

# 103 Conjugaison dans un groupe. Exemples de sous-groupes distingués et de groupes quotients. Applications.

Soit  $G$  un groupe.

## I - Conjugaison dans un groupe

### 1. Action de conjugaison

**Lemme 1.** On a une action de  $G$  sur lui-même :

$$\forall g, h \in G, g \cdot h = ghg^{-1}$$

[ROM21]  
p. 19

**Définition 2.** L'action précédente est appelée **action de conjugaison**. Le morphisme structural de  $G$  dans  $S(G)$  est noté  $\text{Int}$  :

$$\forall g, h \in G, \text{Int}(g)(h) = ghg^{-1}$$

L'image de  $G$  par ce morphisme  $\text{Int}(G)$  est le groupe des **automorphismes intérieurs** de  $G$ .

**Exemple 3.** Le groupe additif d'un espace vectoriel est un groupe abélien dont le seul automorphisme intérieur est l'identité.

[ULM21]  
p. 20

**Proposition 4.** Muni de la composition, l'ensemble des automorphismes intérieurs de  $G$  est un groupe.

[GOU21]  
p. 21

### 2. Orbites et stabilisateurs

**Définition 5.** On considère l'action de conjugaison de  $G$ .

- Ses orbites sont les **classes de conjugaison** de  $G$ .
- Le stabilisateur d'un élément est le **centralisateur** de celui-ci.
- Deux éléments sont dits **conjugués** s'ils appartiennent à la même classe de conjugaison.

[PER]  
p. 15

**Exemple 6.** Les cycles de même ordre sont conjugués dans  $S_n$ .

**Définition 7.** On définit le **centre** de  $G$  noté  $Z(G)$  par

$$Z(G) = \{g \in G \mid \forall h \in H, gh = hg\}$$

Autrement dit,  $Z(G)$  est l'intersection des centralisateurs des éléments de  $G$ .

p. 12

**Exemple 8.** Si  $G$  est abélien, alors  $Z(G) = G$ .

**Proposition 9.** Soit  $g \in G$ . Alors,  $g \in Z(G)$  si et seulement si sa classe de conjugaison est réduite à un élément.

Ainsi,  $Z(G)$  est l'union des classes de conjugaison de taille 1.

[ULM21]  
p. 36

## II - Sous-groupes distingués et groupes quotients

### 1. Classes à gauche et à droite

**Proposition 10.** Soit  $H < G$ . On définit la relation  $\sim_H$  sur  $G$  par  $g_1 \sim_H g_2 \iff g_1^{-1}g_2 \in H$ .  
Alors :

- (i)  $\sim_H$  est une relation d'équivalence.
- (ii) La classe d'équivalence d'un élément  $g \in G$  pour  $\sim_H$  est  $\bar{g} = gH = \{gh \mid h \in H\}$  appelée **classe à gauche** de  $g$  modulo  $H$ .

p. 24

*Remarque 11.* On définit de la même manière la **classe à droite** d'un élément  $g \in G$  modulo  $H$  que l'on note  $Hg$ .

**Exemple 12.** Soit  $n > 2$ . On considère  $\mathcal{D}_n = \langle r, s \rangle$  le groupe diédral d'ordre  $2n$ . Alors,

$$r\langle s \rangle = \{r, rs\} \neq \{r, sr\} = \langle s \rangle r$$

**Proposition 13.** Soit  $H < G$ . Alors,

$$\forall g \in G, |hG| = |Gh| = |H|$$

## 2. Sous-groupes distingués

**Définition 14.** Soit  $H < G$ . On dit que  $H$  est **distingué** dans  $G$  si,

$$\forall g \in G, gH = Hg$$

On note cela  $H \triangleleft G$ .

[ROM21]  
p. 3

**Exemple 15.** —  $\{e_G\} \triangleleft G, G \triangleleft G$  et  $Z(G) \triangleleft G$ .

- L'intersection de deux sous-groupes distingués dans  $G$  est distinguée dans  $G$ .
- Si  $G$  est abélien, tout sous-groupe de  $G$  est distingué dans  $G$ .

*Remarque 16.* Le symbole  $\triangleleft$  n'est pas transitif.

[GOU21]  
p. 20

**Proposition 17.**

$$H \triangleleft G \iff \forall g \in G, gHg^{-1} \subseteq H$$

**Proposition 18.** Soient  $G_1$  et  $G_2$  deux groupes, et soient  $H_1$  et  $H_2$  deux sous-groupes respectivement de  $G_1$  et de  $G_2$ . Soit  $\varphi : G_1 \rightarrow G_2$  un morphisme. Alors :

- (i) Si  $H_1 \triangleleft G_1$ , alors  $\varphi(H_1) \triangleleft \varphi(G_1)$ .
- (ii) Si  $H_2 \triangleleft G_2$ , alors  $\varphi^{-1}(H_2) \triangleleft G_1$ .

En particulier,  $\text{Ker}(\varphi) \triangleleft G_1$ .

[ULM21]  
p. 16

**Proposition 19.** Soient  $K < H < G$  une suite de sous-groupes. Alors,

$$K \triangleleft G \implies K \triangleleft H$$

p. 43

**Proposition 20.** Soit  $H < G$ . Si  $(G : H) = 2$  (voir sous-section suivante), alors  $H \triangleleft G$ .

p. 25

## 3. Groupes quotients

**Définition 21.** Soit  $H < G$ .

- On appelle **ensemble quotient** de  $G$  par la relation d'équivalence  $\sim_H$  de la Proposition 10, et on note  $G/H$ , l'ensemble des classes à gauche de  $G$  modulo  $H$ .
- On appelle **indice** de  $G$  dans  $H$ , et on note  $(G : H)$ , le cardinal de  $G/H$ .

**Proposition 22.** Soit  $H < G$ . L'ensemble des classes à droite de  $G$  modulo  $H$  est aussi de cardinal égal à  $(G : H)$ .

**Théorème 23.** Un sous-groupe  $H$  de  $G$  est distingué si et seulement si  $*$  définit une loi de groupe sur  $G/H$  par :

$$\forall g_1, g_2 \in G, g_1H * g_2H = (g_1g_2)H$$

telle que la surjection canonique

$$\pi_H : \begin{array}{l} G \rightarrow G/H \\ g \mapsto gH \end{array}$$

soit un morphisme de groupes. Dans ce cas,  $\pi_H$  est un morphisme surjectif de noyau  $H$ .

p. 44

**Définition 24.** Soit  $H < G$ . On appelle **groupe quotient** le groupe  $(G/H, *)$  défini dans le théorème précédent.

**Exemple 25.** Soit  $m \in \mathbb{N}^*$ .  $m\mathbb{Z}$  est un sous-groupe du groupe abélien  $\mathbb{Z}$ . On peut définir le groupe quotient  $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$  : c'est un groupe cyclique d'ordre  $m$ .

#### 4. Théorèmes d'isomorphisme

**Théorème 26** (Premier théorème d'isomorphisme). Soient  $G_1$  et  $G_2$  deux groupes et soit  $\varphi : G_1 \rightarrow G_2$  un morphisme. Alors  $\varphi$  induit un isomorphisme

$$\bar{\varphi} : \begin{array}{l} G_1/\text{Ker}(\varphi) \rightarrow \varphi(G_1) \\ g\text{Ker}(\varphi) \mapsto \varphi(g) \end{array}$$

[ULM21]  
p. 51

**Exemple 27.** — Tout groupe cyclique d'ordre  $n$  est isomorphe à  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ .

$$\text{— } G/Z(G) \cong \text{Int}(G).$$

**Théorème 28** (Deuxième théorème d'isomorphisme). Soient  $H < G$  et  $K < G$ . On pose  $N = H \cap K$ . Alors,

$$N < H \text{ et } H/N \cong HK/K$$

p. 80

**Exemple 29.** On note  $V$  le sous-groupe de  $S_4$  d'ordre 4 isomorphe au groupe de Klein. Alors,

$$V/S_4 \cong S_3$$

p. 51

**Théorème 30** (Troisième théorème d'isomorphisme). Soient  $H, K \triangleleft G$  tels que  $H \subset K$ . Alors,

$$K/H \triangleleft G/H \text{ et } (G/H)/(K/H) \cong G/K$$

**Exemple 31.**

$$(\mathbb{Z}/10\mathbb{Z})/(2\mathbb{Z}/10\mathbb{Z}) \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$$

### III - Applications

#### 1. Application aux $p$ -groupes

Soit  $G$  un groupe fini opérant sur un ensemble fini  $X$ .

[ROM21]  
p. 22

**Définition 32.** On dit que  $G$  est un  $p$ -**groupe** s'il est d'ordre une puissance d'un nombre premier  $p$ .

**Théorème 33** (Formule des classes). Soit  $\Omega$  un système de représentants des orbites de l'action de  $G$  sur  $X$ . Alors,

$$|X| = \sum_{\omega \in \Omega} |G \cdot \omega| = \sum_{\omega \in \Omega} (G : \text{Stab}_G(\omega)) = \sum_{\omega \in \Omega} \frac{|G|}{|\text{Stab}_G(\omega)|}$$

**Corollaire 34.** Soit  $p$  un nombre premier. Si  $G$  est un  $p$ -groupe opérant sur  $X$ , alors,

$$|X^G| \equiv |X| \pmod{p}$$

où  $X^G$  désigne l'ensemble des points fixes de  $X$  sous l'action de  $G$ .

**Corollaire 35.** On note  $G \cdot h_1, \dots, G \cdot h_r$  les classes de conjugaison de  $G$ . Alors,

$$\begin{aligned} |G| &= |Z(G)| + \sum_{\substack{i=1 \\ |G \cdot h_i|=2}}^r |G \cdot h_i| \\ &= |Z(G)| + \sum_{\substack{i=1 \\ |G \cdot h_i|=2}}^r \frac{|G|}{|\text{Stab}_G(h_i)|} \end{aligned}$$

**Corollaire 36.** Soit  $p$  un nombre premier. Le centre d'un  $p$ -groupe non trivial est non trivial.

**Corollaire 37.** Soit  $p$  un nombre premier. Un groupe d'ordre  $p^2$  est toujours abélien.

**Application 38** (Théorème de Cauchy). On suppose  $G$  non trivial et fini. Soit  $p$  un premier divisant l'ordre de  $G$ . Alors il existe un élément d'ordre  $p$  dans  $G$ .

[DEV]

**Application 39** (Premier théorème de Sylow). On suppose  $G$  fini d'ordre  $np^\alpha$  avec  $n, \alpha \in \mathbb{N}$  et  $p$  premier tel que  $p \nmid n$ . Alors, il existe un sous-groupe de  $G$  d'ordre  $p^\alpha$ .

[GOU21]  
p. 44

## 2. Application au groupe symétrique

**Lemme 40.** Les 3-cycles sont conjugués dans  $A_n$  pour  $n \geq 5$ .

[PER]  
p. 15

**Lemme 41.** Le produit de deux transpositions est un produit de 3-cycles.

[ROM21]  
p. 49

**Proposition 42.**  $A_n$  est engendré par les 3-cycles pour  $n \geq 3$ .

[DEV]

**Théorème 43.**  $A_n$  est simple pour  $n \geq 5$ .

[PER]  
p. 28

**Corollaire 44.** Pour  $n \geq 5$ , les sous-groupes distingués de  $S_n$  sont  $S_n$ ,  $A_n$  et  $\{\text{id}\}$ .

**Application 45.**  $A_5$  est le seul groupe simple d'ordre 60 à isomorphisme près.

[ULM21]  
p. 92

## 3. Application au groupe linéaire d'un espace vectoriel

Dans cette partie,  $E$  désignera un espace vectoriel sur un corps  $\mathbb{K}$  de dimension finie  $n$ .

### a. Centre

**Définition 46.** Soit  $H$  un hyperplan de  $E$  et soit  $u \in \text{SL}(E) \setminus \{\text{id}_E\}$ . Posons  $D = \text{Im}(u - \text{id}_E)$ . On dit que  $u$  est une **transvection** d'hyperplan  $H$  et de droite  $D$  si  $u|_H = \text{id}_H$  (et dans ce cas,  $D \subset H$ ).

[PER]  
p. 97

**Proposition 47.**  $u \in \text{GL}(E)$  est une transvection de droite  $D$  si et seulement si  $u|_D = \text{id}_D$  et le morphisme induit  $\bar{u} : E/D \rightarrow E/D$  est l'identité.

**Proposition 48.** Soit  $\tau$  une transvection de droite  $D$  et d'hyperplan  $H$  et soit  $u \in \text{GL}(E)$ . Alors  $u\tau u^{-1}$  est une transvection de droite  $u(D)$  et d'hyperplan  $u(H)$ .

**Corollaire 49.** (i)  $Z(\mathrm{GL}(E)) = \{\lambda \mathrm{id}_E \mid \lambda \in \mathbb{K}^*\}$ .

(ii)  $Z(\mathrm{SL}(E)) = Z(\mathrm{GL}(E)) \cap \mathrm{SL}(E) \cong \mu_n(\mathbb{K})$ .

## b. Conjugaison

**Définition 50.** Soit  $H$  un hyperplan de  $E$  et soit  $u \in \mathrm{GL}(E) \setminus \mathrm{SL}(E)$ . Posons  $D = \mathrm{Im}(u - \mathrm{id}_E)$ . On dit que  $u$  est une **dilatation de droite  $D$  et d'hyperplan  $H$**  si  $u|_H = \mathrm{id}_H$ .

Le **rapport** de cette dilatation est le scalaire  $\det(u)$ .

**Proposition 51.** Deux dilatations sont conjuguées dans  $\mathrm{GL}(E)$  si et seulement si elles ont le même rapport.

**Proposition 52.** Deux transvections sont toujours conjuguées dans  $\mathrm{GL}(E)$ . Si  $n \geq 3$ , elles le sont aussi dans  $\mathrm{SL}(E)$ .

## c. Groupe projectif

**Définition 53.** Le quotient de  $\mathrm{GL}(E)$  par son centre est appelé **groupe projectif linéaire** et est noté  $\mathrm{PGL}(E)$ . De même, le quotient de  $\mathrm{SL}(E)$  par son centre est noté  $\mathrm{PSL}(E)$ .

*Remarque 54.* Soit  $h_\lambda : x \mapsto \lambda x$ , on a  $\det h_\lambda = \lambda^n$ , de sorte qu'on a une suite exacte :

$$\{\overline{\mathrm{id}_E}\} \rightarrow \mathrm{PSL}(E) \rightarrow \mathrm{PGL}(E) \xrightarrow{\overline{\det}} \mathbb{K}^* / \mathbb{K}^{*n} \rightarrow \{\overline{\mathrm{id}_E}\}$$

où on a posé  $\mathbb{K}^{*n} = \{\lambda \in \mathbb{K}^* \mid \exists \mu \in \mathbb{K}^*, \lambda = \mu^n\}$ . En particulier, si  $\mathbb{K}$  est algébriquement clos,  $\mathrm{PSL}(E) \cong \mathrm{PGL}(E)$ .

**Théorème 55.** Le groupe  $\mathrm{PSL}(E)$  est simple sauf si  $n = 2$  et  $\mathbb{K} = \mathbb{F}_2$  ou  $\mathbb{F}_3$ .

## 4. Représentations linéaires de groupes finis

Dans cette partie, on suppose que  $G$  est d'ordre fini.

**Définition 56.** — Une **représentation linéaire**  $\rho$  est un morphisme de  $G$  dans  $\mathrm{GL}(V)$  où  $V$  désigne un espace-vectoriel de dimension finie  $n$  sur  $\mathbb{C}$ .

— On dit que  $n$  est le **degré** de  $\rho$ .

— On dit que  $\rho$  est **irréductible** si  $V \neq \{0\}$  et si aucun sous-espace vectoriel de  $V$  n'est

stable par  $\rho(g)$  pour tout  $g \in G$ , hormis  $\{0\}$  et  $V$ .

**Exemple 57.** Soit  $\varphi : G \rightarrow S_n$  le morphisme structurel d'une action de  $G$  sur un ensemble de cardinal  $n$ . On obtient une représentation de  $G$  sur  $\mathbb{C}^n = \{e_1, \dots, e_n\}$  en posant

$$\rho(g)(e_i) = e_{\varphi(g)(i)}$$

c'est la représentation par permutations de  $G$  associée à l'action. Elle est de degré  $n$ .

**Définition 58.** La représentation par permutations de  $G$  associée à l'action par translation à gauche de  $G$  sur lui-même est la **représentation régulière** de  $G$ , on la note  $\rho_G$ .

**Définition 59.** On peut associer à toute représentation linéaire  $\rho$ , son **caractère**  $\chi = \text{trace} \circ \rho$ . On dit que  $\chi$  est **irréductible** si  $\rho$  est irréductible.

p. 150

**Proposition 60.** (i) Les caractères sont des fonctions constantes sur les classes de conjugaison.

(ii) Il y a autant de caractères irréductibles que de classes de conjugaisons.

**Définition 61.** Soit  $\rho : G \rightarrow \text{GL}(V)$  une représentation linéaire de  $G$ . On suppose  $V = W \oplus W_0$  avec  $W$  et  $W_0$  stables par  $\rho(g)$  pour tout  $g \in G$ . On dit alors que  $\rho$  est **somme directe** de  $\rho_W$  et de  $\rho_{W_0}$ .

**Théorème 62 (Maschke).** Toute représentation linéaire de  $G$  est somme directe de représentations irréductibles.

**Théorème 63.** Les sous-groupes distingués de  $G$  sont exactement les

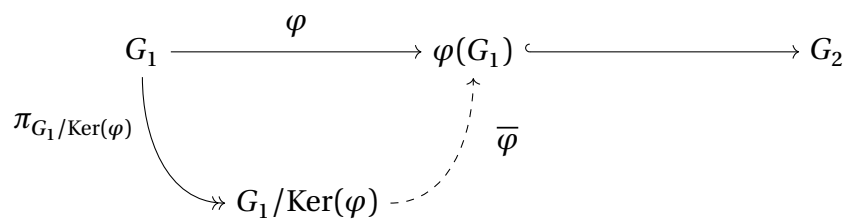
$$\bigcap_{i \in I} \text{Ker}(\rho_i) \text{ où } I \in \mathcal{P}(\llbracket 1, r \rrbracket)$$

[PEY]  
p. 231

**Corollaire 64.**  $G$  est simple si et seulement si  $\forall i \neq 1, \forall g \neq e_G, \chi_i(g) \neq \chi_i(e_G)$ .



## Annexes



[ULM21]  
p. 51

FIGURE 1 – Illustration du premier théorème d’isomorphisme par un diagramme.

# Bibliographie

## Les maths en tête

[GOU21]

Xavier GOURDON. *Les maths en tête. Algèbre et probabilités*. 3<sup>e</sup> éd. Ellipses, 13 juill. 2021.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/13722-25266-les-maths-en-tete-algebre-et-probabilites-3e-edition-9782340056763.html>.

## Cours d'algèbre

[PER]

Daniel PERRIN. *Cours d'algèbre. pour l'agrégation*. Ellipses, 15 fév. 1996.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/7778-18110-cours-d-algebre-agregation-9782729855529.html>.

## L'algèbre discrète de la transformée de Fourier

[PEY]

Gabriel PEYRÉ. *L'algèbre discrète de la transformée de Fourier. Niveau M1*. Ellipses, 15 jan. 2004.

<https://adtf-livre.github.io>.

## Mathématiques pour l'agrégation

[ROM21]

Jean-Étienne ROMBALDI. *Mathématiques pour l'agrégation. Algèbre et géométrie*. 2<sup>e</sup> éd. De Boeck Supérieur, 20 avr. 2021.

<https://www.deboecksuperieur.com/ouvrage/9782807332201-mathematiques-pour-l-agregation-algebre-et-geometrie>.

## Théorie des groupes

[ULM21]

Felix ULMER. *Théorie des groupes. Cours et exercices*. 2<sup>e</sup> éd. Ellipses, 3 août 2021.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/13760-25304-theorie-des-groupes-2e-edition-9782340057241.html>.