JEAN-LOUIS KOSZUL

Travaux de J. Stallings sur la décomposition des groupes en produits libres

Séminaire N. Bourbaki, 1971, exp. n° 356, p. 173-185
<http://www.numdam.org/item?id=SB_1968-1969__11__173_0>

Séminaire BOURBAKI
21e année, 1968/69, n° 356 Février 1969

TRAVAUX DE J. STALLINGS SUR LA DÉCOMPOSITION DES GROUPES EN PRODUITS LIBRES

par Jean-Louis KOSZUL

N° 1 - Produits libres et bouts.

On désigne par G un groupe de type fini et par $B(G)$ l'ensemble des bouts de G ([2]). Soit S une famille génératrice finie de G telle que $S = S^{-1}$ et $e \notin S$ (e désigne l'élément neutre de G) ; il existe une bijection naturelle de $B(G)$ sur l'ensemble des bouts du graphe défini comme suit : les sommets sont les éléments de G et les arêtes sont les couples (s,t) avec $s^{-1}t \in S$. On notera $b(G)$ le cardinal de $B(G)$. Soit $\mathbf{Z}_2 G$ l'algèbre de G à coefficients modulo 2 et soit $H^1(G,\mathbf{Z}_2 G)$ l'espace de cohomologie obtenu en prenant dans $\mathbf{Z}_2 G$ la structure de G-module définie par la représentation régulière. On montre que si $b(G) > 0$, $H^1(G,\mathbf{Z}_2 G)$ est de dimension $b(G) - 1$.

Les seules valeurs possibles pour $b(G)$ sont 0 , 1 , 2 ou ∞ ([2]). Pour que $b(G) = 0$, il faut et il suffit que G soit fini. On a $b(\mathbf{Z}) = 2$, $b(\mathbf{Z}^2) = 1$. Si G est produit libre de deux sous-groupes non triviaux et non tous deux isomorphes à $\mathbf{Z}_2$, alors $b(G) = \infty$ (le groupe $\mathbf{Z}_2 * \mathbf{Z}_2$, isomorphe au groupe diédral infini a deux bouts).

THÉORÈME 1.- <u>Soit</u> G <u>un groupe de type fini sans torsion</u>. <u>Si</u> G <u>a une infinité de bouts</u>, <u>alors</u> G <u>est produit libre de deux sous-groupes non triviaux</u>.

Ce résultat est démontré par Stallings dans le cas où G est un groupe de présentation finie ([6]) ; sa démonstration a été adaptée par G. Bergman ([1]) au cas des groupes de type fini. On indiquera la démonstration de Stallings dans les N° 3, 4, 5, 6.

N° 2 - Applications du Théorème 1.

Soit $G = G_1 * G_2$ le produit libre de deux groupes G_1 , G_2 . S'il existe une famille génératrice de G comprenant n éléments, alors il existe des familles génératrices de G_1 et G_2 comprenant respectivement n_1 et n_2 éléments, avec $n_1 + n_2 = n$. C'est un corollaire immédiat du Théorème connu sous le nom de Théorème de Gruschko (cf. [4]). Combiné avec le Théorème 1, il donne dans certains cas des possibilités de raisonnement par récurrence sur le nombre minimum d'éléments des familles génératrices.

THÉORÈME 2.- Tout groupe sans torsion qui contient un sous-groupe d'indice fini libre est libre.

THÉORÈME 3.- Tout groupe de dimension cohomologique ≤ 1 est libre.

Ces énoncés répondent à des questions de Serre, Eilenberg, Ganea entre autres. Ils ont été démontrés par J. Stallings dans le cas des groupes de type fini ([6]). Le passage au cas général a été fait par R. Swan ([7]).

Démonstration du Théorème 2 (cas d'un groupe G de type fini).

Si G contient un sous-groupe libre d'indice fini L , alors G est de présentation finie et L est de type fini. On a $b(G) = b(L) = 0$, 2 ou ∞ .

Si $b(L) = 0$, alors $G = \{e\}$. Si $b(L) = 2$, c'est-à-dire si $L \simeq \mathbb{Z}$, alors G est un groupe de type fini sans torsion ayant deux bouts. Un tel groupe est isomorphe à $\mathbb{Z}$ d'après un résultat de C. T. Wall. Cela étant, on démontre le Théorème 2 par récurrence sur le nombre minimal d'éléments des familles génératrices de G . Si ce nombre est ≥ 2 , ce qui précède montre que $b(L) = \infty$ et par suite $b(G) = \infty$. D'après le Théorème 1, G est produit libre de deux sous-groupes non triviaux G_1 , G_2 . Puisque $L \cap G_i$ est un sous-groupe libre d'indice fini dans G_i (pour $i = 1$, 2), le Théorème de Gruschko et l'hypothèse de récurrence montrent que G_1 et G_2 sont libres.

Démonstration du Théorème 3 (cas d'un groupe G de type fini).

On montre d'abord que si la dimension cohomologique de G est ≤ 1 , alors G est sans torsion et $b(G) \neq 1$. Si $b(G) = 2$, alors G est isomorphe à $\mathbb{Z}$ d'après le résultat de Wall déjà utilisé plus haut. On démontre alors le Théorème 3 par récurrence sur le nombre minimum d'éléments des familles génératrices de G . Si ce nombre est ≥ 2 , ce qui précède montre que $b(G) = \infty$. D'après le Théorème 1, G est produit libre de deux sous-groupes non triviaux G_1 , G_2 . Ces groupes G_1 , G_2 sont de dimension cohomologique ≤ 1 . Le Théorème de Gruschko et l'hypothèse de récurrence montrent que G_1 et G_2 sont libres.

On peut aussi déduire directement le Théorème 2 du Théorème 3 en démontrant le Lemme suivant (J.-P. Serre) : si G est un groupe sans torsion et si H est un sous-groupe d'indice fini dans G , alors G et H ont même dimension cohomologique.

N° 3 - Structures bipolaires et produits libres ([6]).

Soient A , A^* deux groupes et $G = A * A^*$ leur produit libre. Tout élément $s \in G$ admet une décomposition réduite unique

$$s = s_1 s_2 \dots s_n$$

ayant la propriété suivante : quel que soit $i = 1, 2, \dots, n-1$, ou bien $s_i \in A - \{e\}$ et $s_{i+1} \in A^* - \{e\}$, ou bien $s_i \in A^* - \{e\}$ et $s_{i+1} \in A - \{e\}$. Si $s \neq e$, alors $n > 0$; en regardant l'extrême gauche et l'extrême droite de la décomposition réduite, on arrive à une partition de $G - \{e\}$ en quatre parties notées AA , AA^* , A^*A , A^*A^* , qui se définissent comme suit : pour $X , Y \in \{A, A^*\}$, XY désigne l'ensemble des $s \in G - \{e\}$ dont la décomposition réduite commence par un élément de X et se termine par un élément de Y . On posera $(A^*)^* = A$. La partition AA , AA^* , A^*A , A^*A^* de $G - \{e\}$ possède les propriétés suivantes : quels que soient $X , Y , Z \in \{A, A^*\}$,

(1) <u>si</u> $s \in XY$ <u>et si</u> $t \in Y^*Z$, <u>alors</u> $st \in XZ$,

(2) <u>si</u> $s \in XY$, <u>alors</u> $s^{-1} \in YX$.

Etant donné un groupe G , on appelle <u>structure bipolaire</u> sur G une partition de $G - \{e\}$ en quatre classes AA , AA^* , A^*A , A^*A^* qui vérifie les conditions (1) et (2) ci-dessus. Si G est un groupe muni d'une structure bipolaire, on appelle <u>mot cassé</u> de G une suite $(s_1, \dots, s_n)$ d'éléments de $G - \{e\}$ telle que, si $s_i \in X_i Y_i$, alors $X_{j+1} = Y_j^*$ pour $j = 1, 2, \dots, n-1$. On dit que le mot cassé $(s_1, \dots, s_n)$ a pour <u>longueur</u> n et <u>représente</u> l'élément $s_1 \dots s_n$ de G .

Pour que l'on puisse tirer quelque chose de la structure bipolaire sur G il faut qu'elle vérifie la condition de finitude suivante :

(Φ) Quel que soit $s \in G$, la longueur des mots cassés qui représentent s admet une borne supérieure finie.

Un élément de $G - \{e\}$ est dit irréductible s'il ne peut être représenté par un mot cassé de longueur > 1 . On voit facilement que si la condition (Φ) est vérifiée, tout élément de G est représenté d'une manière et d'une seule par un mot cassé constitué d'éléments irréductibles. (Dans la structure bipolaire obtenue plus haut sur le produit libre $A * A^*$, la condition (Φ) est évidemment vérifiée. Les éléments irréductibles sont les éléments de $A - \{e\}$ et les éléments de $A^* - \{e\}$. Ils appartiennent donc à $AA \cup A^*A^*$. La représentation des éléments de $A * A^*$ par des mots cassés d'éléments irréductibles coïncide avec la décomposition réduite.)

Soient $X , Y , Z \in \{A,A^*\}$. Si $s \in XY$, $t \in YZ$ et si t est irréductible, alors, ou bien $st = e$, ou bien $st \in XV$ avec $V \in \{A,A^*\}$. En effet, si l'on avait $st \in X^*V$, alors (s^{-1},st) serait un mot cassé de longueur 2 représentant t . De même, si $s \in XY$, $t \in YZ$ et si s est irréductible, alors, ou bien $st = e$, ou bien $st \in VZ$ avec $V \in \{A,A^*\}$. On déduit de là que si $s \in XY$ et $t \in YZ$ sont tous deux irréductibles, alors $st = e$ ou bien st est un élément irréductible appartenant à XZ . Ceci montre en particulier que les éléments irréductibles appartenant à AA (resp. A^*A^*) constituent avec e un sous-groupe G_A (resp. G_{A^*}) de G .

LEMME 1.- Soit G un groupe muni d'une structure bipolaire AA, AA^*, A^*A, A^*A^* vérifiant la condition (Φ).

a) Si AA^* ne contient pas d'élément irréductible, alors G est produit libre des sous-groupes G_A et G_{A^*}.

b) Si AA^* contient un élément irréductible x, alors G est produit libre du sous-groupe G_A et du sous-groupe (isomorphe à $\mathbb{Z}$) engendré par x.

Dans le cas b), les éléments irréductibles appartenant à AA^* sont de la forme sx avec $s \in G_A$; les éléments irréductibles appartenant à A^*A^* sont de la forme $x^{-1}sx$ avec $s \in G_A - \{e\}$; on a $G_{A^*} = x^{-1}G_A x$.

Avec les hypothèses du Lemme, on voit que si $AA^* = (A^*A)^{-1}$ n'est pas vide et si G n'est pas isomorphe à $\mathbb{Z}$, alors G est produit libre de deux sous-groupes non triviaux.

N° 4 - Construction de structures bipolaires ([6]).

Soient G un groupe et K un complexe simplicial localement fini et connexe. On suppose donnée une loi d'opération simpliciale $G \times K \to K$ de G dans K. Les p-cochaînes sur K à coefficients dans $\mathbb{Z}_2$ s'identifient à des ensembles de p-simplexes de K. L'ensemble K^o des sommets de K étant supposé totalement ordonné, on a une opération de cup-produit sur les cochaînes. Si C et D sont des cochaînes de degrés respectifs p et q, le cup-produit $C.D$ est l'ensemble des $(p+q)$-simplexes $(v_o,\dots,v_{p+q})$ avec $v_o < \dots < v_{p+q}$, $(v_o,\dots,v_p) \in C$ et $(v_p,\dots,v_{p+q}) \in D$. Le complémentaire dans K^o d'une 0-cochaîne F se note F^*. Le cobord dF d'une 0-cochaîne F est l'ensemble des 1-simplexes de K ayant un sommet dans F et un sommet dans F^*. On note $H^1(K)$ (resp. $H^1_f(K)$) la cohomologie du complexe des cochaînes (resp. des cochaînes finies) sur K à coefficients dans $\mathbb{Z}_2$.

On suppose dans la suite $H^o_f(K) = 0$ (c'est-à-dire K^o infini), $H^1(K) = 0$ et $H^1_f(K) \neq 0$. Tout 1-cocycle est le cobord de deux 0-cochaînes complémentaires. Un 1-cocycle fini P est dit minimal si il n'est pas cohomologue à 0 (bien entendu pour la cohomologie des cochaînes finies) et si tout 1-cocycle contenant moins de simplexes que P est cohomologue à 0. Dans ce qui suit, on supposera que P est un 1-cocycle minimal et on notera E et E^* les 0-cochaînes infinies telles que $dE = dE^* = P$. Les sous-complexes de K définis par E et E^* sont connexes, car autrement P serait somme de deux cocycles disjoints non vides et ne serait donc pas minimal.

LEMME 2.- Quel que soit $s \in G$, si P et sP sont disjoints l'une des 0-cochaînes

$$E \cap sE \quad , \quad E \cap sE^* \quad , \quad E^* \cap sE \quad , \quad E^* \cap sE^*$$

est vide.

En utilisant la connexité de E, on montre que dans le cas contraire, $sP = E.sP + E^*.sP$ est une décomposition de sP en somme de deux 1-cochaînes disjointes non vides. Puisque sP est minimal, on devrait avoir $P.sP = d(E.sP) \neq 0$. Or si P et sP sont disjoints, la formule du cup-produit montre que $P.sP = 0$.

LEMME 3.- Quel que soit $s \in G$, l'une au moins des 0-cochaînes

$$E \cap sE \quad , \quad E \cap sE^* \quad , \quad E^* \cap sE \quad , \quad E^* \cap sE^*$$

est finie.

Le cas où $P \cap sP = \emptyset$ a été vu avec le Lemme 2. Supposons $P \cap sP \neq \emptyset$. Soit m le nombre des simplexes de P . Les cobords $d(E \cap sE)$, $d(E \cap sE^*)$, $d(E^* \cap sE)$, $d(E^* \cap sE^*)$ ont pour réunion $P \cup sP$ qui contient moins de $2m$ simplexes. Comme tout 1-simplexe de $P \cup sP$ appartient à exactement deux de ces cobords, il existe une 0-cochaîne $X \cap sY$, avec $X , Y \in \{E,E^*\}$, telle que $d(X \cap sY)$ contienne moins de m simplexes. Le cocycle $d(X \cap sY)$ est donc de classe nulle dans $H^1_f(K)$. Puisque le complémentaire de $X \cap sY$ contient X^* qui est infini, ceci implique que $X \cap sY$ est fini.

LEMME 4.- Si G opère librement dans K^o et si $s \in G$ est un élément d'ordre infini tel que P et sP soient cohomologues, alors $H^1_f(K) = \mathbb{Z}_2$.

Si $P - sP = P + sP$ est cohomologue à 0 , c'est que $E + sE$ ou $(E + sE)^* = K^o + E + sE$ est finie. Dans le second cas,
$E + s^2E = (K^o + E + sE) + (K^o + sE + s^2E) = (E + sE)^* + s(E + sE)^*$ est finie. Puisque G opère librement dans K^o , on en déduit qu'il existe toujours dans le sous-groupe engendré par s un élément t tel que $E + tE$ soit finie et $P \cap tP = \emptyset$. Le Lemme 2 montre que, dans ces conditions, $E \subset tE$ ou $tE \subset E$. En remplaçant au besoin t par son inverse, on se place dans le cas où $E \subset tE$. Pour tout entier $N > 0$, soit $F_N = \sum_{-N}^{N} t^n(E + tE)$. C'est une suite croissante de 0-cochaînes finies dont la réunion est K^o . Soit $Q = dH$ un

1-cocycle fini. Pour N assez grand, $F_N.Q = Q$ et par suite $d(F_N.H) = dF_N.H + Q$ ce qui montre que Q est cohomologue à $dF_N.H = (t^{-N}P + t^{N+1}P).H$. Or, pour N assez grand, $(t^{-N}P).Q = 0$, c'est-à-dire que $(t^{-N}P).H$ et $(t^{N+1}P).H$ sont des cocycles. Comme ces cocycles sont contenus respectivement dans les cocycles minimaux $t^{-N}P$ et $t^{N+1}P$, ils sont tous deux cohomologues à 0 ou à P . Ceci entraîne que Q est cohomologue à 0 ou à P .

Ce Lemme montre que, si $\dim H^1_f(K) > 1$ et si G contient un élément d'ordre infini, alors $\dim H^1_f(K) = \infty$.

PROPOSITION 1.- Si $\dim H^1_f(K) > 1$, si G est sans torsion et opère librement dans K^0 , alors quel que soit $s \in G - \{e\}$, une et une seule des 0-cochaînes

$$E \cap sE \quad , \quad E \cap sE^* \quad , \quad E^* \cap sE \quad , \quad E^* \cap sE^*$$

est finie.

Il y en a au moins une d'après le Lemme 3. Les sommes deux à deux de ces 0-cochaînes sont E , sE , E^* , sE^* , $E^* \cap sE + E \cap sE^*$, $E \cap sE + E^* \cap sE^*$ qui ont pour cobords P , sP ou $P + sP$. Ces 1-cocycles n'étant pas cohomologues à 0 d'après le Lemme 4, les sommes deux à deux sont toutes infinies.

Avec les hypothèses de la Proposition 1, on peut définir sur G une structure bipolaire en prenant comme partition de $G - \{e\}$ les ensembles EE , EE^* , E^*E , E^*E^* , où XY désigne l'ensemble des $s \in G - \{e\}$ tels que $X \cap sY$ soit fini ($X , Y \in E , E^*$).

N° 5 - Conditions de finitude ([6]).

Les notations restent celles du N° 4 ; on suppose vérifiées les hypothèses de la Proposition 1. Le choix d'une 0-cochaîne E telle que $P = dE$ soit un 1-cocycle minimal détermine donc une structure bipolaire EE , EE^* , E^*E , E^*E^* sur G .

LEMME 5.- Si les trajectoires de G dans K^0 sont en nombre fini, alors E^*E n'est pas vide.

Soit F une 0-cochaîne finie telle que $GF = K^0$ et qui contient tous les sommets des simplexes de P . La distance de deux sommets de K étant définie comme la borne inférieure des longueurs des chaînes de 1-simplexes les joignant, soit r le diamètre de F et D la 0-cochaîne finie, ensemble des sommets de K dont la distance à F est $\leq r$. Puisque $E - D \cap E \neq \emptyset$, il existe un $s \in G - \{e\}$ tel que $sF \cap (E - E \cap D) \neq \emptyset$. On a alors $sF \subset E$. Puisque E^* est connexe, si $E^* \cap sE$ et $E^* \cap sE^*$ sont tous deux non vides, il existe un simplexe de sP dont les extrémités sont dans E^* . Ceci est impossible puisque $sF \subset E$. Supposons $E^*E = \emptyset$. On a alors $s \in E^*E^*$. Puisque $EE^* = (E^*E)^{-1}$, la condition $E^*E = \emptyset$ implique de même que EE contient un élément t . Mais alors $st \in E^*E$, contrairement à l'hypothèse. Par conséquent E^*E n'est pas vide.

Dans ce qui suit, on note $|P|$ l'ensemble des sommets des simplexes appartenant à P .

LEMME 6.- <u>Si</u> $(h_1,\dots,h_n)$ <u>est un mot cassé de</u> G <u>tel que</u> $P \cap h_i P = \emptyset$ <u>pour</u> $i = 1,\dots,n$, <u>alors</u> :

a) P <u>et</u> $h_1 \dots h_n P$ <u>sont disjoints,</u>

b) <u>les</u> $n-1$ <u>cocycles</u> $h_1 \dots h_i P$ <u>sont deux à deux disjoints</u> $(1 \leq i < n)$,

c) <u>tout chemin de</u> 1-<u>simplexes allant d'un point de</u> $|P|$ <u>à un point de</u> $h_1 \dots h_n |P|$ <u>contient un simplexe dans chacun des cocycles</u> $h_1 \dots h_i P$ $(1 \leq i < n)$.

Supposons $n = 2$, $h_1 \in XY$, $h_2 \in Y^*Z$. Puisque $P \cap h_1 P = \emptyset$, on a $X \cap h_1 Y = \emptyset$, d'après le Lemme 2, donc $X \subset h_1 Y^*$. Cela entraîne $|P| \subset h_1 Y^*$. De même $P \cap h_2 P = \emptyset$ entraîne $|P| \subset h_2^{-1} Y$. On a donc $h_1 h_2 |P| \subset h_1 Y$; les assertions a) et c) en résultent. Le cas $n > 2$ s'en déduit facilement en formant des mots cassés de longueur 2 à partir de $(h_1,\dots,h_n)$.

PROPOSITION 2.- <u>La structure bipolaire de</u> G <u>définie par</u> E <u>vérifie la condition</u> :

(Φ) <u>Quel que soit</u> $s \in G$, <u>la longueur des mots cassés qui représentent</u> s <u>admet une borne supérieure finie.</u>

Soit p le nombre des éléments de $|P|$ et soit $(g_1,\dots,g_\ell)$ un mot cassé de longueur $\ell > 2p^2 + 1$ représentant un élément $g \in G$. Les éléments $g_1 \dots g_i$ sont distincts $(1 \leq i \leq \ell)$. Il existe donc un indice $j \in [1, \ell - 1]$ tel que $g_1 \dots g_j P$ soit disjoint de $P \cup gP$. Appliquant le Lemme 6 au mot cassé $(g_1 \dots g_j, g_{j+1} \dots g_\ell)$, on voit que $P \cap gP = \emptyset$. Cela étant, soit M la longueur d'un chemin de 1-simplexes allant d'un point de $|P|$ à un point de $s|P|$ et soit $(s_1,\dots,s_n)$ un mot cassé représentant s . Supposons $n \geq k(M+2)$, avec $k = 2p^2+2$. En appliquant ce qui précède aux mots cassés $(s_1,\dots,s_k)$, $(s_{k+1},\dots,s_{2k}),\dots,(s_{k(M+1)+1},\dots,s_n)$ qui sont de longueur $> 2p^2+1$, et représentent respectivement des éléments $h_1,\dots,h_{M+2}$, on voit que $(h_1,\dots,h_{M+2})$ est un mot cassé représentant s tel que $P \cap h_i P = \emptyset$ pour $i = 1,\dots,M+2$. D'après le Lemme 6, tout chemin allant d'un point de $|P|$ à un point de $s|P|$ devrait être de longueur $\geq M+1$. On ne peut donc avoir $n \geq k(M+2)$.

N° 6 - Démonstration du Théorème 1 (cas d'un groupe G de présentation finie, [6]).

On sait que G est isomorphe au groupe fondamental d'un complexe simplicial fini connexe $\underline{K}$ de dimension ≤ 2 . Soit K un revêtement universel de $\underline{K}$. C'est un complexe simplicial connexe, localement fini, sur lequel le groupe G opère librement et simplicialement. On a $H^1(K) = 0$; ceci entraîne que le nombre des bouts de K est égal à $\dim H^1_f(K) + 1$ (cf. E. Specker [5]). Puisque $\underline{K}$ est fini, il existe une bijection naturelle de l'ensemble des bouts de K sur l'ensemble des bouts de G (cf. H. Hopf [3]). Si G a une infinité de bouts, on a donc $\dim H^1_f(K) = \infty$; d'autre part K est infini. Si de plus G est sans torsion, on peut appliquer les Propositions 1, 2 et le Lemme 5 : il existe sur G une structure bipolaire EE , EE* , E*E , E*E* vérifiant la condition (Φ) et telle que $E^*E \neq \emptyset$. On a vu au N° 3 que cette structure bipolaire donne une décomposition de G en produit libre de deux sous-groupes non triviaux.

Lorsque l'on suppose seulement que G est de type fini, on doit se contenter de faire opérer G librement sur un graphe connexe localement fini K de sorte que $G\backslash K$ soit fini. On obtient encore une structure bipolaire sur G par le procédé du N° 4, c'est-à-dire en partant d'une 0-cochaîne E telle que dP soit un 1-cocycle non cohomologue à zéro dans $H^1_f(K)$. Mais la manière de choisir E doit être modifiée et devient plus délicate (cf. G. Bergman [1]).

BIBLIOGRAPHIE

[1] G. BERGMAN - On groups acting on locally finite graphs, Ann. of Math., 88 (1968), p. 335-340.

[2] H. FREUDENTHAL - Uber die Enden topologischer Raume und Gruppen, Math. Zeitsch., 33 (1931), p. 692-713.

[3] H. HOPF - Enden offener Raüme und unendliche diskontinuierliche Gruppen, Comm. Math. Helv., 16 (1943), p. 81-100.

[4] A. G. KUROSCH - The Theory of groups, Chelsea, N. Y. 1956.

[5] E. SPECKER - Die erste Cohomologiegruppe von Uberlagerungen und Homotopieeigenschaften dreidimensionaler Mannigfaltigkeiten, Comm. Math. Helv., 23 (1949), p. 303-333.

[6] J. STALLINGS - On torsion-free groups with infinitely many ends, Ann. of Math., 88 (1968), p. 312-334.

[7] R. SWAN - Groups of dimension one, (à paraître).