

DOMINIQUE DUVAL

**Représentations entières de certains groupes finis. 2e partie :  
Représentations entières des groupes cycliques d'ordre premier**

*Séminaire de théorie des nombres de Grenoble*, tome 3 (1973-1974), exp. n° 6, p. 1-9

[http://www.numdam.org/item?id=STNG\\_1973-1974\\_\\_3\\_\\_A6\\_0](http://www.numdam.org/item?id=STNG_1973-1974__3__A6_0)

© Institut Fourier – Université de Grenoble, 1973-1974, tous droits réservés.

L'accès aux archives du séminaire de théorie des nombres de Grenoble implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme  
Numérisation de documents anciens mathématiques  
<http://www.numdam.org/>

14 février 1974

Grenoble

REPRESENTATIONS ENTIERES  
DE CERTAINS GROUPES FINIS

- 2e partie -

## REPRESENTATIONS ENTIERES DES GROUPES CYCLIQUES D'ORDRE PREMIER

---

par Dominique DUVALI. INTRODUCTION.

Le but de cet exposé est l'étude des représentations indécomposables d'un groupe  $G$  cyclique d'ordre premier  $p$  sur l'anneau  $\mathbb{Z}$  des entiers relatifs.

Convenons d'appeler, pour tout anneau commutatif  $S$ ,  $S[G]$ -module tout  $S[G]$ -module à gauche, libre de type fini sur  $S$ . Nous étudions donc ici les  $\mathbb{Z}[G]$ -modules indécomposables.

Nous montrons d'abord, à l'aide de cohomologie de groupes, qu'il y a trois  $\mathbb{Z}_p[G]$ -modules indécomposables, à  $\mathbb{Z}_p[G]$ -isomorphisme près ( $\mathbb{Z}_p$  étant l'anneau des entiers  $p$ -adiques).

Puis, utilisant ce résultat et un théorème démontré par L. Bouvier [2], nous montrons que le nombre de  $\mathbb{Z}[G]$ -modules indécomposables, à  $\mathbb{Z}[G]$ -isomorphisme près, est égal à  $2h + 1$  ( $h$  étant le nombre de classes du corps cyclotomique  $\mathbb{Q}^{(p)}$ ).

Le problème a déjà été traité par I. Reiner [4] et S.D. Berman et P. Gudivok [1].

RAPPELS : COHOMOLOGIE DES GROUPES ET EXTENSIONS DE MODULES.

Soient :  $G$  un groupe fini

$S$  un anneau commutatif

$X, Y$  deux  $S[G]$ -modules

$C(Y, X)$  l'ensemble des extensions de  $Y$  par  $X$  à équivalence près,

où on appelle extension de  $Y$  par  $X$  tout  $S[G]$ -module  $E$  tel que la suite  $0 \rightarrow X \rightarrow E \rightarrow Y \rightarrow 0$  soit exacte sur  $S[G]$  et scindée sur  $S$ , et où deux extensions  $E$  et  $E'$  de  $Y$  par  $X$  sont dites équivalentes s'il existe un  $S[G]$ -isomorphisme  $\theta$  rendant le diagramme suivant commutatif :

$$\begin{array}{ccccccccc} 0 & \longrightarrow & X & \longrightarrow & E & \longrightarrow & Y & \longrightarrow & 0 \\ & & \text{id}_X \downarrow & & \theta \downarrow & & \text{id}_Y \downarrow & & \\ 0 & \longrightarrow & X & \longrightarrow & E' & \longrightarrow & Y & \longrightarrow & 0 \end{array}$$

Soit  $T_S = \text{Hom}_S(Y, X)$ , muni d'une structure de  $G$ -module grâce à l'opération :  $t^g = gtg^{-1}$  pour tout  $t$  dans  $T_S$  et tout  $g$  dans  $G$ .

Alors  $E$  est isomorphe, comme  $S$ -module, à  $X \oplus Y$ , et l'action de  $G$  sur  $E$  est de la forme  $g(x, y) = (gx + \lambda_g(gy), gy)$  (si  $g, x, y$  sont respectivement dans  $G, X, Y$ ), où  $\lambda_g$  est un élément de  $T_S$ . On vérifie facilement que l'application  $\lambda$  de  $G$  dans  $T_S$  définie par  $\lambda(g) = \lambda_g$  pour tout  $g$  de  $G$  est un 1-cocycle de  $G$  dans  $T_S$ . L'application ainsi obtenue, de l'ensemble des extensions de  $Y$  par  $X$  dans l'ensemble des 1-cocycles de  $G$  dans  $T_S$ , induit un isomorphisme de  $C(Y, X)$  sur  $H^1(G, T_S)$  (premier groupe de cohomologie de  $G$  dans  $T_S$ ).

D'autre part, si  $G$  est un groupe cyclique d'ordre premier  $p$ ,  $\sigma$  un générateur de  $G$ , et  $M$  un  $G$ -module, l'application qui fait correspondre, à tout 1-cocycle de  $G$  dans  $M$ , sa valeur en  $\sigma$ , est un homomorphisme de groupes qui induit un isomorphisme entre  $H^1(G, M)$  et

$$\frac{\text{Ker } \Phi_p(\sigma)}{(\sigma-1)M} \quad (\text{où } \Phi_p \text{ est le polynôme cyclotomique d'ordre } p).$$

NOTATIONS :

Désormais, nous utiliserons les notations suivantes :

soient  $p$  un nombre premier ;

$G$  un groupe cyclique d'ordre  $p$  ;

$\sigma$  un générateur de  $G$  ;

$\Phi_p$  le polynôme cyclotomique d'ordre  $p$  ,  

$$\Phi_p(X) = \frac{X^{p-1}}{X-1} = X^{p-1} + X^{p-2} + \dots + X + 1 ;$$

$\zeta$  une racine primitive  $p$ -ième de l'unité ;

$\mathbb{Q}_p$  le corps des nombres  $p$ -adiques,  $\mathbb{Z}_p$  l'anneau des entiers de  $\mathbb{Q}_p$  ;

$\mathbb{Q}$  le corps des nombres rationnels,  $\mathbb{Z}$  l'anneau des entiers relatifs ;

$\mathbb{F}_p$  le corps fini à  $p$  éléments ;

$h$  le nombre de classes du corps cyclotomique  $\mathbb{Q}(\zeta)$  .

## II. REPRESENTATIONS INDECOMPOSABLES DE $G$ SUR $\mathbb{Z}_p$ .

### 1. Application des résultats connus sur $\mathbb{Q}_p$ .

Nous savons que  $\mathbb{Q}_p[G]$  est une algèbre semi-simple, qu'il y a deux types de  $\mathbb{Q}_p[G]$ -modules simples, à savoir  $\mathbb{Q}_p$  et  $\mathbb{Q}_p(\zeta)$  , et que  $\mathbb{Q}_p[G]$  est isomorphe, en tant que  $\mathbb{Q}_p[G]$ -module, à  $\mathbb{Q}_p \oplus \mathbb{Q}_p(\zeta)$  .

Soit  $M$  un  $\mathbb{Z}_p[G]$ -module, et  $\hat{M}$  le  $\mathbb{Q}_p[G]$ -module égal à  $\mathbb{Q}_p \oplus_{\mathbb{Z}_p} M$  ;  $M$  sera identifié à  $1 \oplus_{\mathbb{Z}_p} M$  et considéré comme une partie de  $\hat{M}$  . Sur  $\mathbb{Q}_p[G]$  , décomposons  $\hat{M}$  en somme directe de  $\mathbb{Q}_p[G]$ -modules simples ; appelons  $N_1$  l'un de ces facteurs simples,  $\pi$  la projection canonique de  $\hat{M}$  sur  $N_1$  , et  $N = \pi(M)$  . Soit  $\hat{N} = \mathbb{Q}_p \oplus_{\mathbb{Z}_p} N$  .

LEMME 1.

$$N_1 = \hat{N}$$

Démonstration : Il s'agit de montrer que tout élément de  $N_1$  est dans  $\hat{N}$  ; or tout élément  $n$  de  $N_1$  s'écrit  $\pi(a \oplus m)$  où  $a \in \mathbb{Q}_p$ ,  $m \in M$ , c'est-à-dire  $n = a \cdot \pi(1 \oplus m)$  ; donc  $n$  est dans  $\mathbb{Q}_p \oplus_{\mathbb{Z}_p} \pi(M) = \hat{N}$ . Autrement dit, le diagramme suivant est commutatif, et  $\hat{N}$  est un  $\mathbb{Q}_p[G]$ -module simple :

$$\begin{array}{ccccc} \hat{M} & \longrightarrow & \hat{N} & \longrightarrow & 0 \\ \uparrow & & \uparrow & & \\ M & \xrightarrow{\pi} & N & \longrightarrow & 0 \end{array}$$

Nous allons donc chercher les  $\mathbb{Z}_p[G]$ -modules  $N$  tels que  $\hat{N}$  soit isomorphe à  $\mathbb{Q}_p$  ou à  $\mathbb{Q}_p(\zeta)$  :

Si  $\hat{N}$  est isomorphe à  $\mathbb{Q}_p$  (comme  $\mathbb{Q}_p[G]$ -module), alors  $N$  est un  $\mathbb{Z}_p$ -sous-module de  $\mathbb{Q}_p$  ; mais,  $\mathbb{Z}_p$  étant principal, tous les  $\mathbb{Z}_p$ -sous-modules de  $\mathbb{Q}_p$  sont isomorphes ; donc  $N$  est isomorphe à  $\mathbb{Z}_p$  (comme  $\mathbb{Z}_p[G]$ -module).

Si  $\hat{N}$  est isomorphe à  $\mathbb{Q}_p(\zeta)$ , comme  $\mathbb{Z}_p[\zeta]$  est principal, le même raisonnement montre que  $N$  est isomorphe à  $\mathbb{Z}_p[\zeta]$  (comme  $\mathbb{Z}_p[G]$ -module).

## 2. THEOREME 1.

A  $\mathbb{Z}_p[G]$ -isomorphisme près, les seuls  $\mathbb{Z}_p[G]$ -modules indécomposables sont  $S_1 = \mathbb{Z}_p$ ,  $S_2 = \mathbb{Z}_p[\zeta]$ ,  $S_3 = \mathbb{Z}_p[G]$ .

Démonstration :

a)  $S_1, S_2, S_3$  sont indécomposables sur  $\mathbb{Z}_p[G]$  :

Si  $S_1$  (resp.  $S_2$ ) était décomposable sur  $\mathbb{Z}_p[G]$ , alors  $\hat{S}_1$  (resp.  $\hat{S}_2$ ) le serait sur  $\mathbb{Q}_p[G]$  ; or  $\hat{S}_1 = \mathbb{Q}_p$  et  $\hat{S}_2 = \mathbb{Q}_p(\zeta)$  sont des  $\mathbb{Q}_p[G]$ -modules simples, donc indécomposables.

Si  $S_3$  était décomposable sur  $\mathbb{Z}_p[G]$ , alors  $\mathbb{F}_p \otimes_{\mathbb{Z}_p} S_3 \approx \mathbb{F}_p[G]$  le serait sur  $\mathbb{F}_p[G]$ . Le lemme suivant montre que c'est impossible.

LEMME 2. La représentation régulière de  $\mathbb{F}_p$  est indécomposable.

Démonstration : Soit  $\Sigma$  la multiplication par  $\sigma$  dans le  $\mathbb{F}_p$ -espace vectoriel  $\mathbb{F}_p[G]$  ; son polynôme caractéristique est  $X^p - 1 = (X-1)^p$ , donc  $\Sigma$  a une seule valeur propre égale à 1 et d'ordre  $p$ . La matrice de  $\Sigma$  dans la base  $\{1, \sigma, \dots, \sigma^{p-1}\}$  est :

$$\begin{pmatrix} 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ 1 & \cdot & \cdot & 0 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

donc tous les vecteurs propres sont colinéaires à  $1 + \sigma + \dots + \sigma^{p-1}$ , par suite la réduite de Jordan de  $\Sigma$  est :

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \cdot & \cdot & 1 \\ 0 & \cdot & 1 \end{pmatrix},$$

et la représentation régulière de  $\mathbb{F}_p$  est indécomposable. ■

b) Tout  $\mathbb{Z}_p[G]$ -module indécomposable est isomorphe à  $S_1, S_2$  ou  $S_3$  :

Nous allons démontrer par récurrence sur le  $\mathbb{Z}_p$ -rang de  $M$ .

Soit donc  $M$  un  $\mathbb{Z}_p[G]$ -module indécomposable, non nul, tel que tout  $\mathbb{Z}_p[G]$ -module de rang strictement inférieur à celui de  $M$  soit de la forme  $S_1^{(i)} \oplus S_2^{(j)} \oplus S_3^{(k)}$ , où  $S_v^{(i)}$  désigne la somme directe de  $i$  exemplaires de  $S_v$  ( $v \in \{1, 2, 3\}$ ,  $i \in \mathbb{N}$ ).

Considérons  $\hat{M} = \mathbb{Q}_p \otimes_{\mathbb{Z}_p} M$ , et sa décomposition en  $\mathbb{Q}_p[G]$ -modules simples.

$\alpha$ ) Si  $\mathbb{Q}_p$  n'intervient pas dans la décomposition de  $\hat{M}$  : alors  $\mathbb{Q}_p(\zeta)$  intervient, donc, d'après ce qui précède, la projection de  $\hat{M}$  sur  $\mathbb{Q}_p(\zeta)$  induit une projection de  $M$  sur  $S_2$  ; le noyau  $N$  de cette projection est de rang

strictement inférieur à celui de  $M$ , donc de la forme  $S_1^{(i)} \oplus S_2^{(j)} \oplus S_3^{(k)}$ . Mais alors, sur  $\mathbb{Q}_p[G]$ ,  $\hat{M}$  est isomorphe à  $\hat{B} \oplus \hat{N}$ , donc à  $\mathbb{Q}_p^{(i+k)} \oplus \mathbb{Q}_p(\zeta)^{(j+k+1)}$ ; on en conclut que  $i = k = 0$  et que la suite de  $\mathbb{Z}_p[G]$ -modules est exacte :  $0 \rightarrow S_2^{(j)} \rightarrow M \rightarrow S_2 \rightarrow 0$ .

Cette suite montre qu'ici, il revient au même de parler de  $\mathbb{Z}_p[G]$ -modules ou de  $S_2$ -modules. Mais  $S_2$  est principal, donc  $M$  est isomorphe à  $S_2^{(j+1)}$ ; et comme nous avons supposé  $M$  indécomposable, nous obtenons  $j = 0$  et  $M \approx S_2$ .

- β) Si  $\mathbb{Q}_p$  intervient dans la décomposition de  $\hat{M}$  : alors nous obtenons une suite exacte de  $\mathbb{Z}_p[G]$ -modules de la forme :  $0 \rightarrow N \rightarrow M \rightarrow S_1 \rightarrow 0$ , où  $N$  est isomorphe à  $S_1^{(i)} \oplus S_2^{(j)} \oplus S_3^{(k)}$ . Appliquons maintenant les rappels de cohomologie des groupes :  $C(S_1, N)$  est isomorphe à  $H^1(G, T)$  où  $T = \text{Hom}_{S_1}(S_1, N)$  est isomorphe à  $N$  comme  $S_1$ -module (rappelons que  $S_1 = \mathbb{Z}_p$  !). Donc  $C(S_1, N)$  est isomorphe à  $(H^1(G, S_1))^{(i)} \oplus (H^1(G, S_2))^{(j)} \oplus (H^1(G, S_3))^{(k)}$ . Admettons un instant le lemme suivant :

LEMME 3.  $H^1(G, S_1) = 0$   
 $H^1(G, S_3) = 0$   
 $H^1(G, S_2)$  est isomorphe à  $\mathbb{F}_p$ , et toutes les extensions de  $S_1$  par  $S_2$  correspondant à un élément non nul de  $\mathbb{F}_p$  sont isomorphes à  $S_3$ .

D'après ce lemme,  $C(S_1, N)$  est isomorphe à  $(H^1(G, S_2))^{(j)}$ . Si l'image de  $M$  dans  $(H^1(G, S_2))^{(j)}$  est nulle, alors la suite exacte  $0 \rightarrow N \rightarrow M \rightarrow S_1 \rightarrow 0$  est scindée et  $M$  isomorphe à  $S_1$  (car  $M$  est indécomposable).

Sinon, notons  $N = N' \oplus S_2$  pour mettre en évidence le facteur  $S_2$  tel que l'image de  $M$  dans le  $H^1(G, S_2)$  correspondant soit non nulle.

LEMME 4. Alors la suite  $0 \rightarrow N' \rightarrow M \rightarrow S_3 \rightarrow 0$  est exacte.

En effet, sur  $\mathbb{Z}_p$ ,  $M$  est isomorphe à  $N' \oplus S_2 \oplus S_1$ , et en explicitant l'action de  $\sigma$  sur un élément de  $M$ , on voit que  $M$  peut être considéré comme une extension de  $S_3$  par  $N'$ .

Donc nous avons une suite exacte de  $\mathbb{Z}_p[G]$ -modules :  
 $0 \rightarrow N' \rightarrow M \rightarrow \mathbb{Z}_p[G] \rightarrow 0$ . Or  $\mathbb{Z}_p[G]$  est libre sur lui-même, donc la suite est scindée ; et  $M$  est indécomposable, d'où :  $N' = 0$  et  $M \approx S_3$ . ■

Démonstration du lemme 3 : Nous utiliserons l'isomorphisme de  
 $H^1(G, S)$  sur  $\frac{\text{Ker } \mathfrak{f}_p(\sigma)}{(\sigma-1)S}$  (où  $S$  est un  $G$ -module quelconque).

Si  $S = S_1 = \mathbb{Z}_p$ , l'action de  $\mathfrak{f}_p(\sigma)$  sur  $S$  est la multiplication par  $p$ , donc  $\text{Ker } \mathfrak{f}_p(\sigma) = 0$  et  $H^1(G, S_1) = 0$ .

Si  $S = S_3 = \mathbb{Z}_p[G]$ , et si  $y$  est un élément de  $\mathbb{Z}_p[G]$ , alors  $\mathfrak{f}_p(\sigma)(y)$  est nul si et seulement si  $y$  est de la forme  $(\sigma-1)y_1$ , où  $y_1$  appartient à  $\mathbb{Z}_p[G]$  ; donc  $\text{Ker } \mathfrak{f}_p(\sigma) = (\sigma-1)S_3$ , et  $H^1(G, S_3) = 0$ .

Si  $S = S_2 = \mathbb{Z}_p[\zeta]$ , l'action de  $\mathfrak{f}_p(\sigma)$  est la multiplication par  $\mathfrak{f}_p(\zeta)$  qui est nul. Donc  $H^1(G, S_2) \approx \frac{\mathbb{Z}_p[\zeta]}{(\zeta-1)\mathbb{Z}_p[\zeta]}$  ; or  $\mathbb{Z}_p[\zeta]$  est l'anneau des entiers de  $\mathbb{Q}_p(\zeta)$ , et l'extension  $\mathbb{Q}_p(\zeta)$  sur  $\mathbb{Q}_p$  est totalement ramifiée, d'uniformisante  $(\zeta-1)$ , donc  $H^1(G, S_2) \approx \mathbb{F}_p$ .

L'extension de  $\mathbb{Z}_p$  par  $\mathbb{Z}_p[\zeta]$  correspondant à 0 dans  $\mathbb{F}_p$  est décomposable, et il existe au moins une extension indécomposable, à savoir  $S_3 = \mathbb{Z}_p[G]$ . Or, on vérifie que deux extensions correspondant à deux éléments non nuls de  $\mathbb{F}_p$  sont isomorphes ; d'où le lemme 3. ■



### III. REPRESENTATIONS INDECOMPOSABLES DE G SUR $\mathbb{Z}$ .

Rappel : L. Bouvier a démontré [2] la proposition suivante :

Un  $\mathbb{Z}[G]$ -module  $M$  est  $\mathbb{Z}[G]$ -indécomposable si et seulement si le  $\mathbb{Z}_p[G]$ -module  $\mathbb{Z}_p \otimes_{\mathbb{Z}} M$  est  $\mathbb{Z}_p[G]$ -indécomposable.

Donc  $M$  est  $\mathbb{Z}[G]$ -indécomposable si et seulement si  $\mathbb{Z}_p \otimes_{\mathbb{Z}} M$  est isomorphe, sur  $\mathbb{Z}_p[G]$ , à  $\mathbb{Z}_p$  ou  $\mathbb{Z}_p[\zeta]$  ou  $\mathbb{Z}_p[G]$ .

a) Si  $\mathbb{Z}_p \otimes_{\mathbb{Z}} M$  est isomorphe à  $\mathbb{Z}_p$  comme  $\mathbb{Z}_p[G]$ -module, alors  $G$  agit trivialement sur  $\mathbb{Z}_p \otimes_{\mathbb{Z}} M$ , donc sur  $M$ , et  $M$  est un  $\mathbb{Z}$ -module ; le rang de  $M$  sur  $\mathbb{Z}$  est égal au rang de  $\mathbb{Z}_p \otimes_{\mathbb{Z}} M$  sur  $\mathbb{Z}_p$ , c'est-à-dire à 1. Or,  $\mathbb{Z}$  est principal, donc tous les  $\mathbb{Z}$ -modules de rang 1, c'est-à-dire tous les idéaux fractionnaires de  $\mathbb{Q}$ , sont isomorphes. Dans ce cas, il y a une seule possibilité pour  $M$  :  $M$  est isomorphe au  $\mathbb{Z}[G]$ -module  $\mathbb{Z}$ .

b) Si  $\mathbb{Z}_p \otimes_{\mathbb{Z}} M$  est isomorphe à  $\mathbb{Z}_p[\zeta]$ , alors  $M$  est annihilé par  $\mathfrak{f}_p(\sigma)$  donc  $M$  est un  $\mathbb{Z}[\zeta]$ -module de rang 1.

Or  $\mathbb{Z}[\zeta]$  est un anneau de Dedekind, donc deux  $\mathbb{Z}[\zeta]$ -modules de rang 1 sont isomorphes si et seulement si, en tant qu'idéaux fractionnaires de  $\mathbb{Q}(\zeta)$ , ils sont dans la même classe.

Dans ce cas, il y a  $h$  possibilités pour  $M$ .

c) Si  $\mathbb{Z}_p \otimes_{\mathbb{Z}} M$  est isomorphe à  $\mathbb{Z}_p[G]$ , c'est-à-dire si  $\mathbb{Z}_p \otimes_{\mathbb{Z}} M$  est une extension non triviale de  $S_1 = \mathbb{Z}_p$  par  $S_2 = \mathbb{Z}_p[\zeta]$ , alors  $M$  est une extension non triviale de  $S'_1$  par  $S'_2$ , où  $S'_\nu$  est défini par  $S'_\nu \approx \mathbb{Z}_p \otimes_{\mathbb{Z}} S'_\nu$  ( $\nu=1,2$ ) ; d'après a) et b), il y a 1 manière de choisir  $S'_1$  et  $h$  manières de choisir  $S'_2$ . Or, à chaque choix de  $S'_1$  et  $S'_2$  correspond une seule extension non triviale  $M$ .

Dans ce cas, il y a encore  $h$  possibilités pour  $M$ .

Le résultat est donc le suivant :

THEOREME 2. Le nombre de représentations non isomorphes d'un groupe cyclique d'ordre  $p$  sur  $\mathbb{Z}$  est égal à  $2h+1$ , si  $h$  est le nombre de classes du corps cyclotomique  $\mathbb{Q}^{(p)}$ .

(Il y a une extension de degré 1,  $h$  de degré  $(p-1)$ , et  $h$  de degré  $p$ ).

-o-o-o-

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] S.D. BERMAN - Indecomposable representations of finite groups over the ring of  $p$ -adic integers. *Izv. Akad. Nauk, SSSR Ser. Mat.* 28 (1964) pp. 875-910. English transl., *Amer. Math. Soc. Transl.* (2) 50 (1966), pp. 77-113.
- [2] L. BOUVIER - Séminaire de théorie des nombres. Grenoble, 1973-1974.
- [3] I. REINER - On the class number of representations of an order. *Canadian Journal of Mathematics*, Vol. 11 (1959), pp. 660-672.

-o-o-o-