

# 5. Un développement et quelques exemples classiques

Objekttyp: **Chapter**

Zeitschrift: **L'Enseignement Mathématique**

Band (Jahr): **32 (1986)**

Heft 1-2: **L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE**

PDF erstellt am: **16.07.2024**

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

THÉORÈME 11. Soit  $\mathfrak{G}$  un pseudogroupe de transformations d'un ensemble non vide  $X$ , relatif à l'algèbre  $\mathfrak{B}(X)$  de toutes les parties de  $X$ . Les conditions suivantes sont équivalentes :

- i)  $\mathfrak{G}$  n'est pas moyennable.
- ii) Il existe un entier  $n \geq 2$  et des parties  $S_1, \dots, S_{n-1}, S_n, T_1, \dots, T_{n-1}$  de  $X$  avec
  - les  $S_j$  sont équivalents deux à deux,
  - $S_n$  est grand,
  - $T_k$  est équivalent à une partie de  $S_k (k=1, \dots, n-1)$ ,
  - $\left( \coprod_{1 \leq j \leq n} S_j \right) \subset \left( \bigcup_{1 \leq k \leq n-1} T_k \right)$ .
- iii)  $\mathfrak{G}$  est (fortement) paradoxal : il existe une partition  $X = X_1 \sqcup X_2$  avec  $X_j \equiv X \pmod{\mathfrak{G}}$ .

De plus, si ces conditions sont satisfaites, alors deux grandes parties quelconques de  $X$  sont équivalentes modulo  $\mathfrak{G}$ .

On connaît d'autres conditions équivalentes : voir par exemple [R1] pour des conditions à la Følner. Voir aussi le corollaire 3.5 de [R2] : toute action d'un groupe de génération finie et de croissance sous-exponentielle est moyennable.

## 5. UN DÉVELOPPEMENT ET QUELQUES EXEMPLES CLASSIQUES

Soit  $\mathfrak{G}$  un pseudogroupe de transformations d'un espace  $(X, \mathfrak{B})$  donné avec un sous-ensemble non vide  $U \in \mathfrak{B}$ . (Le cas étudié plus haut correspond à  $U = X$ .) Rappelons que nous notons  $\mathfrak{G}_U$  le pseudogroupe de transformations de  $(U, \mathfrak{B}_U)$  défini par  $\mathfrak{G}$ . On appelle *moyenne invariante* pour le système  $(X, U, \mathfrak{B}, \mathfrak{G})$  une fonction  $\mu : \mathfrak{B} \rightarrow [0, \infty]$  telle que

$$\mu(U) = 1,$$

$$\mu(S \cup T) = \mu(S) + \mu(T) \quad \text{pour } S, T \in \mathfrak{B} \text{ avec } S \cap T = \emptyset,$$

$$\mu(T) = \mu(S) \quad \text{s'il existe } \gamma : S \rightarrow T \text{ dans } \mathfrak{G}.$$

La notion est due à von Neumann [vN].

PROPOSITION 12. *On reprend les notations ci-dessus. Pour qu'il existe une moyenne invariante pour  $(X, U, \mathfrak{B}, \mathfrak{G})$ , il faut et il suffit que  $\mathfrak{G}_U$  soit moyennable.*

*Preuve.* Supposons qu'il existe une moyenne  $\mu: \mathfrak{B}_U \rightarrow [0, 1]$  invariante par  $\mathfrak{G}_U$ . Soit  $S \in \mathfrak{B}$ ; s'il existe une  $\mathfrak{B}$ -partition  $S = \coprod_{1 \leq j \leq n} S_j$ , des sous-ensembles  $U_1, \dots, U_n$  de  $U$  et des éléments  $\gamma_j: S_j \rightarrow U_j$  dans  $\mathfrak{G}$  pour  $j = 1, \dots, n$ , on pose  $\mu_X(S) = \sum_{j=1}^n \mu(U_j)$ ; dans le cas contraire, on pose  $\mu_X(S) = \infty$ . On vérifie que  $\mu_X: \mathfrak{B} \rightarrow [0, \infty]$  est une moyenne invariante pour  $(X, U, \mathfrak{B}, \mathfrak{G})$ .

L'implication réciproque est (encore plus) banale.  $\square$

Avec les notations de la preuve, on peut remarquer que  $\mu_X(X) < \infty$  si et seulement si la partie  $U$  est grande dans  $X$ .

Terminons en décrivant quelques exemples bien connus d'espaces paradoxaux.

#### *Exemple 1 : groupes libres agissant librement*

On considère le groupe libre non abélien  $F_2$  à deux générateurs  $a$  et  $b$ , qui agit sur lui-même par multiplication à gauche. Grâce à la proposition 3, on s'assure que l'espace obtenu est paradoxal (au sens faible) en considérant le sous-ensemble  $S$  de  $F_2$ , constitué par les mots réduits de la forme  $a^n w$  avec  $n \in \mathbf{Z}$ ,  $n \neq 0$ ,  $w$  quelconque: en effet  $S, bS, b^2S$  sont disjoints deux à deux, et  $S \cup aS = F_2$ .

On peut vérifier la paradoxalité forte sans l'aide de la proposition 4. Notons  $X_1$  le sous-ensemble de  $F_2$  contenant les puissances  $a^n$  de  $a$  (où  $n \in \mathbf{Z}$ ) et les mots réduits de la forme  $a^n w$  avec  $n \in \mathbf{Z}$ ,  $n \neq 0$ ,  $w \neq \emptyset$ . Le complémentaire  $X_2$  de  $X_1$  consiste en les mots réduits de la forme  $b^n w$  avec  $n \in \mathbf{Z}$ ,  $n \neq 0$ ,  $w$  quelconque. On peut définir (presque comme dans [C]) deux bijections  $\varphi_j: F_2 \rightarrow X_j (j=1, 2)$

$$\varphi_1(g) = \begin{cases} g & \text{si } g = a^n \text{ avec } n \in \mathbf{Z} \\ & \text{ou } g = a^n w \text{ avec } n > 0, \\ a^{-1}g & \text{sinon,} \end{cases}$$

$$\varphi_2(g) = \begin{cases} g & \text{si } g = b^n w \text{ avec } n > 0, \\ b^{-1}g & \text{sinon,} \end{cases}$$

qui montrent que le  $F_2$ -espace  $F_2$  est fortement paradoxal.

Il en résulte que le groupe  $F_2$  n'est pas moyennable.

Plus généralement, tout ensemble  $X$  sur lequel  $F_2$  agit librement est paradoxal (voir [vN], page 82). En effet, on peut choisir un domaine fondamental  $T \subset X$  pour l'action, de sorte que  $X$  et  $F_2 \times T$  sont isomorphes en tant que  $F_2$ -espaces (avec  $F_2$  agissant par multiplications à gauche sur le premier facteur de  $F_2 \times T$ , et trivialement sur le second). Par suite, à tout paradoxe dans  $F_2$  constitué de bijections  $\gamma_j: F_2 \rightarrow T_j (j=1, 2)$ , on peut associer un paradoxe dans  $F_2 \times T$  constitué des bijections  $\gamma_j \times \text{id}_T (j=1, 2)$ .

Comme exemples d'actions libres de  $F_2$ , citons:

- 1) La multiplication à gauche dans un sur-groupe de  $F_2$ .
- 2) Les actions de  $F_2$  sur les sphères  $S^{2n+1} (n \geq 1)$  construites par Deligne et Sullivan [DS].

*Exemple 2: groupes libres agissant avec isotropies abéliennes*

Considérons d'abord l'action de  $F_2$  sur  $F_2 - \{1\}$  par automorphismes intérieurs. L'espace obtenu est paradoxal: en effet, si  $S$  est l'ensemble des mots réduits non vides de la forme  $a^k w a^l$  avec  $k, l \in \mathbb{Z}$  et  $k, l \neq 0$ , alors

- 1)  $S \cup aSa^{-1} \cup a^{-1}Sa = F_2 - \{1\}$ ,
- 2)  $b^j S b^{-j} \cap b^k S b^{-k} = \emptyset, \quad j, k \in \mathbb{Z}, \quad j \neq k$ .

Notons qu'on a de plus  $S^{-1} = S$ . Vu 1) et 2), il n'existe pas de moyenne invariante sur  $F_2 - \{1\}$ : on dit que  $F_2$  n'est pas *intérieurement moyennable*.

Plus généralement, tout ensemble  $Z$ , sur lequel  $F_2$  agit de telle sorte que les groupes d'isotropie sont abéliens, est paradoxal. Notons  $I(z)$  le groupe d'isotropie d'un point  $z \in Z$  pour une telle action, et posons

$$X = \{z \in Z \mid I(z) = \{1\}\}, \quad Y = Z - X.$$

Vu l'exemple 1, il suffit de vérifier que le  $F_2$ -espace  $Y$  est paradoxal. Pour tout  $y \in Y$ , le groupe  $I(y)$  est infini cyclique; on en choisit un générateur  $c(y)$ .

Notons que

$$c(gy) \in \{gc(y)g^{-1}, gc(y)^{-1}g^{-1}\}$$

pour tout  $g \in F_2$  et pour tout  $y \in Y$ . Posons

$$U = \{y \in Y \mid c(y) \in S\}.$$

Les parties  $aU, U, a^{-1}U$  recouvrent  $Y$  par 1) et les parties  $b^j U$  sont disjointes deux à deux ( $j \in \mathbb{Z}$ ) par 2). Donc  $Y$  est paradoxal par une application immédiate de la proposition 3.

Mentionnons avant l'exemple 3 deux autres exemples d'actions de  $F_2$  à isotropies abéliennes

1) Le sous-groupe de  $SL(2, \mathbf{Z})$  engendré par  $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  et  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$  est isomorphe à  $F_2$  (exemple 1 de [He]), donc  $F_2$  agit naturellement sur  $\mathbf{Z} \oplus \mathbf{Z}$  moins l'origine. Cette action est paradoxale.

2) Soient  $G$  un groupe et  $H$  un sous-groupe libre non abélien de  $G$ . On suppose que le centralisateur  $I_g = \{h \in H \mid gh = hg\}$  est abélien pour tout  $g \in G$  avec  $g \neq 1$ . Alors l'action de  $H$  sur  $G - \{1\}$  par automorphismes intérieurs est paradoxale.

Nous avons retrouvé ainsi la proposition 4 et l'exemple 5 de [Ak]: le groupe  $G$  de 2) n'est pas intérieurement moyennable, et en particulier le produit semi-direct de  $F_2$  par  $\mathbf{Z} \oplus \mathbf{Z}$  défini par l'action de 1) n'est pas intérieurement moyennable.

*Exemple 3 : déplacements euclidiens d'un domaine du système solaire*

On se donne un ouvert borné  $E$  de l'univers, contenant la lune et une pomme.

Soit  $B$  une boule de  $E$  de centre  $b$ . Dans l'action sur  $B - \{b\}$  du groupe des rotations  $SO(3)$ , tous les groupes d'isotropie sont abéliens. Or  $SO(3)$  contient un sous-groupe isomorphe à  $F_2$  (voir [Hf], ou [He]). Donc  $B - \{b\}$  est paradoxal pour  $SO(3)$ .

Si  $\mathfrak{G}$  désigne le pseudogroupe des déplacements euclidiens de  $E$ , toute partie  $X \subset E$  d'intérieur non vide contient une grande partie  $B - \{b\}$ . Deux parties de  $E$  d'intérieurs non vides sont donc  $\mathfrak{G}$ -équivalentes par le corollaire 7: c'est le théorème III de l'introduction. Observons que, des sections précédentes, nous n'avons utilisé que la proposition 3, le lemme 5 et le corollaire 7, qui sont indépendants du reste.

La même situation prévaut sur une sphère: la surface de mon jardin est équivalente à celle de Rome modulo le (pseudo)groupe des rotations, contrairement à l'opinion qui apparaît à la page 18 de [GU]. En revanche, le pseudogroupe des déplacements d'un ouvert borné du plan euclidien est moyennable. Nous ignorons s'il a jamais été fait usage d'un argument basé sur ces faits dans la controverse sur la rotondité de la terre.

*Remarque.* Dans les exemples qui précèdent, l'existence de paradoxes est liée à la présence de groupes libres non abéliens.

Considérons plus particulièrement un groupe  $G$ , agissant sur lui-même par multiplication à gauche. La question suivante apparaît implicitement dans [vN] et explicitement dans [K2]: l'existence d'un sous-groupe de  $G$  isomorphe à  $F_2$  est-elle équivalente à l'existence d'une décomposition paradoxale du  $G$ -espace  $G$  (i.e. à la non moyennabilité de  $G$ )?

La réponse semble être non: il existe des groupes paradoxaux (i.e. non moyennables) sans sous-groupe libre. C'est par exemple le cas des groupes de Burnside  $B(2, p)$  pour  $p$  impair et  $p$  assez grand, où  $B(2, p)$  est le quotient du groupe libre  $F_2$  par les relations  $(w^p = 1)_{w \in F_2}$ : voir [O] et [Ad].

### RÉFÉRENCES

- [Ad] ADYAN, S. I. Random walks on free periodic groups. *Math. USSR Izvestiya* 21 (3) (1983), 425-434.
- [Ak] AKEMANN, C. A. Operator algebras associated with Fuchsian groups. *Houston J. Math.* 7 (1981), 295-301.
- [BT] BANACH, S. et A. TARSKI. Sur la décomposition des ensembles de points en parties respectivement congruentes. *Fund. Math.* 6 (1924), 244-277.
- [BH] BÉDOS, E. et P. DE LA HARPE. Moyennabilité intérieure des groupès. *L'Enseignement Math.* 32 (1986), 139-157.
- [C] CONNES, A. Non commutative differential geometry. Chapter I. The Chern character in  $K$ -homology. *Publications Math. IHES N° 62* (1985), 41-144.
- [DS] DELIGNE, P. and D. SULLIVAN. Division algebras and the Hausdorff-Banach-Tarski Paradox. *L'Enseignement Math.* 29 (1983), 145-150.
- [DE] DUBINS, L. E. et M. EMERY. Le paradoxe de Hausdorff-Banach-Tarski. *Gazette des Mathématiciens* 12 (1979), 71-76.
- [GU] GOSCINNY et UDERZO. *Astérix chez les Bretons*. Dargaud 1966.
- [Hf] HAUSDORFF, F. *Grundzüge der Mengenlehre*. Veit 1914.
- [He] DE LA HARPE, P. Free groups in linear groups. *L'Enseignement Math.* 29 (1983), 129-144.
- [HS] HEWITT, E. and K. STROMBERG. *Real and abstract analysis*. Springer 1965.
- [Ke] KESTEN, H. Symmetric random walks on groups. *Trans. Amer. Math. Soc.* 22 (1959), 336-354.
- [K] KURATOWSKI, C. Une propriété des correspondances biunivoques. *Fund. Math.* 6 (1924), 240-243.
- [Kö] KÖNIG, D. Sur les correspondances multivoques des ensembles. *Fund. Math.* 8 (1926), 114-134.