend les scalaires à $K_\infty((t))$.

Pour terminer cette introduction, signalons que la notion de représentation trianguline de [Col07] s'écrit de manière très agréable en termes de B -paires. On dit qu'une B -paire est *trianguline* si elle est extension successive de B -paires de dimension 1. Par le théorème A, cela revient à dire que $D(W)$ est extension successive de (φ, Γ) -modules de rang 1. On retrouve donc la définition de [Col07] dans le cas où $W = W(V)$.

Remerciements : Je remercie Pierre Colmez pour de nombreuses discussions sur plusieurs thèmes qui se sont concrétisés dans ce texte, Jean-Marc Fontaine pour avoir suggéré que les $\mathbf{B}_e$ -représentations sont de bons objets et m'avoir expliqué ses idées sur le lien entre les B -paires et les presque $\mathbf{C}_p$ -représentations, et Kiran Kedlaya pour ses explications sur les φ -modules et les nombreux anneaux qui interviennent dans ses constructions. Cet article a été rédigé à l'IHES qui m'a offert d'excellentes conditions de travail.

1. Rappels et compléments

Dans ce chapitre, nous donnons des rappels sur les anneaux de périodes et les (φ, Γ) -modules.

1.1. L'anneau $\tilde{\mathbf{B}}_{\mathrm{rig}}^+$ et ses petits camarades. — Nous commençons par faire des rappels très succints sur les définitions (données dans [Fon94a] par exemple) des divers anneaux que nous utilisons dans cet article. Rappelons que $\tilde{\mathbf{E}}^+ = \varprojlim_{x \mapsto x^p} \mathcal{O}_{\mathbf{C}_p}$ est un anneau de caractéristique p , complet pour la valuation $\mathrm{val}_{\mathbf{E}}$ définie par $\mathrm{val}_{\mathbf{E}}(x) = \mathrm{val}_p(x^{(0)})$ et qui contient un élément ε tel que $\varepsilon^{(n)}$ est une racine primitive p^n -ième de l'unité. On fixe un tel ε dans tout l'article. L'anneau $\tilde{\mathbf{E}} = \tilde{\mathbf{E}}^+[1/(\varepsilon - 1)]$ est alors un corps qui contient

comme sous-corps dense la clôture algébrique de $\mathbf{F}_p((\varepsilon - 1))$. On pose $\tilde{\mathbf{A}}^+ = W(\tilde{\mathbf{E}}^+)$ et $\tilde{\mathbf{A}} = W(\tilde{\mathbf{E}})$ ainsi que $\tilde{\mathbf{B}}^+ = \tilde{\mathbf{A}}^+[1/p]$ et $\tilde{\mathbf{B}} = \tilde{\mathbf{A}}[1/p]$. L'application $\theta : \tilde{\mathbf{B}}^+ \rightarrow \mathbf{C}_p$ qui à $\sum_{k \gg -\infty} p^k [x_k]$ associe $\sum_{k \gg -\infty} p^k x_k^{(0)}$ est un morphisme d'anneaux surjectif et $\mathbf{B}_{\text{dR}}^+$ est le complété de $\tilde{\mathbf{B}}^+$ pour la topologie $\ker(\theta)$ -adique, ce qui en fait un espace topologique de Fréchet. On pose $X = [\varepsilon] - 1 \in \tilde{\mathbf{A}}^+$ et $t = \log(1 + X) \in \mathbf{B}_{\text{dR}}^+$ et on définit $\mathbf{B}_{\text{dR}}$ par $\mathbf{B}_{\text{dR}} = \mathbf{B}_{\text{dR}}^+[1/t]$. Soit $\tilde{p} \in \tilde{\mathbf{E}}^+$ un élément tel que $p^{(0)} = p$. L'anneau $\mathbf{B}_{\text{max}}^+$ est le complété p -adique de $\tilde{\mathbf{B}}^+[[\tilde{p}]/p]$ ce qui en fait un sous-anneau de $\mathbf{B}_{\text{dR}}^+$ muni en plus d'un Frobenius φ qui est injectif, mais pas surjectif. On pose $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ = \bigcap_{n \geq 0} \varphi^n(\mathbf{B}_{\text{max}}^+)$ ce qui en fait un sous-anneau de $\mathbf{B}_{\text{max}}^+$ sur lequel φ est bijectif. On pose enfin $\mathbf{B}_{\text{max}} = \mathbf{B}_{\text{max}}^+[1/t]$ et $\mathbf{B}_{\text{st}} = \mathbf{B}_{\text{max}}[\log[\tilde{p}]]$ ce qui fait de $\mathbf{B}_{\text{st}}$ un sous-anneau de $\mathbf{B}_{\text{dR}}$ muni de φ et d'un opérateur de monodromie N . Remarquons que l'on travaille souvent avec $\mathbf{B}_{\text{cris}}$ plutôt que $\mathbf{B}_{\text{max}}$ mais le fait de préférer $\mathbf{B}_{\text{max}}$ ne change rien aux résultats et est plus agréable pour des raisons techniques.

Rappelons que les anneaux $\mathbf{B}_{\text{max}}$ et $\mathbf{B}_{\text{dR}}$ sont reliés, en plus de l'inclusion $\mathbf{B}_{\text{max}} \subset \mathbf{B}_{\text{dR}}$, par la *suite exacte fondamentale* $0 \rightarrow \mathbf{Q}_p \rightarrow \mathbf{B}_{\text{max}}^{\varphi=1} \rightarrow \mathbf{B}_{\text{dR}}/\mathbf{B}_{\text{dR}}^+ \rightarrow 0$. Ce sont ces anneaux que l'on utilise en théorie de Hodge p -adique. Le point de départ de la théorie des (φ, Γ) -modules sur l'anneau de Robba (dont on parle au paragraphe 1.2) est la construction d'anneaux intermédiaires entre $\tilde{\mathbf{B}}^+$ et $\tilde{\mathbf{B}}$. Si $r > 0$, soit $\tilde{\mathbf{B}}^{\dagger, r}$ l'ensemble des $x = \sum_{k \gg -\infty} p^k [x_k] \in \tilde{\mathbf{B}}$ tels que $\text{val}_{\mathbf{E}}(x_k) + k \cdot pr / (p-1)$ tend vers $+\infty$ quand k augmente. On pose $\tilde{\mathbf{B}}^{\dagger} = \bigcup_{r > 0} \tilde{\mathbf{B}}^{\dagger, r}$, c'est le corps des éléments surconvergents, défini dans [CC98]. L'anneau $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger} = \bigcup_{r > 0} \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}$ défini dans [Ber02, §2.3] est en quelque sorte la somme de $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ et $\tilde{\mathbf{B}}^{\dagger}$; de fait, on a une suite exacte :

$$0 \rightarrow \tilde{\mathbf{B}}^+ \rightarrow \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ \oplus \tilde{\mathbf{B}}^{\dagger, r} \rightarrow \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r} \rightarrow 0.$$

Rappelons que $K_0 = W(k)[1/p]$; pour $1 \leq n \leq +\infty$, on pose $K_n = K(\mu_{p^n})$ et $H_K = \text{Gal}(\overline{K}/K_{\infty})$ et $\Gamma_K = G_K/H_K$. Si R est un anneau muni d'une action de G_K (c'est le cas pour tous ceux que nous considérons), on note $R_K = R^{H_K}$. L'anneau $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}$ contient l'ensemble des séries $f(X) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} f_k X^k$ avec $f_k \in K_0$ telles que $f(X)$ converge sur $\{p^{-1/r} \leq |X| < 1\}$. Cet anneau est noté $\mathbf{B}_{\text{rig}, K_0}^{\dagger, r}$. Si K est une extension finie de K_0 , il lui correspond par la théorie du corps de normes (cf. [FW79] et [Win83]) une extension finie $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r}$ qui s'identifie (si r est assez grand) à l'ensemble des séries $f(X_K) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} f_k X_K^k$ avec $f_k \in K'_0$ telles que $f(X_K)$ converge sur $\{p^{-1/er} \leq |X_K| < 1\}$ où X_K est un certain élément de $\tilde{\mathbf{B}}_K^{\dagger}$ et K'_0 est la plus grande sous-extension non ramifiée de K_0 dans K_{∞} et $e = [K_{\infty} : K_0(\mu_{p^{\infty}})]$. On pose $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger} = \bigcup_{r > 0} \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r}$ et $\mathbf{B}_K^{\dagger, r} = \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r} \cap \tilde{\mathbf{B}}^{\dagger}$ et $\mathbf{B}_K^{\dagger} = \bigcup_{r > 0} \mathbf{B}_K^{\dagger, r}$. Les anneaux $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger}$ et $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger}$ coïncident avec les anneaux $\Gamma_{\text{an}, \text{con}}^{\text{alg}}$ et $\Gamma_{\text{an}, \text{con}}$ définis dans [Ked05, §2.2] (cf. en particulier la convention 2.2.16 et la remarque 2.4.13 de [Ked05]).

Kedlaya les a étudiés en détail et nous rappelons à présent quelques uns des résultats que nous utilisons dans la suite.

Proposition 1.1.1. — *Les anneaux $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}$ et l'anneau $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger}$ sont de Bézout, ainsi que les anneaux $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^{\dagger,r}$ et l'anneau $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^{\dagger}$. Si R est l'un de ces anneaux, et si M est un sous- R -module d'un R -module libre de rang fini, alors les affirmations suivantes sont équivalentes :*

- (1) M est libre ;
- (2) M est fermé ;
- (3) M est de type fini.

Démonstration. — Pour $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}$ ou $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^{\dagger,r}$, c'est le théorème 2.9.6 de [Ked05] et pour $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger}$ ou $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^{\dagger}$, c'est une conséquence immédiate de ce que $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger} = \bigcup_{r>0} \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}$ et $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^{\dagger} = \bigcup_{r>0} \mathbf{B}_{\text{rig},K}^{\dagger,r}$. L'affirmation quant aux sous-modules des modules libres est contenue dans le corollaire 2.8.5 et la définition 2.9.5 de [Ked05]. $\square$

Corollaire 1.1.2. — *Si R est l'un des anneaux ci-dessus, et si $f : D \rightarrow E$ est un morphisme de R -modules libres de rang fini, alors $\text{im}(f)$ et $\ker(f)$ sont libres de rang fini. De plus, $\ker(f)$ est saturé dans D .*

Remarque 1.1.3. — Les anneaux $\widetilde{\mathbf{B}}^+$ et $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ ne sont pas de Bézout.

Démonstration. — Commençons par $\widetilde{\mathbf{B}}^+$. Soit $\beta_1 > \beta_2 > \dots$ une suite convexe décroissante d'éléments de $\mathbf{Z}[1/p]$ qui converge vers $\beta > 0$; si $r \in \mathbf{Z}[1/p]$, écrivons Y^r pour $[\widetilde{p}^r]$. On pose $f = \sum_{i \geq 0} p^i Y^{\beta_{2i}}$ et $g = \sum_{i \geq 0} p^i Y^{\beta_{2i+1}}$. Supposons que l'idéal de $\widetilde{\mathbf{B}}^+$ engendré par f et g est principal, engendré par un élément h . Cet élément est nécessairement dans $Y^{\geq \beta} \widetilde{\mathbf{B}}^+$, puisque f et g le sont et comme $\widetilde{\mathbf{A}}^+/p$ est intègre, on peut supposer que $h \in \widetilde{\mathbf{A}}^+$ et que $I = (f, g) \cap \widetilde{\mathbf{A}}^+ = h \widetilde{\mathbf{A}}^+$. On a alors $\text{val}_E(\overline{h}) \geq \beta$. Par ailleurs, on a $(f - gY^{\beta_0 - \beta_1})/p \in (f, g)$ et cet élément s'écrit $\sum_{i \geq 0} p^i Y^{\beta_{2i+2}}(1 + O(Y))$ (c'est là qu'on utilise la convexité de la suite) et en itérant ce procédé, on voit que I contient un élément de la forme $\sum_{i \geq 0} p^i Y^{\beta_{2i+j}}(1 + O(Y))$ pour tout $j \geq 0$ et donc que l'image de I dans $\widetilde{\mathbf{E}}^+$ contient des éléments de valuation β_j pour tout $j \geq 0$. Ceci entraîne que $\text{val}_E(\overline{h}) = \beta$. Si $\beta \notin \mathbf{Q}$, c'est impossible et donc $\widetilde{\mathbf{B}}^+$ n'est pas de Bézout.

Si $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ était de Bézout, alors il existerait $h \in \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ tel que $(f, g) = h \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ et en utilisant la théorie des polygones de Newton de [Ked05, §2.5], on montre que $h \in \widetilde{\mathbf{B}}^+$. Comme ci-dessus, on peut supposer que $h \in \widetilde{\mathbf{A}}^+ \setminus p \widetilde{\mathbf{A}}^+$. Chacun des éléments $f_j = \sum_{i \geq 0} p^i Y^{\beta_{2i+j}}(1 + O(Y))$ construits ci-dessus pour $j \geq 0$ peut donc s'écrire $f_j = h x_j$ et encore une fois, on a forcément $x_j \in \widetilde{\mathbf{A}}^+$. On a alors $\text{val}_E(\overline{h}) \leq \text{val}_E(\overline{f_j}) = \beta_j$ ce qui fait que $\text{val}_E(\overline{h}) \leq \beta$. Par ailleurs, si $\alpha \in \mathbf{Z}[1/p]$ et $\alpha < \beta$, alors Y^α divise f et g ce qui fait que $(f, g) \subset Y^\alpha \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ et

donc aussi que $h \in Y^\alpha \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ \cap \tilde{\mathbf{A}}^+ = Y^\alpha \tilde{\mathbf{A}}^+$ pour tout $\alpha < \beta$. Si $\beta \notin \mathbf{Q}$, alors $\text{val}_{\mathbf{E}}(\bar{h}) < \beta$ et en choisissant $\text{val}_{\mathbf{E}}(\bar{h}) < \alpha < \beta$, on trouve une contradiction, ce qui fait que $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ n'est pas de Bézout. $\square$

Une grande partie de l'article [Ked05] est consacré à l'étude des φ -modules sur l'anneau $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ ou sur l'anneau $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$. Nous rappelons à présent quelques résultats quant au premier cas (pour le deuxième, voir le paragraphe 1.2).

Définition 1.1.4. — Si $h \geq 1$ et $a \in \mathbf{Z}$ sont deux entiers premiers entre eux, alors le φ -module élémentaire $M_{a,h}$ est le φ -module de base $e_0, \dots, e_{h-1}$ avec $\varphi(e_0) = e_1, \dots, \varphi(e_{h-2}) = e_{h-1}$ et $\varphi(e_{h-1}) = p^a e_0$ (cf. la définition 4.1.1 de [Ked05]; on utilise (a, h) plutôt que (c, d) pour être compatible avec les notations de Colmez et de Fontaine).

Proposition 1.1.5. — Si M est un φ -module sur $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$, alors il existe des entiers a_i, h_i tels que $M = \oplus M_{a_i, h_i}$.

Démonstration. — Etant donnée la définition 4.5.1 de [Ked05], c'est le (a) du théorème 4.5.7 de [Ked05]. $\square$

Remarquons que la décomposition n'est pas canonique, mais que l'ensemble des pentes $s_i = a_i/h_i$ comptées avec multiplicités est canonique (cf. le (c) du théorème 4.5.7 de [Ked05]). Les rationnels que l'on obtient ainsi sont les *pent*es de M .

Corollaire 1.1.6. — Si M est un φ -module sur $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$, alors $1 - \varphi : M[1/t] \rightarrow M[1/t]$ est surjective.

Démonstration. — Si $n \geq 0$, alors $(1 - \varphi)(t^{-n}x) = t^{-n}(1 - p^{-n}\varphi)(x)$ et il suffit donc de montrer que si $n \gg 0$, alors $1 - p^{-n}\varphi : M \rightarrow M$ est surjectif. Etant donnée la proposition 1.1.5 ci-dessus et le fait que $M_{a,h}(-n) = M_{a-nh,h}$, c'est une conséquence immédiate du (b) de la proposition 4.1.3 de [Ked05]. $\square$

L'anneau $\mathbf{B}_{\text{max}}^{\varphi=1}$ (qui est égal à $\mathbf{B}_{\text{cris}}^{\varphi=1}$) occupe une place centrale dans cet article; il est traditionnellement noté $\mathbf{B}_e$. Etant donnée la définition de $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$, il est clair que l'on a $\mathbf{B}_e = (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t])^{\varphi=1}$.

Lemme 1.1.7. — On a $\mathbf{B}_e = (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t])^{\varphi=1}$.

Démonstration. — Si $x \in \mathbf{B}_e$, alors $x \in (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t])^{\varphi=1} \subset (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t])^{\varphi=1}$. Réciproquement, si $x \in (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t])^{\varphi=1}$, alors il existe $n \geq 0$ tel que $x = t^n x_n$ avec $x_n \in (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+)^{\varphi=p^n}$ et le lemme suit alors de la proposition 3.2 de [Ber02] qui nous dit que $(\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+)^{\varphi=p^n} = (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+)^{\varphi=p^n}$. $\square$

Lemme 1.1.8. — On a $\mathbf{B}_e^\times = \mathbf{Q}_p^\times$ et si $z \in \mathbf{B}_e$ engendre un $\mathbf{B}_e$ -module de rang 1 stable par G_K , alors $z \in \mathbf{Q}_p^\times$.

Démonstration. — Soient x et y dans $\mathbf{B}_e$ tels que $xy = 1$ et $v(x)$ et $v(y)$ leurs valuations t -adiques dans $\mathbf{B}_{\text{dR}}$. On a $v(x) + v(y) = 0$ et comme $\mathbf{B}_e \cap \text{Fil}^1 \mathbf{B}_{\text{dR}} = 0$, cela entraîne que $v(x) = v(y) = 0$. Le fait que $\mathbf{B}_e^\times = \mathbf{Q}_p^\times$ suit alors du fait que $\mathbf{B}_e \cap \text{Fil}^0 \mathbf{B}_{\text{dR}} = \mathbf{Q}_p$.

Si $z \in \mathbf{B}_e$ engendre un $\mathbf{B}_e$ -module de rang 1 stable par G_K , alors $g(z)/z \in \mathbf{Q}_p^\times$ si $g \in G_K$ et l'application $g \mapsto g(z)/z$ définit un caractère cristallin de G_K . Un résultat classique dit qu'un tel $z \in \mathbf{B}_{\text{max}}$ est de la forme $t^n z_0$ avec $n \in \mathbf{Z}$ et $z_0 \in \widehat{\mathbf{Q}}_p^{\text{nr}}$ et si en plus $\varphi(z) = z$, alors $z \in \mathbf{Q}_p^\times$. $\square$

En première approximation, on peut d'ailleurs penser à $\mathbf{B}_e$ comme à l'anneau des polynômes $P(Y) \in \mathbf{C}_p[Y]$ tels que $P(0) \in \mathbf{Q}_p$.

Proposition 1.1.9. — *L'anneau $\mathbf{B}_e$ est de Bézout.*

Démonstration. — Il suffit de montrer que si $f, g \in \mathbf{B}_e$, alors l'idéal qu'ils engendrent est principal. Soit $n \geq 0$ tel que $f, g \in t^{-n}(\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+)^{\varphi=p^n}$. Comme $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ est de Bézout, il existe $h \in \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ tel que $t^n f \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ + t^n g \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ = h \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$. En particulier, il existe $\alpha, \beta \in \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ tels que $t^n f \alpha + t^n g \beta = h$. En appliquant $\varphi^{\pm 1}$ à cette relation, on trouve que h et $\varphi(h)$ engendrent le même idéal de $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$. Par la proposition 3.3.2 de [Ked05], on peut (quitte à multiplier h par une unité) supposer que $\varphi(h) = p^m h$ avec $m \in \mathbf{Z}$; on en déduit que l'idéal de $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t]$ engendré par f et g est engendré par $h/t^m \in \mathbf{B}_e$.

Reste à voir que h/t^m est dans l'idéal de $\mathbf{B}_e$ engendré par f et g . On se ramène à montrer que si $f, g \in \mathbf{B}_e$ engendrent $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t]$, alors ils engendrent $\mathbf{B}_e$. Soit $n \geq 0$ tel que $t^n f, t^n g \in \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ et I l'idéal (principal) de $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ qu'ils engendrent. Considérons la suite exacte $0 \rightarrow M \rightarrow t^n f \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ \oplus t^n g \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ \rightarrow I \rightarrow 0$. Le $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ -module M est fermé et donc libre de rang fini (égal à 1) et c'est un φ -module. En tensorisant la suite exacte par $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t]$ (qui est plat sur $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$) et en prenant les invariants par φ , on trouve un morceau de suite exacte : $f \mathbf{B}_e \oplus g \mathbf{B}_e \rightarrow \mathbf{B}_e \rightarrow M[1/t]/(1 - \varphi)$ et on conclut par le corollaire 1.1.6. $\square$

Remarque 1.1.10. — L'anneau $\mathbf{B}_e$ est la réunion pour $n \geq 0$ des $t^{-n}(\mathbf{B}_{\text{max}}^+)^{\varphi=p^n}$ et chacun d'entre eux est un espace de Banach. La topologie de $\mathbf{B}_e$ est celle de la limite inductive, ce qui en fait un espace LF.

Si $h \geq 1$, soit $t_h \in \mathbf{B}_{\text{max}}^+$ l'élément construit dans [Col02, §9] (c'est une période d'un groupe de Lubin-Tate associé à l'uniformisante p de $\mathbf{Q}_{p^h}$) et dont les propriétés sont rappelées au début de [Col03, §2.4]. On a notamment $\varphi^h(t_h) = p t_h$ et $\prod_{j=0}^{h-1} \varphi^j(t_h) \in \mathbf{Q}_p^\times \cdot t$.

Lemme 1.1.11. — *Si $h \geq 1$ et $a \in \mathbf{Z}$, alors $(\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t])^{\varphi^h=p^a}$ est un $\mathbf{B}_e$ -module libre de rang h .*

Démonstration. — L'application $x \mapsto x/t_h^a$ est un isomorphisme de $(\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t])^{\varphi^h=p^a}$ sur $(\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t])^{\varphi^h=1}$. On se ramène donc au cas $a = 0$. Si $\omega \in \mathbf{Q}_{p^h}$ engendre une base normale de $\mathbf{Q}_{p^h}$ sur $\mathbf{Q}_p$, alors la matrice $(\varphi^{i+j}(\omega))_{1 \leq i, j \leq h}$ est inversible et l'application de $(\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t])^{\varphi^h=1}$ dans $\mathbf{Q}_{p^h} \otimes_{\mathbf{Q}_p} \mathbf{B}_e$ donnée par $x \mapsto \sum_{i=0}^{h-1} \varphi^i(\omega) \otimes \varphi^i(x)$ est un isomorphisme, d'où le lemme. $\square$

L'anneau $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}$ est muni d'une topologie de Fréchet, qui est définie par des valuations $V_{[r; s]}$ avec $s > r$. On appelle $\tilde{\mathbf{B}}^{[r; s]}$ le complété de $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}$ pour la valuation $V_{[r; s]}$ et $\mathbf{B}_K^{[r; s]}$ le complété de $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r}$. Les valuations $V_{[r; s]}$ et les anneaux $\tilde{\mathbf{B}}^{[r; s]}$ ont été définis dans [Ber02, §2.1] (où ils sont notés $\tilde{\mathbf{B}}_{[r; s]}$) et étudiés dans [Col03, Ked05] (entre autres) mais il faut faire attention au fait que les notations sont différentes. Les valuations sont indexées par des intervalles et si l'on pose $\rho(r) = (p-1)/pr$, alors notre intervalle $[r; s]$ coïncide avec l'intervalle $[\rho(s); \rho(r)]$ de [Col03] et de [Ked05].

Voici un tableau récapitulatif de quelques unes des notations :

Berger [Ber02]	Colmez [Col03]	Kedlaya [Ked05]
$\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger}$	$\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger}$	$\Gamma_{\text{an}, \text{con}}^{\text{alg}}$
$\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, \rho(r)}$	$\tilde{\mathbf{B}}^{[0; r]}$	$\Gamma_{\text{an}, r}^{\text{alg}}$
$\tilde{\mathbf{B}}_{[\rho(s); \rho(r)]}$	—	$\Gamma_{[r; s]}^{\text{alg}}$
$\tilde{\mathbf{B}}^{\dagger, \rho(r)}$	$\tilde{\mathbf{B}}^{(0; r]}$	$\Gamma_r^{\text{alg}}[1/p]$
$\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, \rho(r)}$	$\mathbf{B}_K^{[0; r]}$	$\Gamma_{\text{an}, r}$
$\mathbf{B}_K^{\dagger, \rho(r)}$	$\mathbf{B}_K^{(0; r]}$	$\Gamma_r[1/p]$

L'anneau $\tilde{\mathbf{B}}^{[r; s]}$ est muni d'une action de G_K et la méthode de Sen (cf. [Col01] et [BC07]) permet de simplifier grandement l'étude des $\tilde{\mathbf{B}}^{[r; s]}$ -représentations de G_K .

Proposition 1.1.12. — *L'anneau $\tilde{\Lambda} = \tilde{\mathbf{B}}^{[r; s]}$ vérifie les conditions (TS1), (TS2) et (TS3) avec $\Lambda_{H_K, n} = \varphi^{-n}(\mathbf{B}_K^{[p^n r; p^n s]})$ et $\text{val}_{\Lambda} = V_{[r; s]}$, les constantes $c_1 > 0$, $c_2 > 0$ et $c_3 > 1/(p-1)$ pouvant être choisies arbitrairement.*

Démonstration. — Ceci est démontré dans [Col03] : la condition (TS1) résulte du lemme 10.1, la condition (TS2) résulte de la proposition 8.12 et du fait que $\tilde{\mathbf{B}}_K^{[0; \rho(r)]}$ est dense dans $\tilde{\mathbf{B}}_K^{[r; s]}$ et la condition (TS3) résulte de la proposition 9.10 et de la même densité. $\square$

Lemme 1.1.13. — *Si $r \gg 0$ et si I est un intervalle contenu dans $[r; +\infty[$, alors $\mathbf{B}_K^I \cap \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r} = \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r}$.*

Démonstration. — Le corollaire 2.5.7 de [Ked05] nous dit que $x \in \mathbf{B}_K^J$ pour tout intervalle $I \subset J \subset [r; +\infty[$ ce qui fait que $x \in \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r}$. $\square$

1.2. Les (φ, Γ) -modules sur l'anneau de Robba. — Nous donnons quelques rappels et compléments concernant les résultats de Kedlaya (en essayant de renvoyer systématiquement à [Ked05] quand c'est possible) sur les pentes des φ -modules sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$. Rappelons qu'un φ -module sur un anneau R est un R -module libre D muni d'un Frobenius φ tel que $\varphi^*(D) = D$. Si cet anneau est en plus muni d'une action de Γ_K , alors un (φ, Γ) -module est un φ -module muni d'une action semi-linéaire et continue de Γ_K qui commute à φ . Nous renvoyons à l'article de Kedlaya pour la notion de pentes des φ -modules. Contentons-nous de dire que si D est un φ -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$ alors ses *pent*es sont les rationnels qui sortent de la proposition 1.1.5 appliquée à $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger} D$.

Lemme 1.2.1. — *Si D est un φ -module de rang 1 sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$, alors la pente de D appartient à $\mathbf{Z}$.*

Démonstration. — Cette pente appartient à l'image par val_p du corps des coefficients de $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$ et le lemme suit du fait que ce corps est une extension non ramifiée de K_0 . On peut aussi dire que la pente de $M_{a,1}$ est $a \in \mathbf{Z}$. $\square$

Définition 1.2.2. — Si D est un φ -module, son *degré* $\deg(D)$ est la pente de $\det(D)$.

Lemme 1.2.3. — *Si $s \in \mathbf{Q}$, alors un φ -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$ qui est une extension de φ -modules isoclines de pente s est lui-même isocline de pente s .*

Démonstration. — Ecrivons $s = n/d$; si on a une suite exacte $0 \rightarrow D_1 \rightarrow D \rightarrow D_2 \rightarrow 0$ avec D_1 et D_2 isoclines de pente s , alors on peut écrire $D_i = \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_K^\dagger} D_i^\dagger$ où $D_i^\dagger$ est un φ -module sur $\mathbf{B}_K^\dagger$ admettant une base dans laquelle $p^{-n}\text{Mat}(\varphi^d) \in \text{GL}_d(\mathbf{A}_K^\dagger)$. Le lemme résulte alors de la proposition 7.4.1 de [Ked05] qui nous permet de trouver une base de D dans laquelle $p^{-n}\text{Mat}(\varphi^d) \in \text{GL}_d(\mathbf{A}_K^\dagger)$. $\square$

Rappelons le résultat principal de [Ked04] (redémontré et généralisé dans [Ked05] et [Ked06]).

Théorème 1.2.4. — *Si D est un φ -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$, alors il existe une unique filtration $0 = D_0 \subset D_1 \subset \dots \subset D_\ell = D$ par des sous- φ -modules saturés, telle que :*

- (1) *pour tout $1 \leq i \leq \ell$, le quotient D_i/D_{i-1} est isocline ;*
- (2) *si l'on appelle s_i la pente de D_i/D_{i-1} , alors $s_1 < s_2 < \dots < s_\ell$.*

Remarque 1.2.5. — Plaçons-nous dans la situation du théorème 1.2.4 ci-dessus ; par la proposition 1.1.5, il existe des entiers a_j, h_j tels que $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger} D = \oplus M_{a_j, h_j}$. Cette décomposition n'est pas canonique, mais l'ensemble des a_j/h_j est bien défini et coïncide, si l'on compte les multiplicités, avec l'ensemble des s_i (cf. le corollaire 6.4.2 de [Ked05]).

Définition 1.2.6. — Si D est un φ -module de rang d sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$, alors (cf. [Ked04, p. 157]) son *polygone de Newton* $\text{NP}(D)$ est la réunion des segments d'extrémités (i, y_i) et $(i+1, y_{i+1})$ pour $0 \leq i \leq d-1$ où $y_0 = 0$ et $y_{i+1} - y_i$ est la $i+1$ -ième plus petite pente de D en comptant les multiplicités. Dans les notations du théorème 1.2.4, $\text{NP}(D)$ est la réunion des ℓ segments de longueur $\text{rg}(D_i/D_{i-1})$ et de pente s_i pour $1 \leq i \leq \ell$.

Remarquons que par le lemme 1.2.1, les sommets de $\text{NP}(D)$ sont à coordonnées entières. Le dernier sommet est de coordonnées $(\text{rg}(D), \deg(D))$.

Lemme 1.2.7. — Si D est un φ -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$ et si M est un sous- φ -module de D (pas nécessairement saturé ni de même rang), alors $\text{NP}(M)$ est au-dessus de $\text{NP}(D)$, et si $\text{NP}(M)$ et $\text{NP}(D)$ ont même extrémité, alors $M = D$.

Démonstration. — Si l'on appelle $\sigma_1, \dots, \sigma_d$ et $\tau_1, \dots, \tau_m$ les pentes de D et M prises avec multiplicité, l'affirmation « $\text{NP}(M)$ est au-dessus de $\text{NP}(D)$ » est équivalente au fait que pour tout $1 \leq k \leq \min(d, m)$, on a $\sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_k \leq \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_k$, ce qui revient à dire que pour tout $1 \leq k \leq \min(d, m)$, la plus petite pente de $\wedge^k D$ est inférieure ou égale à la plus petite pente de $\wedge^k M$. Ceci suit, après extension des scalaires à $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^\dagger$, du (a) de la proposition 4.5.14 de [Ked05].

Enfin si $\text{NP}(M)$ et $\text{NP}(D)$ ont même extrémité, alors M et D ont même rang (le rang étant la x -longueur du polygone de Newton) et $\det(M) = \alpha \cdot \det(D)$ où $\alpha \cdot \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$ est étale, $\text{NP}(M)$ et $\text{NP}(D)$ ayant la même extrémité. Par la proposition 3.3.2 de [Ked05], α est une unité de $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^\dagger$; c'est donc une unité de $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$, ce qui fait que $M = D$. $\square$

Corollaire 1.2.8. — Si $0 \rightarrow D_1 \rightarrow D \rightarrow D_2$ est une suite exacte de φ -modules, avec $\text{rg}(D) = \text{rg}(D_1) + \text{rg}(D_2)$, alors $\deg(D) \geq \deg(D_1) + \deg(D_2)$ et on a égalité si et seulement si $D \rightarrow D_2$ est surjective.

Démonstration. — Par le lemme 1.2.7 ci-dessus, on a $\deg(\text{im}(D \rightarrow D_2)) \geq \deg(D_2)$ avec égalité si et seulement si $D \rightarrow D_2$ est surjective. On se ramène donc à montrer que si on a une suite exacte $0 \rightarrow D_1 \rightarrow D \rightarrow D_2 \rightarrow 0$, alors $\deg(D) = \deg(D_2) + \deg(D_1)$. Ceci suit du fait que $\det \text{Mat}(\varphi | D) = \det \text{Mat}(\varphi | D_1) \cdot \det \text{Mat}(\varphi | D_2)$. $\square$

Pour terminer ce paragraphe, disons quelques mots de la « localisation en $\varepsilon^{(n)} - 1$ » ; si $n \geq 0$, alors on pose $r_n = p^{n-1}(p-1)$. Si $x = \sum_{k \gg -\infty} p^k [x_k] \in \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r_0}$ alors la série qui définit x converge dans $\mathbf{B}_{\text{dR}}^+$ et on en déduit un morphisme injectif noté ι_0 de $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r_0}$ dans $\mathbf{B}_{\text{dR}}^+$. Ce morphisme s'étend par continuité en un morphisme toujours injectif (voir la proposition 2.25 de [Ber02]) $\iota_0 : \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r_0} \rightarrow \mathbf{B}_{\text{dR}}^+$. Si $r > 0$, alors soit $n(r)$ le plus petit entier tel que $r_n \geq r$. Si $n \geq n(r)$, et si $x \in \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}$, alors $\varphi^{-n}(x) \in \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r/p^n} \subset \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r_0}$ et on en déduit un morphisme injectif $\iota_n = \iota_0 \circ \varphi^{-n} : \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r} \rightarrow \mathbf{B}_{\text{dR}}^+$. On pose $Q_1 = \varphi(X)/X$ et

$Q_n = \varphi^{n-1}(Q_1)$ ce qui fait que si $n \geq 1$, alors Q_n est le polynôme minimal de $\varepsilon^{(n)} - 1$. Par la proposition 4.8 de [Ber02], l'application $\theta \circ \iota_n : \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r} \rightarrow \mathbf{C}_p$ est surjective et son noyau est l'idéal engendré par Q_n . Par le lemme 5.11 de [Ber02], la restriction de ι_n à $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r}$ a pour image un sous-anneau dense (pour la topologie t -adique) de $K_n[[t]]$. Si D^r est un $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r}$ -module, cette application $\iota_n : \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r} \rightarrow K_n[[t]]$ nous permet de définir la localisation $K_n[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r}} D^r$ de D^r en $\varepsilon^{(n)} - 1$ pour $n \geq n(r)$. Cette construction est fondamentale autant dans cet article que dans [Ber04b].

2. Les B -paires

Une B -paire est un couple $W = (W_e, W_{dR}^+)$ où W_e est un $\mathbf{B}_e$ -module libre de rang fini muni d'une action semi-linéaire et continue de G_K (c'est-à-dire une $\mathbf{B}_e$ -représentation) et W_{dR}^+ est un $\mathbf{B}_{dR}^+$ -réseau de $W_{dR} = \mathbf{B}_{dR} \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e$ stable par G_K .

L'objet de ce chapitre est d'étudier la catégorie des B -paires, et le résultat principal est que cette catégorie est équivalente à la catégorie des (φ, Γ) -modules sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger}$.

2.1. La catégorie des B -paires. — Ce paragraphe est principalement consacré à donner des définitions relatives à la catégorie des B -paires.

Définition 2.1.1. — Si W est une B -paire, alors on appelle *dimension de W* le rang commun de W_e et de W_{dR}^+ .

Si W et X sont deux B -paires, un *morphisme de B -paires* $f : W \rightarrow X$ est la donnée de deux applications (f_e, f_{dR}^+) de W_e dans X_e et de W_{dR}^+ dans X_{dR}^+ telles que les deux applications induites par extension des scalaires à $\mathbf{B}_{dR}$ coïncident ; on appelle alors f_{dR} cette application.

Exemple 2.1.2. — Voici deux classes importantes de B -paires.

- (1) Si V est une représentation p -adique de G_K , alors $(\mathbf{B}_e \otimes_{\mathbf{Q}_p} V, \mathbf{B}_{dR}^+ \otimes_{\mathbf{Q}_p} V)$ est une B -paire notée $W(V)$;
- (2) si D est un (φ, N) -module filtré sur K , alors $((\mathbf{B}_{\text{st}} \otimes_{K_0} D)^{\varphi=1, N=0}, \text{Fil}^0(\mathbf{B}_{dR} \otimes_K D_K))$ est une B -paire notée $W(D)$.

Lemme 2.1.3. — Si W est une B -paire de dimension 1, alors il existe un caractère $\eta : G_K \rightarrow \mathbf{Q}_p^{\times}$ et $i \in \mathbf{Z}$ tels que $W_e = \mathbf{B}_e(\eta)$ et $W_{dR}^+ = t^i \mathbf{B}_{dR}^+$.

Démonstration. — La première assertion résulte du lemme 1.1.8 et la deuxième du fait que les idéaux fractionnaires de $\mathbf{B}_{dR}$ sont tous de la forme $t^i \mathbf{B}_{dR}^+$. $\square$

Lemme 2.1.4. — Si $f : W \rightarrow X$ est un morphisme de B -paires, alors $X_e/f_e(W_e)$ est sans torsion.

Démonstration. — Le $\mathbf{B}_e$ -module $\text{Sat} f_e(W_e)$ est libre de même rang que $f_e(W_e)$ et le lemme 1.1.8 montre que $\det f_e(W_e) = \det \text{Sat} f_e(W_e)$ ce qui fait que l'image de $f_e(W_e)$ est saturée dans X_e . $\square$

Remarque 2.1.5. — En revanche, $X_{dR}^+/f_{dR}^+(W_{dR}^+)$ peut avoir de la torsion (considérer par exemple l'application naturelle $(\mathbf{B}_e, t\mathbf{B}_{dR}^+) \rightarrow (\mathbf{B}_e, \mathbf{B}_{dR}^+)$). On dit que f est *strict* si $X_{dR}^+/f_{dR}^+(W_{dR}^+)$ est sans torsion. L'existence de morphismes non-stricts implique que la $\otimes$ -catégorie additive des B -paires n'est pas abélienne.

Définition 2.1.6. — Si W et X sont deux B -paires, on dit que W est un *sous-objet* de X s'il existe un morphisme injectif strict $f : W \rightarrow X$. Une *suite exacte* est une suite où les morphismes sont stricts et les conditions habituelles (image - noyau) sont satisfaites.

Lemme 2.1.7. — Si $f : W \rightarrow X$ est un morphisme de B -paires, alors $\ker(f) = (\ker(f_e), \ker(f_{dR}^+))$ est un sous-objet de W et $\text{im}(f) = (\text{im}(f_e), \text{im}(f_{dR}^+)) \subset X$ est une B -paire et la suite $0 \rightarrow \ker(f) \rightarrow W \rightarrow \text{im}(f) \rightarrow 0$ est exacte.

Définition 2.1.8. — Si W et X sont deux B -paires, on dit que W est une *modification* de X si $W_e \simeq X_e$.

2.2. Construction de (φ, Γ) -modules. — Dans ce paragraphe, on associe à toute B -paire un (φ, Γ) -module et on montre le théorème A de l'introduction. Les constructions qui permettent de relier la catégorie des B -paires et celle des (φ, Γ) -modules sont proches de celles qu'on trouve dans l'article [Col03], notamment les §§2, 3 et 10.

Rappelons que si $n \geq 0$, alors on pose $r_n = p^{n-1}(p-1)$ et que si $r > 0$, alors $n(r)$ est le plus petit entier tel que $r_n \geq r$. Si W est une B -paire est si $n \geq n(r)$, alors l'application $\iota_n : \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}[1/t] \rightarrow \mathbf{B}_{dR}$ nous donne un morphisme $\iota_n : \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e \rightarrow \mathbf{B}_{dR} \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e = W_{dR}$.

Lemme 2.2.1. — Si W est une B -paire, et si $\tilde{D}^r(W) = \{y \in \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e \text{ tels que } \iota_n(y) \in W_{dR}^+ \text{ pour tout } n \geq n(r)\}$, alors :

- (1) $\tilde{D}^r(W)$ est un $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}$ -module libre de rang d ;
- (2) $\tilde{D}^r(W)[1/t] = \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e$;
- (3) $\tilde{D}^r(W)$ est stable par G_K et $\varphi(\tilde{D}^r(W)) = \tilde{D}^{pr}(W)$.

Démonstration. — Commençons par remarquer que si $n \geq n(r)$, alors l'image de $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e$ par l'application ι_n est dense dans W_{dR} . Soit $\tilde{D}_{n(r)}^r(W) = \{y \in \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e \text{ tels que } \iota_{n(r)}(y) \in W_{dR}^+\}$; c'est un $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}$ -module libre de rang d (il est engendré par d éléments dont les images forment une base de W_{dR}^+). Par ailleurs $\tilde{D}^r(W)$ est fermé dans $\tilde{D}_{n(r)}^r(W)$ et par la proposition 1.1.1, $\tilde{D}^r(W)$ est libre de rang $\leq d$.

Montrons que si $x \in \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e$, alors il existe $m \geq 0$ tel que $t^m x \in \tilde{\mathbf{D}}^r(W)$ ce qui implique que $\tilde{\mathbf{D}}^r(W)$ est un $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}$ -module libre de rang d et que $\tilde{\mathbf{D}}^r(W)[1/t] = \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e$. Si $e_1, \dots, e_d$ est une base de W_e , alors il existe m_1 tel que pour tout $n \geq n(r)$, l'image par ι_n des $t^{m_1} e_i$ appartient à W_{dR}^+ (si c'est vrai pour un n , c'est vrai pour tous car $\varphi(e_i) = e_i$). Comme $\mathbf{B}_e = \cup_{j \geq 0} t^{-j} (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+)^{\varphi=p^j}$, il existe m_2 tel que $t^{m_2} x$ appartient au $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}$ -module engendré par les e_i . On peut alors prendre $m = m_1 + m_2$.

Ceci démontre les points (1) et (2), et le (3) est une évidence. $\square$

Lemme 2.2.2. — *Pour tout $n \geq n(r)$, l'image de $\tilde{\mathbf{D}}^r(W)$ par ι_n contient une base de W_{dR}^+ et si $\tilde{\mathbf{D}}' \subset \tilde{\mathbf{D}}^r(W)$ est un sous- $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}$ -module fermé stable par G_K qui a cette propriété, alors $\tilde{\mathbf{D}}' = \tilde{\mathbf{D}}^r(W)$.*

Démonstration. — Soient $n \geq n(r)$ et $x_1, \dots, x_d$ des éléments de $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e$ dont les images par ι_n forment une base de W_{dR}^+ . Si $\ell \geq 0$ est tel que $t^\ell x_i \in \tilde{\mathbf{D}}^r(W)$ pour tout i , alors posons $y_i = (t/Q_n)^\ell x_i$. Pour tout $m \geq n(r)$ on a $\iota_m(y_i) \in W_{dR}^+$ et par ailleurs $\iota_n(y_i) = \text{invertible} \cdot \iota_n(x_i)$ ce qui fait que l'image de $\tilde{\mathbf{D}}^r(W)$ par ι_n contient bien une base de W_{dR}^+ .

Pour montrer l'unicité, on se ramène au cas de rang 1 en prenant le déterminant. Il faut donc montrer que si $x \in \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}$ engendre un idéal stable par G_K et si $\iota_n(x)$ est une unité de $\mathbf{B}_{dR}^+$ pour tout $n \geq n(r)$, alors x est une unité. Soit $\eta : G_K \rightarrow (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r})^\times = (\tilde{\mathbf{B}}^{\dagger,r})^\times$ le cocycle $g \mapsto g(x)/x$. Par la proposition 4.2.1 de [BC07], l'anneau $\tilde{\mathbf{B}}^{\dagger,r}$ satisfait les conditions de Tate-Sen et il existe donc une extension finie L de K , un entier $m \geq 0$ et une unité $y \in (\tilde{\mathbf{B}}^{\dagger,r})^\times$ tels que $h(xy) = xy$ si $h \in H_L$ et $g(xy)/xy \in \varphi^{-m}(\mathbf{B}_L^{\dagger,p^{mr}})$ si $g \in G_K$. Le lemme 3.2.5 de [BC07] montre alors que, quitte à augmenter m , on a $xy \in \varphi^{-m}(\mathbf{B}_L^{\dagger,p^{mr}})$. Si $L_0 \subset L$ est une sous-extension non ramifiée de L , alors $N_{L/L_0}(\varphi^m(xy))$ est un élément de $\mathbf{B}_{L_0}^{\dagger,p^{mr}}$ qui engendre un idéal stable par un sous-groupe ouvert de Γ_L . Un raisonnement analogue à celui du lemme I.3.2 de [Ber04a] montre que cet idéal est engendré par un élément de la forme $\prod_{n \geq n(r)} (Q_{n+m}/p)^{\alpha_n}$ et la condition selon laquelle $\iota_n(x)$ est une unité de $\mathbf{B}_{dR}^+$ pour tout $n \geq n(r)$ nous dit que les α_n sont tous nuls, ce qui fait que $\varphi^m(xy)$ est une unité, et donc que x est une unité. $\square$

En particulier, si $s \geq r$, alors l'application naturelle $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,s} \otimes_{\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}} \tilde{\mathbf{D}}^r(W) \rightarrow \tilde{\mathbf{D}}^s(W)$ est un isomorphisme.

Définition 2.2.3. — On définit $\tilde{\mathbf{D}}(W) = \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger} \otimes_{\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}} \tilde{\mathbf{D}}^r(W)$ et si I est un intervalle contenu dans $[r; +\infty[$, alors on pose $\tilde{\mathbf{D}}^I(W) = \tilde{\mathbf{B}}^I \otimes_{\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}} \tilde{\mathbf{D}}^r(W)$.

Le lemme 2.2.2 ci-dessus montre que cela ne dépend pas du choix de $r \in I$. Remarquons en particulier que si $J \subset I$, alors $\tilde{\mathbf{D}}^J(W) = \tilde{\mathbf{B}}^J \otimes_{\tilde{\mathbf{B}}^I} \tilde{\mathbf{D}}^I(W)$.

Proposition 2.2.4. — Si W est une B -paire, et si I est un intervalle, alors il existe $j \geq 0$ et une extension finie L de K tels que pour tout $k \geq 0$, il existe un $\mathbf{B}_L^{p^{j+k}I}$ -module $D_L^{p^{j+k}I}$ libre de rang fini vérifiant :

- (1) $\tilde{\mathbf{B}}^{p^{j+k}I} \otimes_{\mathbf{B}_L^{p^{j+k}I}} D_L^{p^{j+k}I} = \tilde{D}^{p^{j+k}I}(W)$;
- (2) $\varphi^*(D_L^{p^{j+k}I}) = D_L^{p^{j+k+1}I}$;
- (3) les images de $D_L^{p^{j+k}I}$ et $D_L^{p^{j+k+1}I}$ dans $\tilde{D}^{p^{j+k}I \cap p^{j+k+1}I}(W)$ engendrent le même $\mathbf{B}_L^{p^{j+k}I \cap p^{j+k+1}I}$ -module.

Démonstration. — Si l'on se donne une base de $\tilde{D}^I(W)$, alors l'action de G_K est donnée par une application $G_K \rightarrow \text{GL}_d(\tilde{\mathbf{B}}^I)$ et il existe une extension finie L de K telle que l'image de G_L par cette application soit incluse dans l'ensemble des matrices M vérifiant $V_I(1 - M) > c_1 + 2c_2 + 2c_3$. Par la proposition 1.1.12, $\tilde{\mathbf{B}}^I$ satisfait les conditions de Tate-Sen et la proposition 3.2.6 de [BC07] nous fournit alors une nouvelle base de $\tilde{D}^I(W)$ et $n \geq 0$ tels que l'application $G_K \rightarrow \text{GL}_d(\tilde{\mathbf{B}}^I)$ est triviale sur H_L et à valeurs dans $\text{GL}_d(\varphi^{-n}(\mathbf{B}_L^{p^n I}))$. Si $D_L^{p^n I}$ est le $\mathbf{B}_L^{p^n I}$ -module engendré par φ^n de cette base, alors $\tilde{D}^{p^n I}(W) = \tilde{\mathbf{B}}^{p^n I} \otimes_{\mathbf{B}_L^{p^n I}} D_L^{p^n I}$.

Posons $J = p^n I \cap p^{n+1}I$ et $D_L^{p^{j+k+1}I} = \varphi^*(D_L^{p^{j+k}I})$ pour $k \geq 0$. Si J est vide, alors il suffit de prendre $j = n$, les conditions (1) et (2) étant vérifiées et la condition (3) vide. Supposons donc que J est non vide ; l'unicité dans la méthode de Sen (cf. la démonstration du (3) de la proposition 3.3.1 de [BC07]) ne nous donne pas la condition (3), mais nous dit qu'il existe $m \geq 0$ tel que :

$$\varphi^{-m}(\mathbf{B}_L^{p^m J}) \otimes_{\mathbf{B}_L^{p^n I}} D_L^{p^n I} = \varphi^{-m}(\mathbf{B}_L^{p^m J}) \otimes_{\mathbf{B}_L^{p^{n+1}I}} D_L^{p^{n+1}I}.$$

En appliquant φ^m à cette relation, on voit que (3) est satisfaite en prenant $j = m + n$. $\square$

Proposition 2.2.5. — Si $W = (W_e, W_{dR}^+)$ est une B -paire de dimension d , alors il existe un unique (φ, Γ_K) -module $D(W)$ sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$ tel que $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger} D(W) = \tilde{D}(W)$.

Démonstration. — Choisissons un intervalle I tel que $I \cap pI$ est non vide. Le (3) de la proposition 2.2.4 nous fournit une collection compatible de $\mathbf{B}_L^{p^{j+k}I}$ -modules, et par la définition 2.8.1 et le théorème 2.8.4 de [Ked05], il existe un $\mathbf{B}_{\text{rig}, L}^\dagger$ -module $D_L(W)$ libre de rang d et tel que $D_L^{p^{j+k}I} = \mathbf{B}_L^{p^{j+k}I} \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, L}^\dagger} D_L(W)$ pour $k \geq 0$. La condition (1) implique que $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, L}^\dagger} D_L(W) = \tilde{D}(W)$ et la condition (2) implique que $D_L(W)$ est un φ -module. Par ailleurs $D_L(W)$ est stable sous l'action de G_K et H_L agit trivialement dessus, puisque c'est vrai pour chaque $D_L^{p^{j+k}I}$. Enfin, le lemme 4.2.5 de [BC07] montre que l'extension $\mathbf{B}_{\text{rig}, L}^\dagger / \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$ vérifie les conditions de la proposition 2.2.1 de descente étale de [BC07] ce qui fait que l'on a $D_L(W) = \mathbf{B}_{\text{rig}, L}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger} D_L(W)^{H_K}$ et on peut donc prendre $D(W) = D_L(W)^{H_K}$. Ceci montre l'existence de $D(W)$.

Passons à l'unicité. Si D_1 et D_2 satisfont les conclusions de la proposition, choisissons des bases de D_1 et D_2 , et appelons G_i la matrice de $\gamma \in \Gamma_K$ sur D_i et M la matrice de passage d'une base à l'autre, ce qui fait que $G_1 M = \gamma(M) G_2$. On se donne $r \gg 0$ tel que toutes ces matrices ont leurs coefficients dans $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r}$ et I un intervalle contenu dans $[r; +\infty[$. La partie « unicité » de la méthode de Sen nous dit qu'il existe $n \geq 0$ tel que $M \in \text{GL}_d(\varphi^{-n}(\mathbf{B}_K^{p^n I}))$. Comme $\mathbf{B}_K^{p^n I} \cap \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, p^n r} = \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, p^n r}$ par le lemme 1.1.13, on trouve que $M \in \text{GL}_d(\varphi^{-n}(\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, p^n r}))$. Si P_1 et P_2 sont les matrices de φ sur D_1 et D_2 , alors $P_1 M = \varphi(M) P_2$ et donc si $M \in \text{GL}_d(\varphi^{-n}(\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger}))$, alors $M \in \text{GL}_d(\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger})$, ce qui fait que $D_1 = D_2$. $\square$

Rappelons que si D est un φ -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger}$, alors pour $r \gg 0$ on note D^r le $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r}$ -module fourni par le théorème I.3.3 de [Ber04b]. En particulier $D^{pr} = \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, pr} \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r}} D^r$ et D^{pr} a une base contenue dans $\varphi(D^r)$. Par exemple, $D^r(W) = \tilde{D}^r(W) \cap D(W)$ si $r \gg 0$.

Proposition 2.2.6. — *Si D est un (φ, Γ_K) -module de rang d sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger}$, alors :*

- (1) $W_e(D) = (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger}[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger}} D)^{\varphi=1}$ est un $\mathbf{B}_e$ -module libre de rang d stable sous l'action de G_K ;
- (2) $W_{dR}^+(D) = \mathbf{B}_{dR}^+ \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r_n}} D^{r_n}$ ne dépend pas de $n \gg 0$ et c'est un $\mathbf{B}_{dR}^+$ -module libre de rang d stable sous l'action de G_K ;
- (3) le couple $W(D) = (W_e(D), W_{dR}^+(D))$ est une B -paire.

Démonstration. — Il est clair que $W_e(D)$ est un $\mathbf{B}_e$ -module stable sous l'action de G_K . Reste à montrer qu'il est libre de rang d . Pour cela, soit $\oplus M_{a_i, h_i}$ une décomposition de $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger} \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger}} D$ en φ -modules élémentaires fournie par la proposition 1.1.5. On a $W_e(D) = \oplus (M_{a_i, h_i}[1/t])^{\varphi=1}$. On vérifie que l'application $(M_{a, h}[1/t])^{\varphi=1} \rightarrow \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t]$ qui à $\sum_{i=0}^{h-1} x_i e_i$ associe x_0 est un isomorphisme entre $(M_{a, h}[1/t])^{\varphi=1}$ et $(\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+[1/t])^{\varphi^h = p^{-a}}$, et le (1) suit alors du lemme 1.1.11.

Pour montrer le (2), remarquons que par le théorème I.3.3 de [Ber04b], on a $\varphi^*(D^{r_n}) = D^{r_{n+1}}$ pour $n \gg 0$ et donc le $\mathbf{B}_{dR}^+$ -module engendré par $\varphi^{-n}(D^{r_n})$ ne dépend pas de $n \gg 0$. Comme D^{r_n} est libre de rang d et stable par G_K , il en est de même pour $W_{dR}^+(D)$.

Montrons maintenant le (3) : $W_{dR}(D) = \mathbf{B}_{dR} \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e(D)$ est un $\mathbf{B}_{dR}$ -espace vectoriel de dimension d , réunion croissante des $\mathbf{B}_{dR}$ -espaces vectoriels $\mathbf{B}_{dR} \otimes_{\mathbf{B}_e} (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r_n}[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r_n}} D^{r_n})^{\varphi=1}$ ce qui fait que si $n \gg 0$, alors :

$$W_{dR}(D) = \mathbf{B}_{dR} \otimes_{\mathbf{B}_e} (\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger, r_n}[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r_n}} D^{r_n})^{\varphi=1} \subset \mathbf{B}_{dR} \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r_n}} D^{r_n} = \mathbf{B}_{dR} \otimes_{\mathbf{B}_{dR}^+} W_{dR}^+(D).$$

En comparant les dimensions, on voit que l'on a en fait égalité et donc que $W_{dR}^+(D)$ est un réseau de $W_{dR}(D)$. $\square$

Théorème 2.2.7. — *Les foncteurs $W \mapsto D(W)$ et $D \mapsto W(D)$ sont inverses l'un de l'autre et donnent une équivalence de catégories entre la catégorie des B -paires et la catégorie des (φ, Γ_K) -modules sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$.*

Démonstration. — On vérifie que ces deux foncteurs sont inverses l'un de l'autre en utilisant le fait que :

$$\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^\dagger[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger} D(W) = \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^\dagger[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_e} W$$

dans la proposition 2.2.5 et que :

$$\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^\dagger[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e(D) = \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^\dagger[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger} D$$

dans la proposition 2.2.6, puis en identifiant les différents objets (c'est un exercice instructif que nous laissons au lecteur ; il faut utiliser l'unicité dans la proposition 2.2.5). $\square$

Remarque 2.2.8. — Les modifications de (φ, Γ_K) -modules correspondent à des modifications de B -paires. Par exemple :

- (1) Si W et X sont deux B -paires, alors $W_e \simeq X_e$ si et seulement si $D(W)[1/t] \simeq D(X)[1/t]$;
- (2) si $W = (W_e, W_{dR}^+)$ est une B -paire, alors $D((W_e, t^n W_{dR}^+)) = t^n D(W)$.

Proposition 2.2.9. — *Le foncteur $D \mapsto W(D)$ réalise une équivalence de catégories entre la catégorie des (φ, Γ_K) -modules étales et la catégorie des B -paires de la forme $W(V) = (\mathbf{B}_e \otimes_{\mathbf{Q}_p} V, \mathbf{B}_{dR}^+ \otimes_{\mathbf{Q}_p} V)$ où V est une représentation p -adique de G_K .*

On retrouve alors (en appliquant le (b) du théorème 6.3.3 de [Ked05], qui nous dit que le foncteur naturel de la catégorie des (φ, Γ_K) -modules étales sur $\mathbf{B}_K^\dagger$ vers la catégorie des (φ, Γ_K) -modules étales sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$ est une équivalence de catégories) le résultat principal de [CC98], c'est-à-dire l'équivalence de catégories entre représentations p -adiques et (φ, Γ_K) -modules étales, avec une démonstration proche de celle de [BC07].

Dans le paragraphe 3.2, nous reviendrons sur le problème de la description « explicite » des B -paires dont le (φ, Γ) -module associé est isocline.

2.3. Théorie de Hodge p -adique. — Dans ce paragraphe, nous généralisons les notions habituelles de théorie de Hodge p -adique aux B -paires.

Définition 2.3.1. — Si $\heartsuit \in \{\text{cris}, \text{st}, \text{dR}\}$, et si W est une B -paire, alors on dit que W est *cristalline* (ou *semi-stable* ou *de de Rham*) si la $\mathbf{B}_{\heartsuit}$ -représentation $\mathbf{B}_{\heartsuit} \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e$ est triviale. On pose $D_{\heartsuit}(W) = (\mathbf{B}_{\heartsuit} \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e)^{G_K}$.

Remarquons que si V est une représentation p -adique, alors bien sûr V est cristalline (ou semi-stable, ou de de Rham, ou de Hodge-Tate) si et seulement si $W(V)$ l'est.

Lemme 2.3.2. — Si D est un (φ, N) -module sur K_0 , alors $(\mathbf{B}_{\text{st}} \otimes_{K_0} D)^{\varphi=1, N=0}$ est un $\mathbf{B}_e$ -module libre de rang $d = \dim(D)$.

Démonstration. — Si $u \in \mathbf{B}_{\text{st}}$ vérifie $N(u) = 1$, alors on a $\mathbf{B}_{\text{st}} = \mathbf{B}_{\text{max}}[u]$ et si $x \in (\mathbf{B}_{\text{st}} \otimes_{K_0} D)^{N=0}$, alors on peut écrire $x = x_0 + ux_1 + \cdots + u^e x_e$ avec $x_i \in \mathbf{B}_{\text{max}} \otimes_{K_0} D$. Par la proposition 11.7 de [Col02], l'application $x \mapsto x_0$ de $(\mathbf{B}_{\text{st}} \otimes_{K_0} D)^{N=0}$ dans $\mathbf{B}_{\text{max}} \otimes_{K_0} D$ est un isomorphisme, et on se ramène donc à montrer que si D est un φ -module sur K_0 , alors $(\mathbf{B}_{\text{max}} \otimes_{K_0} D)^{\varphi=1}$ est un $\mathbf{B}_e$ -module libre de rang d . Par le théorème de Dieudonné-Manin, $\widehat{\mathbf{Q}}_p^{\text{nr}} \otimes_{K_0} D$ se décompose en somme directe de φ -modules élémentaire M_{a_i, h_i} . L'application $x = \sum_{j=0}^{h-1} x_j e_j \mapsto x_0$ de $(\mathbf{B}_{\text{max}} \otimes_{\widehat{\mathbf{Q}}_p^{\text{nr}}} M_{a, h})^{\varphi=1}$ dans $\mathbf{B}_{\text{max}}^{\varphi^h=p^{-a}}$ est un isomorphisme, et le lemme résulte alors du lemme 1.1.11. $\square$

Proposition 2.3.3. — Si W est une B -paire, alors :

- (1) $D_{\text{st}}(W)$ est un (φ, N) -module sur K_0 et $D_{\text{cris}}(W) = D_{\text{st}}(W)^{N=0}$;
- (2) $D_{\text{dR}}(W)$ est un K -espace vectoriel filtré avec $\text{Fil}^i(D_{\text{dR}}(W)) = D_{\text{dR}}(W) \cap t^i W_{\text{dR}}^+$ et l'application naturelle $K \otimes_{K_0} D_{\text{st}}(W) \rightarrow D_{\text{dR}}(W)$ est injective ;
- (3) si W est semi-stable, alors $W_e = (\mathbf{B}_{\text{st}} \otimes_{K_0} D_{\text{st}}(W))^{\varphi=1, N=0}$ et $W_{\text{dR}}^+ = \text{Fil}^0(\mathbf{B}_{\text{dR}} \otimes_K D_{\text{dR}}(W))$;
- (4) si D est un (φ, N) -modules filtré, et si $W_e(D) = (\mathbf{B}_{\text{st}} \otimes_{K_0} D)^{\varphi=1, N=0}$ et $W_{\text{dR}}^+(D) = \text{Fil}^0(\mathbf{B}_{\text{dR}} \otimes_K D)$, alors $W(D) = (W_e(D), W_{\text{dR}}^+(D))$ est une B -paire semi-stable.

Démonstration. — Exercice (ce n'est pas différent du cas des représentations p -adiques semi-stables). $\square$

À la lumière du théorème 2.2.7, l'étude des B -paires de de Rham revient à l'étude des (φ, Γ_K) -modules « localement triviaux » au sens de [Ber04b], ce qui est fait en détail dans [Ber04b].

Si D est un (φ, N) -module filtré, on note $\mathcal{M}(D)$ le (φ, Γ_K) -module construit dans [Ber04b, §II.2]. Rappelons que :

$$\mathcal{M}(D) = \{y \in (\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger}[\log(X), 1/t] \otimes_{K_0} D)^{N=0} \mid \iota_n(y) \in \text{Fil}^0(K_n((t)) \otimes_K D_K) \forall n \gg 0\}.$$

Proposition 2.3.4. — Les foncteurs $W \mapsto D_{\text{st}}(W)$ et $D \mapsto W(D)$ sont inverses l'un de l'autre et donnent une équivalence de catégories entre la catégorie des B -paires semi-stables et la catégorie des (φ, N) -modules filtrés.

Si W est une B -paire, alors $D(W) = \mathcal{M}(D_{\text{st}}(W))$ et donc si D est un (φ, N) -module filtré, alors $W(D) = W(\mathcal{M}(D))$.

Démonstration. — Ces affirmations ne présentent aucune difficulté. $\square$

Théorème 2.3.5. — *Le théorème de monodromie p -adique et le théorème « faiblement admissible implique admissible » sont vrais. De fait,*

- (1) *toute B -paire de de Rham est potentiellement semi-stable ;*
- (2) *le foncteur $W \mapsto D_{\text{st}}(W)$ réalise une équivalence de catégories entre la catégorie des objets de la forme $W(V)$ où V est une représentation p -adique et la catégorie des (φ, N) -modules filtrés admissibles.*

Démonstration. — Montrons tout d’abord le (1). Soit W une B -paire et $D(W)$ le (φ, Γ_K) -module associé. Si W est de de Rham, alors pour $n \gg 0$, la $\mathbf{B}_{\text{dR}}$ -représentation $\mathbf{B}_{\text{dR}} \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r_n}} D^{r_n}(W)$ est égale à $\mathbf{B}_{\text{dR}} \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e$ et donc triviale, ce qui fait par le théorème 3.9 de [Fon04] que le $K_{\infty}((t))$ -module à connexion $K_{\infty}((t)) \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger, r_n}} D^{r_n}(W)$ est trivial. Etant donnée la définition III.1.2 de [Ber04b], on est en mesure d’en appliquer le théorème A de [Ber04b], qui nous dit qu’il existe une extension finie L de K et un (φ, N) -module filtré D sur L tels que $D(W|_L) = \mathcal{M}(D)$ et donc que $W|_L$ est semi-stable. Ceci montre le (1). Le (2) suit du théorème A de [CF00] ou bien (si l’on préfère passer par les (φ, Γ_K) -modules) du théorème B de [Ber04b]. $\square$

Rappelons que si U est une $\mathbf{C}_p$ -représentation de G_K , alors la réunion $U_{\text{fini}}^{H_K}$ des sous- K_{∞} -espaces vectoriels de dimension finie stables par Γ_K de U^{H_K} a la propriété que l’application $\mathbf{C}_p \otimes_{K_{\infty}} U_{\text{fini}}^{H_K} \rightarrow U$ est un isomorphisme (cf. [Sen80]). L’espace $U_{\text{fini}}^{H_K}$ est muni de l’application K_{∞} -linéaire $\nabla_U = \log(\gamma)/\log_p(\chi(\gamma))$ avec $\gamma \in \Gamma_K \setminus \{1\}$ suffisamment proche de 1.

Définition 2.3.6. — Si W est une B -paire, alors $W_{\text{dR}}^+/tW_{\text{dR}}^+$ est une $\mathbf{C}_p$ -représentation de G_K et on pose $D_{\text{Sen}}(W) = (W_{\text{dR}}^+/tW_{\text{dR}}^+)_{\text{fini}}^{H_K}$. On pose $\Theta_{\text{Sen}} = \nabla_W$ et on dit que W est de Hodge-Tate si Θ_{Sen} est diagonalisable à valeurs propres appartenant à $\mathbf{Z}$. Ces entiers sont les *poinds de Hodge-Tate* de W .

3. Les (φ, Γ) -modules

Etant donné le théorème 2.2.7, l’étude des B -paires revient à l’étude des (φ, Γ) -modules. Dans ce chapitre, nous montrons plusieurs résultats sur les (φ, Γ) -modules : modification, classification des objets isoclines, classification des objets de hauteur finie.

3.1. Modification de (φ, Γ) -modules. — Si D est un φ -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^{\dagger}$ et si $n \geq n(r)$ avec $r \gg 0$, rappelons que D^r/Q_n est un K_n -espace vectoriel de dimension $\text{rg}(D)$. Soit $M = \{M_n\}_{n \geq n(r)}$ une famille φ -compatible de sous- K_n -espaces vectoriels de D^r/Q_n , c’est-à-dire que pour tout $n \geq n(r)$, M_{n+1} est engendré par les $\varphi(y)$ où $y \in D^r$ est tel que son image dans D^r/Q_n appartient à M_n . En d’autres termes, on a un isomorphisme

$K_{n+1} \otimes_{K_n} (D^r/Q_n) \rightarrow D^{pr}/Q_{n+1}$ obtenu en quotientant l'isomorphisme $\varphi^*(D^r) \simeq D^{pr}$ par $\varphi(Q_n) = Q_{n+1}$, et qui est donc donné par $\alpha \otimes \overline{m} \mapsto \alpha \otimes \overline{\varphi(m)}$ et on demande que M_{n+1} soit l'image de $K_{n+1} \otimes_{K_n} M_n$ par cet isomorphisme (voir [Ber04b, §II.1] pour une condition analogue).

Définition 3.1.1. — Une telle famille $M = \{M_n\}_{n \geq n(r)}$ de sous-espaces vectoriels de D^r/Q_n est appelée une *donnée de modification* de D . On définit alors $D[M] = \{y \in D \text{ dont l'image dans } D^r/Q_n \text{ appartient à } M_n\}$.

Proposition 3.1.2. — Si D est un φ -module de rang d sur $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^\dagger$ et si M est une donnée de modification, alors $D[M]$ est un φ -module et de plus :

- (1) si $M \subset N$, alors $D[M] \subset D[N]$ et si $D[M] = D[N]$, alors $M = N$;
- (2) $D[M] = D$ si $M_n = D^r/Q_n$ pour tout n , et $D[0] = t \cdot D$;
- (3) $\deg(D[M]) = \deg(D) + d - \dim(M)$;
- (4) si D est un (φ, Γ_K) -module et si M est stable par Γ_K , alors $D[M]$ est un (φ, Γ_K) -module.

Démonstration. — Rappelons que $t = \log(1 + X) = X \cdot \prod_{n \geq 0} Q_n/p$ ce qui fait que $t \cdot D \subset D[M]$ quel que soit M . La définition de $D[M]$ implique que c'est un sous-module fermé de D , et comme il contient $t \cdot D$, il est libre de rang d . Le fait que c'est un φ -module résulte du fait que la famille des M_n est φ -compatible.

Le fait que si $M \subset N$, alors $D[M] \subset D[N]$ est évident. Remarquons que si l'image de $x \in D$ appartient à M_n , alors $x \cdot t/Q_n \in D[M]$ et son image dans D^r/Q_n est (un multiple de) x ce qui fait que l'image de $D[M]$ dans D^r/Q_n est M_n et en particulier que si $D[M] = D[N]$, alors $M = N$. Ceci montre le (1). Le (2) est une évidence.

Pour montrer le (3), prenons un drapeau $\{0\} = M^{(0)} \subset M^{(1)} \subset \dots \subset M^{(d)}$ tel que $M^{(\dim(M))} = M$. On en déduit une suite de φ -modules $t \cdot D = D^{(0)} \subset \dots \subset D^{(d)} = D$ et donc une suite de φ -modules de rang 1 :

$$\det(t \cdot D) = \det(D^{(0)}) \subset \dots \subset \det(D^{(d)}) = \det(D).$$

Leurs pentes forment une suite strictement décroissante (si on a égalité des pentes, on a égalité des modules par le lemme 1.2.7) de $d + 1$ nombres entiers (ils sont entiers par le lemme 1.2.1) dont le premier est $d + \deg(D)$ et le dernier est $\deg(D)$, ce qui fait que $\deg(D^{(m)})$ est forcément $\deg(D) + d - \dim(M)$. Enfin, le (4) est une évidence. $\square$

Proposition 3.1.3. — Si M est une donnée de modification de D et si l'on a une suite exacte $0 \rightarrow D_1 \rightarrow D \rightarrow D_2 \rightarrow 0$, alors :

- (1) $\{M_n \cap D_1^r/Q_n\}$ est une donnée de modification pour D_1 et $\{\text{im}(M_n \rightarrow D_2^r/Q_n)\}$ est une donnée de modification pour D_2 ;

(2) on a une suite exacte $0 \rightarrow D_1[M] \rightarrow D[M] \rightarrow D_2[M] \rightarrow 0$.

Démonstration. — Le (1) suit du fait que les M_n sont φ -compatibles et que les D_i^r/Q_n le sont aussi. Passons au (2); on a clairement une suite exacte $0 \rightarrow D_1[M] \rightarrow D[M] \rightarrow D_2[M]$. Par le (3) de la proposition 3.1.2, on a :

- (1) $\deg(D_1[M]) = \deg(D_1) + \dim(D_1) - \dim(M_n \cap D_1^r/Q_n)$;
- (2) $\deg(D[M]) = \deg(D) + \dim(D) - \dim(M_n)$;
- (3) $\deg(D_2[M]) = \deg(D_2) + \dim(D_2) - \dim(\text{im}(M_n \rightarrow D_2^r/Q_n))$.

On en déduit que $\deg(D[M]) = \deg(D_1[M]) + \deg(D_2[M])$, et le corollaire 1.2.8 implique alors que la suite $0 \rightarrow D_1[M] \rightarrow D[M] \rightarrow D_2[M] \rightarrow 0$ est exacte. $\square$

Remarque 3.1.4. — Si M et N sont deux données de modification telles que $M \cap N = 0$, alors on a un isomorphisme $D[M][N] = D[M \oplus N]$ (il y a une inclusion évidente; comparer les degrés).

Théorème 3.1.5. — Si D est un φ -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^\dagger$, alors il existe un φ -module étale $D' \subset D[1/t]$ tel que $D'[1/t] = D[1/t]$.

De plus, si D est un (φ, Γ_K) -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^\dagger$, alors il existe une extension finie L de K et un (φ, Γ_L) -module étale D' sur $\mathbf{B}_{\text{rig},L}^\dagger$ tel que $D' \subset \mathbf{B}_{\text{rig},L}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^\dagger} D[1/t]$ et $D'[1/t] = \mathbf{B}_{\text{rig},L}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^\dagger} D[1/t]$.

Démonstration. — Commençons par la première assertion. Il suffit de montrer qu'il existe un nombre fini de modifications successives (au sens de la proposition 3.1.2) de D dont le résultat est isocline de pente entière (si D est isocline de pente s , alors $t \cdot D$ est isocline de pente $s + 1$). Remarquons que si on a une suite exacte $0 \rightarrow D_1 \rightarrow D \rightarrow D_2 \rightarrow 0$, alors il est toujours possible de modifier D_1 ou D_2 sans toucher à l'autre, en choisissant M convenablement.

Étape 1 : si D est isocline, alors D se modifie en une extension successive de φ -modules de pentes entières. En effet, si D est isocline, modifions le par un M de codimension 1 ce qui augmente le degré de D de 1. Si $D[M]$ est isocline de pente non entière, alors on répète cette opération. Le résultat est donc, après un nombre fini de modifications, que D devient isocline de pente entière (et on a terminé l'étape 1) ou bien que D se casse en deux morceaux. Dans ce dernier cas, on a terminé par récurrence sur la dimension de D .

Étape 2 : si D est extension successive de φ -modules de pentes entières, alors il se modifie en un φ -module isocline de pente entière. On se ramène au cas d'une extension de deux φ -modules de pentes entières $0 \rightarrow D_1 \rightarrow D \rightarrow D_2 \rightarrow 0$ avec D_i isocline de pente s_i . Dans ce cas :

- (1) si $s_2 = s_1$, alors on a terminé par le lemme 1.2.3;

(2) si $s_2 < s_1$, alors la modification est facile à écrire : on remplace D par D' , l'ensemble des $y \in D$ dont l'image dans D_2 appartient à $t^{s_1-s_2}D_2$, ce qui fait que l'on a une suite exacte $0 \rightarrow D_1 \rightarrow D' \rightarrow t^{s_1-s_2}D_2 \rightarrow 0$ et on a terminé par le lemme 1.2.3 ;

(3) si $s_1 < s_2$, alors on modifie D par une donnée nulle sur D_1 et surjective sur D_2 ce qui augmente s_1 de 1 et on itère cette opération $s_2 - s_1$ fois.

Ceci montre le premier point. Si D est un (φ, Γ_K) -module, alors il faut voir que l'on peut faire toutes les modifications de manière compatible à l'action de Γ_K , c'est-à-dire choisir des données de modification stables sous l'action de Γ_K . C'est toujours le cas dans l'étape 2, mais dans l'étape 1 il faut choisir un sous-espace de D^r/Q_n stable sous Γ_K et de codimension 1. On voit que pour cela, il peut être nécessaire d'étendre les scalaires à une extension finie L de K pour qu'il existe une base dans laquelle $\text{Mat}(\gamma \in \Gamma_L)$ est triangulaire supérieure. $\square$

Corollaire 3.1.6. — Si W_e est une $\mathbf{B}_e$ -représentation de G_K , alors il existe une extension finie L de K et une représentation p -adique V de G_L telle que $W_{e|L} = \mathbf{B}_e \otimes_{\mathbf{Q}_p} V$.

Démonstration. — Soit W_{dR}^+ un $\mathbf{B}_{dR}^+$ -réseau stable par G_K de $\mathbf{B}_{dR} \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e$ et $D = D(W)$ le (φ, Γ_K) -module associé à la B -paire $W = (W_e, W_{dR}^+)$ par le théorème 2.2.7. Par le théorème 3.1.5, il existe une extension finie L de K et un (φ, Γ_L) -module étale $D' \subset \mathbf{B}_{\text{rig},L}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^\dagger} D[1/t]$ tel que $D'[1/t] = \mathbf{B}_{\text{rig},L}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^\dagger} D[1/t]$. La B -paire $W' = W(D')$ vérifie alors $W'_e = W_{e|L}$ par le (1) de la remarque 2.2.8 ; par la proposition 2.2.9, il existe une représentation p -adique V de G_L telle que $W'_e = W_{e|L} = \mathbf{B}_e \otimes_{\mathbf{Q}_p} V$. $\square$

Remarque 3.1.7. — Dans le corollaire 3.1.6 ci-dessus, on est loin d'avoir unicité. Par exemple, si D est un (φ, N) -module sur K_0 et si $W_e = (\mathbf{B}_{\text{st}} \otimes_{K_0} D)^{\varphi=1, N=0}$, alors $W_e = \mathbf{B}_e \otimes_{\mathbf{Q}_p} V$ pour toute représentation V qui s'obtient comme $V_{\text{st}}(D)$ à partir d'une filtration admissible sur $K \otimes_{K_0} D$.

3.2. Classification des objets isoclines. — Le théorème 2.2.7 nous donne une filtration sur les B -paires, et il est intéressant de décrire les B -paires correspondant aux (φ, Γ_K) -modules isoclines. Le cas étale relève de la proposition 2.2.9.

Définition 3.2.1. — Si $h \geq 1$ et $a \in \mathbf{Z}$ sont premiers entre eux, soit $\text{Rep}(a, h)$ la catégorie dont les objets sont les $\mathbf{Q}_{p^h}$ -espaces vectoriels $V_{a,h}$ de dimension finie, munis d'une action semi-linéaire de G_K et d'un Frobenius lui aussi semi-linéaire $\varphi : V_{a,h} \rightarrow V_{a,h}$ qui commute à G_K et qui vérifie $\varphi^h = p^a$. Les morphismes sont ceux que l'on imagine.

Remarque 3.2.2. — (1) Si $V_{a,h} \in \text{Rep}(a, h)$, alors $\dim_{\mathbf{Q}_{p^h}}(V_{a,h})$ est divisible par h (si e est cette dimension, alors $\varphi^h = p^{ae}$ sur $\det(V_{a,h})$) ;

(2) si $h = 1$ et $a = 0$, alors on retrouve simplement la catégorie des représentations p -adiques de G_K ;

(3) si $e \in \mathbf{Z}$, alors $\text{Rep}(a, h)$ et $\text{Rep}(a + eh, h)$ sont équivalentes de manière évidente ;

(4) si D est un φ -module isocline de pente a/h sur K_0 , alors le théorème de Dieudonné-Manin implique que $V_{a,h} = (\widehat{\mathbf{Q}}_p^{\text{nr}} \otimes_{K_0} D)^{\varphi^h=p^a}$ est un objet de $\text{Rep}(a, h)$ dont la dimension en tant que $\mathbf{Q}_{p^h}$ -espace vectoriel est $\dim_{K_0}(D)$. Dans ce cas, l'action de $I_K \subset G_K$ sur $V_{a,h}$ est d'ailleurs triviale.

Si $V_{a,h} \in \text{Rep}(a, h)$, alors on pose $W_e(V_{a,h}) = (\mathbf{B}_{\text{max}} \otimes_{\mathbf{Q}_{p^h}} V_{a,h})^{\varphi=1}$ et $W_{dR}^+(V_{a,h}) = \mathbf{B}_{dR}^+ \otimes_{\mathbf{Q}_{p^h}} V_{a,h}$.

Théorème 3.2.3. — Si $V_{a,h} \in \text{Rep}(a, h)$, alors $W(V_{a,h}) = (W_e(V_{a,h}), W_{dR}^+(V_{a,h}))$ est une B -paire et le foncteur $V_{a,h} \mapsto W(V_{a,h})$ définit une équivalence de catégories entre $\text{Rep}(a, h)$ et la catégorie des B -paires W telles que $D(W)$ est isocline de pente a/h .

Démonstration. — Il est clair que $W = W(V_{a,h})$ est une B -paire. Par ailleurs, la construction de $D(W)$ fournie par le lemme 2.2.1 et la proposition 2.2.5 montre que l'on a $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D(W) = \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ \otimes_{\mathbf{Q}_{p^h}} V_{a,h}$ ce qui fait que $D(W)$ est isocline de pente a/h .

Réciproquement, si D est un (φ, Γ_K) -module isocline de pente a/h , alors par la proposition 1.1.5, on a une décomposition $\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D = \bigoplus_{i=1}^k M_{a,h} = \bigoplus_{i=1}^k \bigoplus_{j=0}^{h-1} \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ \varphi^j(e_i)$ où $e_i, \varphi(e_i), \dots, \varphi^{h-1}(e_i)$ est une base de la i -ième copie de $M_{a,h}$. On voit alors que $\sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^{h-1} \lambda_{ij} \varphi^j(e_i) \in (\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D)^{\varphi^h=p^a}$ si et seulement si on a $\varphi^h(\lambda_{ij}) = \lambda_{ij}$ pour tous i, j et comme $(\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+)^{\varphi^h=1} = \mathbf{Q}_{p^h}$, on trouve que $V_{a,h} = (\widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+ \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D)^{\varphi^h=p^a}$ est un $\mathbf{Q}_{p^h}$ -espace vectoriel de dimension $\text{rg}(D)$ qui hérite d'une action de G_K et d'un Frobenius tel que $\varphi^h = p^a$. Si W est une B -paire telle que $D(W)$ est isocline de pente a/h , alors on lui associe l'espace $V_{a,h}$ construit à partir de $D(W)$. Le lecteur vérifiera qu'on a ainsi défini un foncteur inverse de $V_{a,h} \mapsto W(V_{a,h})$. $\square$

Il sera intéressant de calculer les extensions d'objets isoclines ; les extensions de (φ, Γ) -modules sont étudiées dans [Liu07].

3.3. Les (φ, Γ) -modules de hauteur finie. — Comme l'anneau $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+ = \mathbf{B}_{\text{rig},K}^+ \cap \widetilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+$ n'a de bonnes propriétés que si $K \subset K_0(\mu_{p^\infty})$, on suppose que cette condition est vérifiée dans tout ce paragraphe. Dans ce cas, $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$ s'identifie à l'ensemble des séries $f(X) = \sum_{k \geq 0} f_k X^k$ qui convergent sur le disque unité ouvert, ce qui en fait un anneau de Bézout, et si on pose $\mathbf{B}_K^+ = \mathbf{B}_{\text{rig},K}^+ \cap \mathbf{B}_K^+$, alors $\mathbf{B}_K^+ = K_0 \otimes_{\mathcal{O}_{K_0}} \mathcal{O}_{K_0}[[X]]$.

Définition 3.3.1. — On dit qu'un (φ, Γ) -module D sur $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$ est de hauteur finie s'il existe un (φ, Γ) -module D^+ sur $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$ tel que $D = \mathbf{B}_{\text{rig},K}^+ \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D^+$ et on dit qu'une B -paire W est de hauteur finie si $D(W)$ l'est.

Remarquons qu'un (φ, Γ) -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+$ est un $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+$ -module D^+ stable par φ et Γ tel que $\det \varphi$ est inversible dans $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$ (et non dans $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+$ ce qui serait trop restrictif).

Lemme 3.3.2. — *Si $K \subset K_0(\mu_{p^\infty})$, alors la définition ci-dessus est compatible avec la définition habituelle quand $W = W(V)$.*

Démonstration. — Si $W = W(V)$ avec V de hauteur finie au sens habituel (cf. [Col99]), alors il est évident que W est de hauteur finie. Montrons donc la réciproque. Par hypothèse, il existe une base de $D(V)$ dans laquelle $\text{Mat}(\varphi) = P^+ \in \text{M}_d(\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+)$ et une base de $D^\dagger(V)$ dans laquelle $\text{Mat}(\varphi) = P^\dagger \in \text{GL}_d(\mathbf{B}_K^\dagger)$. Soit M la matrice de passage d'une base à l'autre. La proposition 6.5 de [Ked04] montre que l'on peut écrire $M = M^+ \cdot M^\dagger$ avec $M^+ \in \text{GL}_d(\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+)$ et $M^\dagger \in \text{GL}_d(\mathbf{B}_K^\dagger)$. Dans la base de $D^\dagger(V)$ obtenue en appliquant $M^\dagger$ à celle de $D^\dagger(V)$, on a $\text{Mat}(\varphi) = \varphi(M^+)P^+(M^+)^{-1} = \varphi(M^\dagger)^{-1}P^\dagger(M^\dagger)$, ce qui fait que cette matrice est à coefficients dans $\mathbf{B}_K^\dagger \cap \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+ = \mathbf{B}_K^+$. Il en va de même pour la matrice de $\gamma \in \Gamma_K$. $\square$

Lemme 3.3.3. — *Si D^+ est un (φ, Γ) -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+$, alors il existe des entiers $\alpha_0, \dots, \alpha_m$ tels que l'idéal engendré par $\det(\varphi)$ est engendré par $X^{\alpha_0}Q_1^{\alpha_1} \dots Q_m^{\alpha_m}$ et si K est une extension finie de $\mathbf{Q}_p$, alors $\alpha_0 = 0$.*

Démonstration. — Ce lemme se trouve dans la partie B.1.6 de [Wac96] mais nous en donnons une démonstration pour la commodité du lecteur. Comme l'action de φ commute à Γ_K , l'idéal engendré par $\det(\varphi)$ est stable par Γ_K et la première partie du lemme suit alors du lemme I.3.2 de [Ber04a] et du fait que si cet idéal est inversible dans $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger$, alors les α_j sont presque tous nuls.

Si $\delta = \det(\varphi)$ et $g = \det(\gamma)$ pour $\gamma \in \Gamma_K$, alors $\gamma(\delta)/\delta = \varphi(g)/g$ et en réduisant modulo X , on trouve que $\chi(\gamma)^{\alpha_0}$ s'écrit $\varphi(g_0)/g_0$ avec $g_0 \in K_0$. Si K est une extension finie de $\mathbf{Q}_p$, alors $\varphi(g_0)/g_0$ est de norme 1 et donc $\chi(\gamma)^{\alpha_0[K_0:\mathbf{Q}_p]} = 1$ ce qui fait que $\alpha_0 = 0$. $\square$

Le lecteur vicieux montrera que si le corps résiduel de K est algébriquement clos, alors on peut effectivement avoir $\alpha_0 \neq 0$.

Définition 3.3.4. — Un φ -module filtré sur K_0 avec action de Γ_K est un φ -module D sur K_0 muni d'une action de Γ_K commutant à φ et d'une filtration (décroissante, exhaustive et séparée) stable par Γ_K sur $D_\infty = K_\infty \otimes_{K_0} D$.

Il existe alors un entier $n \geq 0$ tel que la filtration de D_∞ est définie sur K_n , c'est-à-dire que si l'on pose $D_n = K_n \otimes_{K_0} D$, alors $\text{Fil}^i D_\infty = K_\infty \otimes_{K_n} \text{Fil}^i D_n$ pour tout $i \in \mathbf{Z}$ et on appelle $n(D)$ le plus petit entier ayant cette propriété.

Proposition 3.3.5. — Si D est un φ -module filtré sur K_0 avec action de Γ_K , alors la B -paire $W = ((\mathbf{B}_{\text{max}} \otimes_{K_0} D)^{\varphi=1}, \mathbf{B}_{\text{dR}}^+ \otimes_{K_\infty} D_\infty)$ est de hauteur finie.

Démonstration. — Soit $h \geq 0$ tel que $\text{Fil}^h D_\infty = 0$ et $\text{Fil}^{-h} D_\infty = D_\infty$. Si $n \geq 1$, on écrit φ^{-n} pour ι_n . Posons alors comme dans [Col03, §3.1] :

$$\mathcal{M}^+(D) = \{y \in t^{-h} \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+ \otimes_{K_0} D \mid \varphi^n(y) \in \text{Fil}^0(K_\infty((t)) \otimes_{K_\infty} D_\infty) \forall n \in \mathbf{Z}\}.$$

C'est un sous- $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+$ -module fermé de $t^{-h} \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+ \otimes_{K_0} D$ qui contient $t^h \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+ \otimes_{K_0} D$ et qui est donc libre de rang $d = \dim(D)$. Il est de plus manifestement stable par φ et Γ_K .

Si $n \geq n(D)$, alors :

$$K_n[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+}^{\iota_n} t^{-h} \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+ \otimes_{K_0} D = t^{-h} K_n[[t]] \otimes_{K_0} D \supset \text{Fil}^0(K_n((t)) \otimes_{K_n} D_n).$$

Si $y_n \in \text{Fil}^0(K_n((t)) \otimes_{K_n} D_n)$ et $w \geq 0$, il existe donc $y \in t^{-h} \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+ \otimes_{K_0} D$ donc l'image par ι_n vérifie $\iota_n(y) - y_n \in \text{Fil}^w(K_n((t)) \otimes_{K_n} D_n)$. L'élément $z = y \cdot (t/Q_n)^{2h}$ a alors la propriété que $\iota_n(z)$ est un multiple de $\iota_n(y)$ et que pour tout $m \in \mathbf{Z}$ différent de $-n$, on a $\varphi^m(z) \in \text{Fil}^0(K_\infty((t)) \otimes_{K_\infty} D_\infty)$ ce qui fait que $z \in \mathcal{M}^+(D)$. On en déduit que si $n \geq n(D)$, alors l'application :

$$K_n[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+}^{\iota_n} \mathcal{M}^+(D) \rightarrow \text{Fil}^0(K_n((t)) \otimes_{K_n} D_n)$$

est un isomorphisme. En particulier, l'application naturelle $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} \mathcal{M}^+(D) \rightarrow \tilde{D}(W)$ est un isomorphisme et donc, en utilisant l'unicité dans la proposition 2.2.5, on trouve que $D(W) = \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} \mathcal{M}^+(D)$ ce qui fait que W est de hauteur finie. Remarquons que dans les notations de [Ber04b], on a $\mathcal{M}(D) = \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} \mathcal{M}^+(D)$. $\square$

Remarque 3.3.6. — Le fait de ne considérer que les $y \in t^{-h} \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+ \otimes_{K_0} D$ tels que l'on a $\varphi^n(y) \in \text{Fil}^0(K_\infty((t)) \otimes_{K_\infty} D_\infty)$ pour tout $n \in \mathbf{Z}$ n'est pas restrictif; le lecteur pourra montrer que :

$$\mathcal{M}^+(D) = \{y \in \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+[1/t] \otimes_{K_0} D \mid \varphi^n(y) \in \text{Fil}^0(K_\infty((t)) \otimes_{K_\infty} D_\infty) \forall n \in \mathbf{Z}\}.$$

Si $a, b \in \mathbf{Z}$ sont tels que $\text{Fil}^{-a+1} D = 0$ et $\text{Fil}^{-b} D = D$ (c'est-à-dire que les *poids* de D sont dans l'intervalle $[a; b]$), alors on a $t^b \cdot \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+ \otimes_{K_0} D \subset \mathcal{M}^+(D) \subset t^a \cdot \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+ \otimes_{K_0} D$.

En appliquant la proposition 3.3.5 à $D_{\text{cris}}(V)$, on retrouve le théorème principal de [Col99] généralisé dans [BB06].

Corollaire 3.3.7. — Si V est une représentation de G_K qui devient cristalline sur une extension K_n de K , alors V est de hauteur finie.

On peut d'ailleurs se demander quand est-ce que $W(D)$ est cristalline.

Lemme 3.3.8. — Si V est une représentation de Γ_K , alors :

- (1) V est cristalline si et seulement si $V = \bigoplus_{j \in \mathbf{Z}} V^{\Gamma_K = \chi^j}$;
- (2) V est de Hodge-Tate si et seulement si elle est potentiellement cristalline.

Démonstration. — Le (1) est l'objet du lemme 3.4.3 de [Per94], mais nous en donnons une nouvelle démonstration. Pour cela, observons que $D_{\text{Sen}}(V) = K_{\infty} \otimes_{\mathbf{Q}_p} V$ et donc que V est de Hodge-Tate si et seulement si ∇_V est diagonalisable à valeurs propres entières sur $K_{\infty} \otimes_{\mathbf{Q}_p} V$; ceci est équivalent à demander qu'il existe $n \geq 0$ tel que $K_n \otimes_{\mathbf{Q}_p} V = \bigoplus_{j \in \mathbf{Z}} (K_n \otimes_{\mathbf{Q}_p} V)^{\Gamma_{K_n} = \chi^j}$. Comme $(K_n \otimes_{\mathbf{Q}_p} V)^{\Gamma_{K_n} = \chi^j} = K_n \otimes_{\mathbf{Q}_p} V^{\Gamma_{K_n} = \chi^j}$, et qu'une représentation d'image finie de Γ_K est cristalline si et seulement si elle est triviale, on en déduit le (1) et le (2). $\square$

Corollaire 3.3.9. — Si D est un (φ, Γ_K) -module filtré sur K_0 , alors la B -paire construite ci-dessus est cristalline si et seulement si $D = \bigoplus_{j \in \mathbf{Z}} D^{\Gamma = \chi^j}$.

Démonstration. — Comme $W_e = (\mathbf{B}_{\max} \otimes_{K_0} D)^{\varphi=1}$, on a $\mathbf{B}_{\max} \otimes_{\mathbf{B}_e} W_e = \mathbf{B}_{\max} \otimes_{K_0} D$ ce qui fait que W est cristalline si et seulement si D est cristalline en tant que représentation de Γ_K . Le corollaire suit alors du lemme 3.3.8 ci-dessus. $\square$

Proposition 3.3.10. — Si D est un (φ, Γ_K) -module de hauteur finie, alors il existe un φ -module filtré D sur K_0 avec action de Γ_K tel que $D = \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+ \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} \mathcal{M}^+(D)$.

Démonstration. — Soit D^+ un (φ, Γ_K) -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+$ tel que $D = \mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+ \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} D^+$ et $D = D^+/X$. Soit $\nabla = \log(\gamma)/\log_p(\chi(\gamma))$ pour $\gamma \in \Gamma_K$ proche de 1.

Commençons par montrer que si $P \in K_0[T]$ est un polynôme tel que $P(\nabla) : D(j) \rightarrow D(j)$ est bijectif pour tout $j \geq 1$, alors l'application $(D^+)^{P(\nabla)=0} \rightarrow D^{P(\nabla)=0}$ est bijective. Pour cela, nous montrons d'abord que l'application :

$$(K_0[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} D^+)^{P(\nabla)=0} \rightarrow D^{P(\nabla)=0}$$

est bijective. Le fait qu'elle est injective ne pose pas de problème : si $y \in K_0[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} D^+$ est dans son noyau, et si j est un entier ≥ 1 tel que $y \in t^j K_0[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} D^+$, alors $P(\nabla)(y) = 0$ dans $t^j K_0[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} D^+/t^{j+1} = D(j)$ et donc $y \in t^{j+1} K_0[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} D^+$, ce qui fait en itérant que $y = 0$. Montrons à présent la surjectivité ; si $\bar{z} \in D^{P(\nabla)=0}$, alors il existe $z_0 \in D^+$ qui relève $\bar{z}$ et tel que $P(\nabla)(z_0) \in XD^+$ et l'hypothèse selon laquelle $P(\nabla) : D(j) \rightarrow D(j)$ est bijectif pour tout $j \geq 0$ nous permet de construire par récurrence $z_j \in z_{j-1} + X^j D^+$ tel que $P(\nabla)(z_j) \in X^{j+1} D^+$ et donc $z \in (K_0[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} D^+)^{P(\nabla)=0}$ relevant $\bar{z}$ ce qui fait que notre application est bien bijective.

Montrons à présent que $(K_0[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} D^+)^{P(\nabla)=0} = (D^+)^{P(\nabla)=0}$. Pour cela, remarquons que $(K_0[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig}, K}^+} D^+)^{P(\nabla)=0}$ est un K_0 -espace vectoriel de dimension finie (puisque'il s'injecte dans D) stable par φ . Si l'on choisit une base de D^+ et que l'on appelle Q la

matrice de φ dans cette base, et si l'on choisit une base de $(K_0[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D^+)^{P(\nabla)=0}$ et que l'on appelle P_0 la matrice de φ dans cette base et Y la matrice de passage entre les deux bases, alors on a $\varphi(Y)Q = P_0Y$ et donc $Y = P_0^{-1}\varphi(Y)Q$. Ecrivons $Q = \sum_{k \geq 0} Q_k t^k$ et $Y = \sum_{k \geq 0} Y_k t^k$. Si M est une matrice à coefficients dans K_0 , notons $\text{val}_p(M)$ le minimum des valuations de ses coefficients. Comme $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+ \subset \mathbf{Q}_p \otimes_{\mathbf{Z}_p} \mathbf{Z}_p[[t/p]]$ (n'oublions pas que $X = \exp(t) - 1$), on voit qu'il existe un entier h_1 tel que $\text{val}_p(Q_k) \geq -h_1 - k$ et il existe par ailleurs un entier h_2 tel que $\text{val}_p(P_0^{-1}) \geq -h_2$; posons $h = h_1 + h_2$. On déduit alors de l'équation $Y = P_0^{-1}\varphi(Y)Q$ que $Y = P_0^{-1}\varphi(P_0^{-1}) \cdot \varphi^2(Y) \cdot \varphi(Q)Q$ et (comme $\text{val}_p(p^k Q_k) \geq -h_1$) que :

$$\begin{aligned} \text{val}_p(Y_k) &\geq -2h + \min_{0 \leq \ell \leq k} (2\ell + \text{val}_p(Y_\ell) - \ell) \\ &= -2h + \min_{0 \leq \ell \leq k} (\ell + \text{val}_p(Y_\ell)). \end{aligned}$$

On en déduit par récurrence sur $k \geq 2h$ que si $k \geq 2h$, alors $\text{val}_p(Y_k) \geq -2h + \min_{0 \leq \ell \leq 2h} \text{val}_p(Y_\ell)$ et donc, comme $\mathcal{O}_{K_0}[[t]] \subset \mathcal{O}_{K_0}[[X/p]]$, que :

$$(K_0[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D^+)^{P(\nabla)=0} = ((K_0 \otimes_{\mathcal{O}_{K_0}} \mathcal{O}_{K_0}[[X/p]]) \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D^+)^{P(\nabla)=0}.$$

Pour terminer, on utilise de nouveau le fait que $((K_0 \otimes_{\mathcal{O}_{K_0}} \mathcal{O}_{K_0}[[X/p]]) \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D^+)^{P(\nabla)=0}$ est un K_0 -espace vectoriel de dimension finie stable par φ , et que si $n \geq 0$, alors :

$$\varphi(K_0 \otimes_{\mathcal{O}_{K_0}} \mathcal{O}_{K_0}[[X^{p^n}/p]]) \subset K_0 \otimes_{\mathcal{O}_{K_0}} \mathcal{O}_{K_0}[[X^{p^{n+1}}/p]]$$

pour conclure que $(K_0[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D^+)^{P(\nabla)=0} = (D^+)^{P(\nabla)=0}$ puisque $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+ = \bigcap_{n \geq 0} K_0 \otimes_{\mathcal{O}_{K_0}} \mathcal{O}_{K_0}[[X^{p^n}/p]]$.

Revenons à notre espace $D = D^+/X$ et soit Q le polynôme minimal de ∇ . On voit que l'on peut écrire $Q = PR$ où P est non trivial et a la propriété que $P(X+j) \wedge P(X) = 1$ pour tout $j \geq 1$, ce qui revient à dire que $P(\nabla) : D(j) \rightarrow D(j)$ est bijectif. Si $P \neq Q$, alors soit j le plus petit entier tel que $P(X+j) \wedge P(X) \neq 1$; on vient de montrer que l'application $(D^+)^{P(\nabla)=0} \rightarrow D^{P(\nabla)=0}$ est un isomorphisme, et si l'on remplace D^+ par $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+ \otimes_{K_0} (D^+)^{P(\nabla)=0} + X^j D^+$, alors on a toujours $D = \mathbf{B}_{\text{rig},K}^+ \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D^+$ mais on peut prendre P de degré plus grand. En itérant cette opération un nombre fini de fois, on voit donc que quitte à remplacer D^+ par un sous-module, on peut supposer que l'application $(D^+)^{Q(\nabla)=0} \rightarrow D^{Q(\nabla)=0} = D$ est un isomorphisme.

On fait alors un léger abus de notation, et on pose $D = (D^+)^{Q(\nabla)=0}$; c'est un φ -module sur K_0 avec action de Γ_K . Remarquons que $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+ \otimes_{K_0} D \subset D^+$ et que le déterminant de l'inclusion est un idéal de $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$ stable par Γ_K et par φ (car $\varphi : D \rightarrow D$ est bijectif) ce qui fait, par le lemme I.3.2 de [Ber04a], que $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+[1/t] \otimes_{K_0} D = \mathbf{B}_{\text{rig},K}^+[1/t] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D^+$. Par le lemme 3.3.3, le déterminant de φ sur D^+ est de la forme $X^{\alpha_0} Q_1^{\alpha_1} \cdots Q_m^{\alpha_m}$. Si $n \geq m$,

alors l'application déduite du Frobenius :

$$K_{n+1}[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+}^{\iota_{n+1}} D^+ \rightarrow K_{n+1}[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+}^{\iota_n} D^+$$

est un isomorphisme et la définition :

$$\text{Fil}^i(D_\infty) = D_\infty \cap t^i K_\infty[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+}^{\iota_n} D^+$$

ne dépend donc pas de $n \geq m$. Si $y \in D^+$ et $n \geq n(D) = m$, alors $\iota_n(y) \in \text{Fil}^0(K_n((t)) \otimes_{K_n} D_n)$ et si $n \geq -n(D)$, alors $\varphi^n(y) = \iota_{n(D)}(\varphi^{n+n(D)}(y))$ ce qui fait que pour tout $n \in \mathbf{Z}$, on a $\varphi^n(y) \in \text{Fil}^0(K_\infty((t)) \otimes_{K_\infty} D_\infty)$ et donc $D^+ \subset \mathcal{M}^+(D)$. Il reste à constater que pour tout $n \geq n(D)$, on a :

$$K_n[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+}^{\iota_n} D^+ = K_n[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+}^{\iota_n} \mathcal{M}^+(D)$$

ce qui fait que $D = \mathbf{B}_{\text{rig},K}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} D^+ = \mathbf{B}_{\text{rig},K}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} \mathcal{M}^+(D)$. $\square$

Deux φ -modules filtrés sur K_0 avec action de Γ_K différents peuvent donner le même (φ, Γ_K) -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$. Par exemple, si on a moralement $D_1 = K_0$ et $D_2 = K_0 \cdot t$, alors $\mathcal{M}^+(D_1) = \mathcal{M}^+(D_2) = \mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$. Cet exemple est représentatif comme le montre la proposition ci-dessous :

Proposition 3.3.11. — *Si D_1 et D_2 sont deux φ -modules filtrés sur K_0 avec action de Γ_K , alors $\mathcal{M}^+(D_1) = \mathcal{M}^+(D_2)$ si et seulement s'il existe un isomorphisme $K_0[t, t^{-1}] \otimes_{K_0} D_1 = K_0[t, t^{-1}] \otimes_{K_0} D_2$ compatible à φ et Γ_K , et compatible à la filtration quand on étend les scalaires à $K_\infty((t))$.*

Démonstration. — La construction de $\mathcal{M}^+(D)$ montre que ce module ne dépend que de $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+[1/t] \otimes_{K_0} D$ et de la filtration sur $K_\infty((t)) \otimes_{K_0} D$ ce qui fait que si les conditions de la proposition sont vérifiées, alors $\mathcal{M}^+(D_1) = \mathcal{M}^+(D_2)$. On voit réciproquement que si $\mathcal{M}^+(D_1) = \mathcal{M}^+(D_2)$, alors $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+[1/t] \otimes_{K_0} D_1 = \mathbf{B}_{\text{rig},K}^+[1/t] \otimes_{K_0} D_2$ et cet isomorphisme est compatible à la filtration quand on étend les scalaires à $K_\infty((t))$. Si G_1 et G_2 sont les matrices d'un élément $\gamma \in \Gamma_K$ qui n'est pas de torsion, et si M est la matrice de l'isomorphisme entre $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+[1/t] \otimes_{K_0} D_1$ et $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+[1/t] \otimes_{K_0} D_2$ alors on a $\gamma(M)G_1 = G_2M$, et si l'on écrit $M = \sum_{i \gg -\infty} t^i M_i$, alors on voit que l'on a $\chi(\gamma)^i M_i G_1 = G_2 M_i$ et donc que si $M_i \neq 0$, alors $\chi(\gamma)^i$ est quotient d'une valeur propre de G_1 par une valeur propre de G_2 , ce qui n'est possible que pour un nombre fini de valeurs de i . On en déduit que M est à coefficients dans $K_0[t, t^{-1}]$ et donc que $K_0[t, t^{-1}] \otimes_{K_0} D_1 = K_0[t, t^{-1}] \otimes_{K_0} D_2$. $\square$

Afin de terminer la démonstration du théorème D, il nous faut montrer que si $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} \mathcal{M}^+(D_1) = \mathbf{B}_{\text{rig},K}^\dagger \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} \mathcal{M}^+(D_2)$, alors $\mathcal{M}^+(D_1) = \mathcal{M}^+(D_2)$. Cela suit de la proposition ci-dessous.

Proposition 3.3.12. — Si $D = \mathbf{B}_{\text{rig},K}^+ \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+} \mathcal{M}^+(D)$, et si D^+ est un (φ, Γ_K) -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$ de rang d contenu dans D , alors $D^+ \subset \mathcal{M}^+(D)$.

Démonstration. — Si D^+ est un (φ, Γ_K) -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$ de rang d contenu dans D , alors par le lemme 3.3.3, $\det(\varphi \mid D^+)$ est un idéal de $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$ de la forme $X^{\alpha_0} Q_1^{\alpha_1} \cdots Q_m^{\alpha_m}$. Soit D_{max}^+ un (φ, Γ_K) -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$ de rang d contenu dans D tel que $\det(\varphi \mid D^+)$ est maximal parmi tout les idéaux que l'on obtient ainsi. Si D^+ est un (φ, Γ_K) -module sur $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+$ de rang d contenu dans D , alors $D^+ + D_{\text{max}}^+$ est libre de rang d et contient D_{max}^+ et donc $\det(\varphi \mid D^+ + D_{\text{max}}^+)$ contient $\det(\varphi \mid D_{\text{max}}^+)$ ce qui fait qu'il lui est égal et que $D^+ \subset D_{\text{max}}^+$.

On voit par ailleurs qu'il existe $n_0 \geq 0$ tel que si $n \geq n_0$, alors :

$$K_n[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+}^{\iota_n} D_{\text{max}}^+ = K_n[[t]] \otimes_{\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+}^{\iota_n} \mathcal{M}^+(D),$$

et que si $n \geq -n_0$, alors $\varphi^n(y) = \iota_{n_0}(\varphi^{n+n_0}(y))$ ce qui fait que pour tout $n \in \mathbf{Z}$, on a $\varphi^n(y) \in \text{Fil}^0(K_n((t)) \otimes_{K_n} D_n)$ et donc $D_{\text{max}}^+ \subset \mathcal{M}^+(D)$ ce qui fait que $D_{\text{max}}^+ = \mathcal{M}^+(D)$. $\square$

Appendice A

Liste des notations

Voici une liste des principales notations dans l'ordre où elles apparaissent.

Introduction : k, K, K_0, G_K .

§1.1 : $\tilde{\mathbf{E}}^+, \varepsilon^{(n)}, \tilde{\mathbf{E}}, \tilde{\mathbf{A}}^+, \tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}^+, \tilde{\mathbf{B}}, \theta, \mathbf{B}_{\text{dR}}^+, X, t, \mathbf{B}_{\text{dR}}, \tilde{p}, \mathbf{B}_{\text{max}}^+, \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^+, \mathbf{B}_{\text{max}}, \mathbf{B}_{\text{st}}, N, \mathbf{B}_{\text{cris}}, \tilde{\mathbf{B}}^{\dagger,r}, \tilde{\mathbf{B}}_{\text{rig}}^{\dagger,r}, K_n, H_K, \Gamma_K, \mathbf{B}_{\text{rig},K}^{\dagger,r}, K'_0, \mathbf{B}_K^{\dagger,r}, M_{a,h}, \mathbf{B}_e, t_h, V_{[r;s]}, \tilde{\mathbf{B}}^{[r;s]}, \mathbf{B}_K^{[r;s]}, \rho(r)$.

§1.2 : $\deg(D), \text{NP}(D), r_n, n(r), \iota_n, Q_n$.

§2 : W_e, W_{dR}^+, W_{dR} .

§2.2 : $\tilde{D}^r(W), W(D)$.

§2.3 : $D_{\text{cris}}(W), D_{\text{st}}(W), D_{\text{dR}}(W), \mathcal{M}(D), D_{\text{Sen}}(W)$.

§3.2 : $\text{Rep}(a, h)$.

§3.3 : $\mathbf{B}_{\text{rig},K}^+, \mathbf{B}_K^+, \mathcal{M}^+(D), \nabla$.

Références

- [Ber02] L. BERGER – *Représentations p -adiques et équations différentielles*. Invent. Math. 148 (2002), no. 2, 219–284.
- [Ber04a] L. BERGER – *Limites de représentations cristallines*. Compos. Math. 140 (2004), no. 6, 1473–1498.
- [Ber04b] L. BERGER – *Equations différentielles p -adiques et (φ, N) -modules filtrés*. Prépublication 2004.
- [BB06] L. BERGER, C. BREUIL – *Sur quelques représentations potentiellement cristallines de $\text{GL}_2(\mathbf{Q}_p)$* . Prépublication, 2006.

- [BC07] L. BERGER, P. COLMEZ – *Familles de représentations de de Rham et monodromie p -adique*. Prépublication 2007.
- [CC98] F. CHERBONNIER, P. COLMEZ – *Représentations p -adiques surconvergentes*. Invent. Math. 133 (1998), no. 3, 581–611.
- [Col99] P. COLMEZ – *Représentations cristallines et représentations de hauteur finie*. J. Reine Angew. Math. 514 (1999), 119–143.
- [Col01] P. COLMEZ – *Les conjectures de monodromie p -adiques*. Séminaire Bourbaki. Vol. 2001/2002. Astérisque No. 290 (2003), Exp. No. 897, vii, 53–101.
- [Col02] P. COLMEZ – *Espaces de Banach de dimension finie*. Journal of the Inst. of Math. Jussieu (2002) 1(3), 331–439.
- [Col03] P. COLMEZ – *Espaces Vectoriels de dimension finie et représentations de de Rham*. Prépublication 2003.
- [Col07] P. COLMEZ – *Représentations triangulines de dimension 2*. Prépublication 2007.
- [CF00] P. COLMEZ, J.-M. FONTAINE – *Construction des représentations p -adiques semi-stables*. Inv. Math. 140, 2000, 1–43.
- [Fon90] J.-M. FONTAINE – *Représentations p -adiques des corps locaux I*. The Grothendieck Festschrift, Vol. II, 249–309, Progr. Math. 87, Birkhäuser Boston, Boston, MA 1990.
- [Fon94a] J.-M. FONTAINE – *Le corps des périodes p -adiques*. Astérisque No. 223 (1994), 59–111.
- [Fon94b] J.-M. FONTAINE – *Représentations p -adiques semi-stables*. Astérisque No. 223 (1994), 113–184.
- [Fon03] J.-M. FONTAINE – *Presque $\mathbf{C}_p$ -représentations*. Kazuya Kato’s fiftieth birthday. Doc. Math. 2003, Extra Vol., 285–385 (electronic).
- [Fon04] J.-M. FONTAINE – *Arithmétique des représentations galoisiennes p -adiques*. Cohomologies p -adiques et applications arithmétiques. III. Astérisque No. 295 (2004), xi, 1–115.
- [Fon07] J.-M. FONTAINE – *Lettres à Jérôme Plût*. 15 et 17 mars 2007.
- [FW79] J.-M. FONTAINE, J.-P. WINTENBERGER – *Le “corps des normes” de certaines extensions algébriques de corps locaux*. C. R. Acad. Sci. Paris Sér. A-B 288 (1979), no. 6, A367–A370.
- [Ked04] K. KEDLAYA – *A p -adic local monodromy theorem*. Ann. of Math. (2) 160 (2004), no. 1, 93–184.
- [Ked05] K. KEDLAYA – *Slope filtrations revisited*. Doc. Math. 10 (2005), 447–525 (electronic).
- [Ked06] K. KEDLAYA – *Slope filtrations for relative Frobenius*. Prépublication 2006.
- [Liu07] R. LIU – *Cohomology and duality for (φ, Γ) -modules over the Robba ring*. En préparation.
- [Per94] B. PERRIN-RIOU – *Théorie d’Iwasawa des représentations p -adiques sur un corps local*. Inv. Math. 115, 1994, 81–161.
- [Sen80] S. SEN – *Continuous cohomology and p -adic Galois representations*. Inv. Math. 62 (1980/81) 89–116.
- [Wac96] N. WACH – *Représentations p -adiques potentiellement cristallines*. Bull. Soc. Math. France 124, 1996, 375–400.
- [Win83] J.-P. WINTENBERGER – *Le corps des normes de certaines extensions infinies des corps locaux ; applications*. Ann. Sci. Ecole Norm. Sup. 16 (1983), 59–89.

Avril 2007

LAURENT BERGER, CNRS & IHES, Le Bois-Marie, 35 route de Chartres, 91440 Bures-sur-Yvette
E-mail : laurent.berger@ihes.fr • *Url* : www.ihes.fr/~lberger/