

Title	Variante d'un théorème de H. Ozeki
Author(s)	Koszul, Jean-Louis
Citation	Osaka Journal of Mathematics. 1978, 15(3), p. 547-551
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/4821
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

VARIANTE D'UN THÉOREME DE H. OZEKI

JEAN LOUIS KOSZUL

(Received July 25, 1977)

On démontre dans ce qui suit le résultat suivant:

Théorème. *Soit \mathfrak{g} une algèbre de Lie réductive sur un corps de caractéristique nulle. Si \mathfrak{g} est somme directe de deux sous-algèbres $\mathfrak{a}_1, \mathfrak{a}_2$ réductives dans \mathfrak{g} , alors \mathfrak{g} est somme directe de deux idéaux \mathfrak{b}_1 et \mathfrak{b}_2 tels que la projection de \mathfrak{g} sur \mathfrak{b}_i induise un isomorphisme de \mathfrak{a}_i sur \mathfrak{b}_i ($i=1, 2$).*

L'article de Ozeki cité ([3]) donne une démonstration de ce résultat dans le cas où \mathfrak{g} est une algèbre de Lie compacte sur R . Sa démonstration fait appel à des arguments de nature topologique. La démonstration donnée ici est algébrique.

Etant donnée une algèbre de Lie réductive \mathfrak{a} , on notera $D\mathfrak{a}$ son idéal dérivé et $\rho(\mathfrak{a})$ le nombre des idéaux figurant dans les décompositions de \mathfrak{a} en somme directe d'idéaux minimaux.

Lemme 1. *Les hypothèses étant celles du Théorème, on a*

- (1) $D\mathfrak{g} = D\mathfrak{a}_1 + D\mathfrak{a}_2$
- (2) $\rho(\mathfrak{g}) = \rho(\mathfrak{a}_1) + \rho(\mathfrak{a}_2)$.

Soit p la dimension de \mathfrak{a}_1 et soit f_1, \dots, f_p une base de l'espace des formes linéaires sur \mathfrak{g} qui sont nulles sur \mathfrak{a}_2 . La forme $f_1 \wedge f_2 \wedge \dots \wedge f_p$ est une base de l'espace $C^p(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}_2)$ des p -cochaines sur \mathfrak{g} qui sont basiques par rapport à \mathfrak{a}_2 . C'est un cocycle du complexe $C^*(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}_2)$ dont la classe engendre l'espace $H^p(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}_2)$. En composant l'homomorphisme canonique $\varphi: H^*(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}_2) \rightarrow H^*(\mathfrak{g})$ et l'homomorphisme $\chi: H^*(\mathfrak{g}) \rightarrow H^*(\mathfrak{a}_1)$ défini par l'injection de \mathfrak{a}_1 dans \mathfrak{g} , on obtient un homomorphisme $\chi \circ \varphi: H^*(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}_2) \rightarrow H^*(\mathfrak{a}_1)$. Puisque $f_1 \wedge f_2 \wedge \dots \wedge f_p$ a pour restriction à \mathfrak{a}_1 une base de l'espace $C^p(\mathfrak{a}_1)$ des p -cochaines sur \mathfrak{a}_1 , l'homomorphisme $\chi \circ \varphi$ applique $H^p(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}_2)$ sur $H^p(\mathfrak{a}_1)$. Puisque \mathfrak{a}_1 est unimodulaire, $H^p(\mathfrak{a}_1)$ est de dimension 1. D'autre part, \mathfrak{a}_2 étant réductive dans \mathfrak{g} et \mathfrak{g} étant unimodulaire, tout idéal non nul de $H^*(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}_2)$ contient $H^p(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}_2)$ (cf. [2], Th. 12.1). On voit donc que $\chi \circ \varphi$ est injectif. Puisque \mathfrak{a}_1 est réductive dans \mathfrak{g} , l'image de φ est une sous-algèbre de $H^*(\mathfrak{g})$ engendrée par des éléments primitifs ([2] Th. 13.2). Or χ applique les éléments primitifs de $H^*(\mathfrak{g})$ sur des éléments primitifs de

$H^*(\mathfrak{a}_1)$ ([2] Th. 10.3). Par suite l'image de $\chi \circ \varphi$ est engendrée par des éléments primitifs de $H^*(\mathfrak{a}_1)$. Comme elle contient les éléments de degré maximal p , elle coïncide avec $H^*(\mathfrak{a}_1)$. On a ainsi montré que $\chi \circ \varphi: H^*(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}_2) \rightarrow H^*(\mathfrak{a}_1)$ est un isomorphisme. En échangeant les rôles de \mathfrak{a}_1 et \mathfrak{a}_2 , on prouve de même que l'homomorphisme canonique $H^*(\mathfrak{g}) \rightarrow H^*(\mathfrak{a}_2)$ est surjectif, autrement dit, \mathfrak{a}_2 est "non homologue à zéro" dans \mathfrak{g} . Il en résulte ([2], Th. 17.3) que $H^*(\mathfrak{a})$ est isomorphe à $H^*(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}_2) \otimes H^*(\mathfrak{a}_2)$, donc à $H^*(\mathfrak{a}_1) \otimes H^*(\mathfrak{a}_2)$. En particulier, $\dim H^1(\mathfrak{g}) = \dim H^1(\mathfrak{a}_1) + \dim H^1(\mathfrak{a}_2)$. Ceci signifie que la codimension de $D\mathfrak{g}$ est égale à la somme des codimens de $D\mathfrak{a}_1$ et $D\mathfrak{a}_2$, d'où l'assertion (1) puisque $D\mathfrak{g} \supset D\mathfrak{a}_1 + D\mathfrak{a}_2$. Appliquant ce qui précède à la décomposition de $D\mathfrak{g}$ en somme directe des sous-algèbres $D\mathfrak{a}_1$ et $D\mathfrak{a}_2$, on voit que $H^*(D\mathfrak{g})$ est isomorphe à $H^*(D\mathfrak{a}_1) \otimes H^*(D\mathfrak{a}_2)$, donc, puisque ces algèbres sont semi-simples, $\dim H^3(D\mathfrak{g}) = \dim H^3(D\mathfrak{a}_1) + \dim H^3(D\mathfrak{a}_2)$. Or si \mathfrak{a} est une algèbre de Lie semi-simple, $\rho(\mathfrak{a}) = \dim H^3(\mathfrak{a})$ ([2], Th. 11.2). Par conséquent, le nombre des idéaux minimaux de $D\mathfrak{g}$ est égal à la somme du nombre des idéaux minimaux de $D\mathfrak{a}_1$ et de $D\mathfrak{a}_2$. Avec (1), ceci achève la démonstration de (2).

La suite de la démonstration repose sur des Lemmes élémentaires d'algèbre linéaire.

Lemme 2. *Soit E un espace vectoriel de dimension finie et*

$$E = \bigoplus_{x \in X} V_x, \quad E = \bigoplus_{y \in Y} W_y$$

deux décompositions de E en somme directe de sous-espaces non nuls. On suppose que:

- 1°) *Card $X \leq \text{Card } Y$,*
- 2°) *Pour tout $x \in X$, V_x est contenu dans la somme des sous-espaces W_y , tels que $\dim W_y \geq \dim V_x$.*

Dans ces conditions, quel que soit l'entier $p \geq 0$, les deux familles $(V_x)_{x \in X}$ et $(W_y)_{y \in Y}$ contiennent le même nombre de sous-espaces de dimension p .

Soit v_p (resp. w_p) le nombre des sous-espaces V_x (resp. W_y) qui sont de dimension p et soit $d_p = w_p - v_p$. Si $n = \dim E$, on a

$$(1) \quad d_1 + 2d_2 + \dots + nd_n = 0.$$

Des conditions 1°) et 2°) résultent d'autre part les inégalités:

$$(2) \quad d_1 + d_2 + \dots + d_n \geq 0$$

$$(3) \quad pd_p + (p+1)d_{p+1} + \dots + nd_n \geq 0$$

quel que soit $p \geq 0$. On a donc, d'après (1) et (3):

$$(4) \quad d_1 + 2d_2 + \dots + pd_p \leq 0.$$

Cette relation, avec l'identité

$$(5) \quad p(d_1 + d_2 + \dots + d_p) = d_1 + (d_1 + d_2) + \dots + (d_1 + \dots + d_{p-1}) + (d_1 + 2d_2 + \dots + pd_p)$$

montre par induction sur p que

$$d_1 + d_2 + \dots + d_p \leq 0$$

quel que soit p . Pour $p = n + 1$, la relation (5) s'écrit

$$d_1 + (d_1 + d_2) + \dots + (d_1 + \dots + d_n) = (n + 1)(d_1 + \dots + d_n) - (d_1 + 2d_2 + \dots + nd_n)$$

et ceci est ≥ 0 d'après (1) et (2). On a donc $d_1 + \dots + d_p = 0$ pour tout p , et par conséquent $w_p - v_p = d_p = 0$ pour tout p .

Lemme 3. *Les hypothèses étant celles du Lemme 2, pour tout $y \in Y$, on note π_y le projecteur de E sur W_y , ayant pour noyau la somme des $W_{y'}$ avec $y' \neq y$. On suppose que*

2°) *quel que soit $(x, y) \in X \times Y$, ou bien $V_x \subset \text{Ker } \pi_y$, ou bien $V_x \cap \text{Ker } \pi_y = (0)$.*

Dans ces conditions, il existe une bijection f de X sur Y telle que, pour tout $x \in X$, $\pi_{f(x)}$ induise un isomorphisme de V_x sur $W_{f(x)}$

On observera que la condition 2°) est conséquence de la condition 2°)'. D'après le Lemme 2, la borne supérieure s des dimensions des sous-espaces V_x est aussi la borne supérieure des dimensions des sous-espaces W_y . La démonstration du Lemme 3 se fera par induction sur s . Soient X_s l'ensemble des $x \in X$ tels que $\dim V_x = s$ et Y_s l'ensemble des $y \in Y$ tels que $\dim W_y = s$. D'après le Lemme 2, $\text{Card } X_s = \text{Card } Y_s$ et l'espace E_s , somme des V_x avec $x \in X_s$, est aussi la somme des W_y avec $y \in Y_s$. Pour tout $x \in X_s$, soit $P(x)$ l'ensemble des $y \in Y$ tels que $\pi_y(V_x) \neq (0)$. La condition 2°)' entraîne que $P(x) \subset Y_s$. Pour toute partie $A \subset X_s$, soit $P(A) = \bigcup_{x \in A} P(x) \subset Y_s$. Puisque $\bigoplus_{x \in A} V_x \subset \bigoplus_{y \in P(A)} W_y$, on a $\text{Card } (A) \leq \text{Card } P(A)$. Un Lemme de combinatoire classique (cf. [1], Ensembles, Chap. III, §4, Exer. 6) dit que, dans ces conditions, il existe une injection f_s de X_s dans Y_s telle que $f_s(x) \in P(x)$ quel que soit $x \in X_s$ (*). Pour tout $x \in X_s$, $\pi_{f_s(x)}$ applique isomorphiquement V_x sur $W_{f_s(x)}$. Soit maintenant π' le projecteur $\sum_{y \in Y - Y_s} \pi_y$ et soit E' son image. C'est d'une part la somme directe des sous-espaces W_y avec $y \in Y' = Y - Y_s$, d'autre part la somme directe des sous-espaces $V'_x = \pi'(V_x)$ avec $x \in X' = X - X_s$. Puisque $\text{Card } (X_s) = \text{Card } (Y_s)$, ces

* L'idée d'utiliser ce Lemme ici m'a été donnée par A. Morimoto.

deux décompositions de E' en sommes directes satisfont aux conditions du Lemme. Compte tenu de l'hypothèse inductive, il existe donc une bijection f' de X' sur Y' telle que, pour tout $x \in X'$, $\pi_{f'(x)}$ applique isomorphiquement V'_x sur $W'_{f'(x)}$ et induit donc aussi un isomorphisme de V_x sur $W_{f'(x)}$. En prenant pour f la bijection de X sur Y ayant f_s pour restriction à X_s et f' pour restriction à X' , on obtient une bijection de X sur Y ayant les propriétés voulues.

REMARQUE. Si $y \neq f(x)$, alors $V_x \cap W_y = (0)$. Si $y = f(x)$, ou bien $V_x = W_y$, ou bien $V_x \cap W_y = (0)$.

Lemme 4. *Soit \mathfrak{g} une algèbre de Lie réductible, somme directe des idéaux minimaux $\mathfrak{b}_y (y \in Y)$. On suppose \mathfrak{g} somme directe d'une famille $(\mathfrak{a}_x)_{x \in X}$ de sous-algèbres simples ou de dimension 1. Si $\text{Card}(X) \leq \text{Card}(Y)$, alors $\text{Card}(X) = \text{Card}(Y)$ et il existe une bijection f de X sur Y telle que, pour tout x , la projection de \mathfrak{g} sur $\mathfrak{b}_{f(x)}$ ayant pour noyau $\sum_{y \neq f(x)} \mathfrak{b}_y$, induise un isomorphisme de \mathfrak{a}_x sur $\mathfrak{b}_{f(x)}$.*

C'est une conséquence immédiate du Lemme 3.

Démonstration du Théorème. Supposons d'abord \mathfrak{g} semi-simple. Soit $\mathfrak{a}_i = \bigoplus_{x \in X_i} \mathfrak{a}_x (i=1, 2)$ des décompositions des algèbres \mathfrak{a}_i en somme directe d'idéaux minimaux. Notant X l'union disjointe de X_1 et X_2 , $\mathfrak{g} = \bigoplus_{x \in X} \mathfrak{a}_x$ est une décomposition de \mathfrak{g} en somme directe de sous-algèbres simples ou de dimension 1. D'après le Lemme 1, puisque $\rho(\mathfrak{a}_i) = \text{Card } X_i$, on a $\rho(\mathfrak{g}) = \text{Card } X$. Soit $(\mathfrak{b}_y)_{y \in Y}$ la famille des idéaux minimaux de \mathfrak{g} . On a $\text{Card}(Y) = \rho(\mathfrak{g}) = \text{Card}(X)$. D'après le Lemme 4, il existe donc une bijection f de X sur Y telle que, pour tout $x \in X$, la projection de \mathfrak{g} sur $\mathfrak{b}_{f(x)}$ induise un isomorphisme de \mathfrak{a}_x sur $\mathfrak{b}_{f(x)}$. Si $x, x' \in X_i$, alors $[\mathfrak{a}_x, \mathfrak{a}_{x'}] = (0)$. Puisque le centre de $\mathfrak{b}_{f(x)}$ est nul, ceci entraîne que $\mathfrak{a}_{x'}$ est contenu dans le noyau du projecteur de \mathfrak{g} sur $\mathfrak{b}_{f(x)}$. Par conséquent, si \mathfrak{b}_i désigne l'idéal de \mathfrak{g} somme des $\mathfrak{b}_{f(x)}$ avec $x \in X_i$, $\mathfrak{g} = \mathfrak{b}_1 \oplus \mathfrak{b}_2$ et le projecteur de \mathfrak{g} sur \mathfrak{b}_i applique isomorphiquement \mathfrak{a}_i sur \mathfrak{b}_i . Dans le cas général, on applique ce qui précède à l'algèbre de Lie semi-simple $D\mathfrak{g}$ qui, d'après le Lemme 1 est somme directe des sous-algèbres $D\mathfrak{a}_i (i=1, 2)$. Cela montre que $D\mathfrak{g}$ est somme directe de deux idéaux \mathfrak{b}'_i tels que la projection de $D\mathfrak{g}$ sur \mathfrak{b}'_i induise un isomorphisme de \mathfrak{a}_i sur \mathfrak{b}'_i . Soit \mathfrak{c} le centre de \mathfrak{g} et π le projecteur de \mathfrak{g} sur \mathfrak{c} de noyau $D\mathfrak{g}$. Puisque $D\mathfrak{g} = D\mathfrak{a}_1 + D\mathfrak{a}_2$, π_i applique injectivement le centre de \mathfrak{a}_i sur un idéal $\mathfrak{c}_i \subset \mathfrak{c}$ et \mathfrak{c} est somme directe de \mathfrak{c}_1 et \mathfrak{c}_2 . On pose alors $\mathfrak{b}_i = \mathfrak{b}'_i + \mathfrak{c}_i$. Il est clair que \mathfrak{g} est somme directe des idéaux \mathfrak{b}_i et que la projection de \mathfrak{g} sur \mathfrak{b}_i induit un isomorphisme de \mathfrak{a}_i sur $\mathfrak{b}_i (i=1, 2)$.

Bibliographie

- [1] N. Bourbaki: *Théorie des ensembles*, Chap. III.
- [2] J.L. Koszul: *Homologie et cohomologie des algèbres de Lie*, Bull. Soc. Math. France **78** (1950), 65–127.
- [3] H. Ozeki: *On a transitive transformation group of a compact group manifold*, Osaka J. Math. **14** (1977), 519–531.

