

Théorie des groupes

Table des matières

1. Groupes	2
2. Sous-groupes	3
2.1. Définitions	3
2.2. Générateurs	4
2.3. Ordre d'un élément	5
3. Morphismes de groupes	6
3.1. Définitions	6
3.2. Image et noyau	7
4. Groupes symétriques	8
4.1. Définitions	8
4.2. k -cycles	8
4.3. Permutations conjuguées	9
4.4. Signature d'une permutation	10
4.5. Groupes alternés	11
5. Groupes quotients	12
5.1. Relations d'équivalence	12
5.2. Classes modulo un sous-groupe	13
5.3. Théorème du nombre de classes et théorème de Lagrange	14
5.4. Sous-groupes distingués et groupes quotients	14
6. Actions de groupes	17
6.1. Définitions	17
6.2. Espace des orbites	17
7. Classification des groupes abéliens finis	18
7.1. Décomposition en p -groupes	18
7.2. Décomposition des p -groupes en produit de groupes cycliques	19
7.3. Facteurs invariants d'un groupe	20

1. Groupes

Définition 1.1. Soit G un ensemble et $\star : G \times G \rightarrow G$ une loi de composition interne. On dit que le couple (G, \star) forme un *groupe* s'il vérifie les propriétés suivantes

- (1) la loi \star est associative, $\forall x, y, z \in G, (x \star y) \star z = x \star (y \star z)$,
- (2) il existe un neutre $e_G \in G, \forall x \in G, x \star e_G = e_G \star x = x$,
- (3) existence d'un inverse, $\forall x \in G, \exists x^{-1} \in G, x \star x^{-1} = x^{-1} \star x = e_G$.

Exemple 1.2. Le couple $(\mathbb{Z}, +)$ est un groupe, le neutre est 0 et pour $n \in \mathbb{Z}$ un inverse est $-n$. Le couple (\mathbb{R}, \cdot) n'est pas un groupe, 0 n'admet pas d'inverses.

Proposition 1.3. Soit (G, \star) un groupe. Alors

- (1) le neutre e_G est unique,
- (2) soit $x \in G$, alors son inverse x^{-1} est unique.

Démonstration.

- (1) Soit $e \in G$ vérifiant $\forall x \in G, x \star e = e \star x = x$. Alors

$$e = e \star e_G = e_G.$$

- (2) Soit $y \in G$ vérifiant $x \star y = y \star x = e_G$. Alors

$$y = e_G \star y = (x^{-1} \star x) \star y = x^{-1} \star (x \star y) = x^{-1} \star e_G = x^{-1}.$$

□

Définition 1.4. Soit (G, \star) un groupe. On dit qu'il est *commutatif* ou *abélien* s'il vérifie

$$\forall x, y \in G, x \star y = y \star x.$$

Exemple 1.5. Le groupe $(\mathbb{Z}, +)$ est commutatif.

Définition 1.6. Soit (G, \star) un groupe. On appelle *ordre* de G le cardinal de G , si G est un ensemble fini on dit que G est d'*ordre fini*, sinon on dit que G est d'*ordre infini*.

Remarque 1.7. Soit (G, \star) un groupe d'ordre fini. On note $G = \{e_G, g_1, \dots, g_n\}$, alors on peut donner sa table de multiplication

\star	e_G	g_1	\dots	g_j	\dots	g_n
e_G	e_G	g_1	\dots	g_j	\dots	g_n
g_1	g_1	$g_1 \star g_1$	\dots	$g_1 \star g_j$	\dots	$g_1 \star g_n$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots
g_i	g_i	$g_i \star g_1$	\dots	$g_i \star g_j$	\dots	$g_i \star g_n$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots
g_n	g_n	$g_n \star g_1$	\dots	$g_n \star g_j$	\dots	$g_n \star g_n$

où chaque ligne et chaque colonne contient tous les éléments de G .

Notation 1.8. Soit (G, \star) un groupe. Lorsqu'il ne peut pas y avoir de confusions, on notera

- $e := e_G$ pour le neutre,
- $\forall x, y \in G, xy := x \star y$ pour la loi \star ,
- $\forall x \in G, \forall n \in \mathbb{Z}$, si $n > 0, x^n := \underbrace{x \star \dots \star x}_{n \text{ fois}}$, si $n = 0, x^0 := e$, si $n < 0, x^n := x^{-1} \star \dots \star x^{-1}$.

2. Sous-groupes

2.1. Définitions

Définition 2.1. Soit (G, \star) un groupe et H un sous-ensemble de G . On dit que H est un *sous-groupe* de G , noté $H < G$, s'il vérifie les propriétés suivantes

- (1) le neutre appartient à H , $e \in H$,
- (2) H est stable par \star , $\forall x, y \in H, x \star y \in H$,
- (3) H est stable par inverse, $\forall x \in H, x^{-1} \in H$.

Définition 2.2. Soit (G, \star) un groupe et H un sous-groupe de G . On dit que H est *distingué* ou *normal*, noté $H \triangleleft G$, s'il vérifie

$$\forall g \in G, \forall h \in H, g \star h \star g^{-1} \in H.$$

Proposition 2.3. Soit (G, \star) un groupe et H un sous-ensemble de G . Alors H est un sous-groupe de G si et seulement s'il vérifie les propriétés suivantes

- (1) le neutre appartient à H , $e \in H$,
- (2) H est stable par \star et par inverse, $\forall x, y \in H, x \star y^{-1} \in H$.

Démonstration.

\Rightarrow : Supposons que H est un sous-groupe de G . Alors

- (1) le neutre appartient à H ,
- (2) soit $x, y \in H$, alors $y^{-1} \in H$ et $x \star y^{-1} \in H$.

\Leftarrow : Supposons que H vérifie les deux propriétés. Alors

- (1) le neutre appartient à H ,
- (3) soit $x \in H$, alors $x^{-1} = e \star x^{-1} \in H$,
- (2) soit $x, y \in H$, alors $y^{-1} \in H$ et $x \star y = x \star (y^{-1})^{-1} \in H$.

□

Proposition 2.4. Soit (G, \star) un groupe et H un sous-ensemble de G . Alors H est un sous-groupe de G si et seulement s'il vérifie les propriétés suivantes

- (1) H est stable par \star , $\forall x, y \in H, x \star y \in H$,
- (2) le couple (H, \star) forme un groupe.

Démonstration.

\Rightarrow : Supposons que H est un sous-groupe de G . Alors

- (1) H est stable par \star , $\forall x, y \in H, x \star y \in H$,
- (2) On considère le couple (H, \star) ,
 - (a) soit $x, y, z \in H$, alors $x, y, z \in G$ donc $(x \star y) \star z = x \star (y \star z)$,
 - (b) on pose $e_H = e_G$, alors $e_H \in H$,
 - (c) soit $x \in H$, alors $x^{-1} \in H$.

Donc (H, \star) forme un groupe.

\Leftarrow : Supposons que H vérifie les deux propriétés. Alors

- (1) soit $x \in H$, alors $x \in G$ et $x \star e_G = x = x \star e_H$, en multipliant à gauche par $x^{-1} \in G$, on obtient donc $e_G = e_H \in H$.
- (2) H est stable par \star ,
- (3) soit $x \in H$, alors $x^{-1} \in H$.

□

Proposition 2.5. Soit (G, \star) un groupe et H_1, H_2 deux sous-groupes de G . Alors $H_1 \cap H_2$ est un sous-groupe de G .

Démonstration.

- (1) $e \in H_1$ et $e \in H_2$, donc $e \in H_1 \cap H_2$,
- (2) soit $x, y \in H_1 \cap H_2$, alors $x, y \in H_1$, puisque H_1 est un sous-groupe de G on a $x \star y^{-1} \in H_1$, de la même manière on a $x \star y^{-1} \in H_2$, donc $x \star y^{-1} \in H_1 \cap H_2$.

Donc d'après la [Proposition 2.3](#), $H_1 \cap H_2$ est un sous-groupe de G . □

2.2. Générateurs

Définition 2.6. Soit (G, \star) un groupe et S un sous-ensemble non-vidé de G . On appelle *sous groupe engendré par S* , noté $\langle S \rangle$, le plus petit sous-groupe de G contenant S .

Notation 2.7. Si $S = \{x_1, \dots, x_n\}$, on note $\langle x_1, \dots, x_n \rangle := \langle S \rangle$.

Proposition 2.8. Soit (G, \star) un groupe et S un sous-ensemble non-vidé de G . Alors

$$\langle S \rangle = \bigcap_{\substack{H < G \\ S \subset H}} H$$

ou encore $\langle S \rangle = \{x_1 \star \dots \star x_n \mid n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}, \forall i \in \{1, \dots, n\}, x_i \in S \text{ ou } x_i^{-1} \in S\}$.

Démonstration. Notons $F := \{H < G \mid S \subset H\}$ et $H_S := \bigcap_{H \in F} H$. Puisque $G \in F$, l'intersection est non-vidé, et d'après la [Proposition 2.5](#), H_S est un sous-groupe de G . De plus H_S contient évidemment S . Enfin si H_0 est un sous-groupe de G contenant S , on a $H_0 \in F$, donc $H_0 \subset H_S$. Donc H_S est bien le plus petit sous-groupe de G contenant S .

Notons $K_S := \{x_1 \star \dots \star x_n \mid n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}, \forall i \in \{1, \dots, n\}, x_i \in S \text{ ou } x_i^{-1} \in S\}$. On remarque que K_S est stable par multiplication, par inverse et contient le neutre de G , donc d'après la [Proposition 2.3](#), K_S est un sous-groupe de G . De plus K_S contient S , donc $\langle S \rangle \subset K_S$. Réciproquement, puisque $\langle S \rangle$ est un groupe, on en déduit que $\forall x \in K_S, x \in \langle S \rangle$, donc $K_S \subset \langle S \rangle$. Par double inclusion $\langle S \rangle = K_S$. □

Définition 2.9. Soit (G, \star) un groupe et S un sous-ensemble de G . Si $G = \langle S \rangle$, on dit que G est *engendré par S* et on appelle S un *système de générateurs* pour G .

- Si S est fini, on dit que G est *finiment engendré*.
- Si S ne contient qu'un élément, on dit que G est *monogène*, si de plus G est fini, on dit que G est *cyclique*.

Exemple 2.10.

1. Soit (G, \star) un groupe, G a au moins un système de générateur $S := G$.
2. On considère le groupe $(\mathbb{Z}, +)$, il est engendré par \mathbb{N} , et par $\{1\}$, donc il est monogène.
3. On considère le groupe $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +)$, il est engendré par $\{\overline{1}\}$ et est fini, donc il est cyclique.

Proposition 2.11. On considère le groupe $(\mathbb{Z}, +)$, alors

- (1) $\forall n \in \mathbb{Z}, \langle n \rangle = n\mathbb{Z}$,
- (2) soit H est un sous-groupe de $(\mathbb{Z}, +)$, alors il existe $n \in \mathbb{Z}$ tel que $H = n\mathbb{Z}$,
- (3) soit $a, b \in \mathbb{Z}$ avec $b \neq 0$, alors b divise a si et seulement si $\langle a \rangle \subset \langle b \rangle$,
- (4) soit $a, b \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$, alors $\langle a, b \rangle = \text{pgcd}(a, b)\mathbb{Z}$ et $\langle a \rangle \cap \langle b \rangle = \text{ppcm}(a, b)\mathbb{Z}$.

Démonstration.

- (1) Soit $n \in \mathbb{Z}$, alors $\langle n \rangle = \{k \cdot n \mid k \in \mathbb{Z}\} = n\mathbb{Z}$.
- (2) • Si $H = \{0\}$, alors $H = 0\mathbb{Z}$.
 • Sinon, $H \setminus \{0\}$ est non-vidé, on prend n le plus petit entier strictement positif de H .
 Puisque $n \in H$, on a $n\mathbb{Z} \subset H$. Réciproquement, soit $m \in H$, par division euclidienne il existe $q, r \in \mathbb{Z}$ tels que $m = nq + r$ et $0 \leq r < n$, puisque $r = m - nq \in H$, on a nécessairement $r = 0$, d'où $m \in n\mathbb{Z}$, donc $H \subset n\mathbb{Z}$. Donc $H = n\mathbb{Z}$.

- (3) On sait que b divise a si et seulement si il existe $q \in \mathbb{Z}$ tel que $a = bq$ si et seulement si $a \in \langle b \rangle$ si et seulement si $\langle a \rangle \subset \langle b \rangle$.
- (4) *TODO* : Voir TD.

□

2.3. Ordre d'un élément

Définition 2.12. Soit (G, \star) un groupe et $x \in G$. On appelle *ordre de x* , noté $\text{ord}(x)$, le cardinal du sous-groupe engendré par $\{x\}$.

Proposition 2.13. Soit (G, \star) un groupe et $x \in G$. Alors

$$\text{ord}(x) = \inf(\{d \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \mid x^d = e\})$$

de plus si $n \in \mathbb{Z}$ vérifie $x^n = e$, alors $\text{ord}(x)$ divise n .

Démonstration.

- Si $\text{ord}(x) = +\infty$, supposons par l'absurde qu'il existe $d \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ tel que $x^d = e$. Alors $\langle x \rangle = \{e, x, \dots, x^{d-1}\}$ est fini, d'où une contradiction.
- Sinon $\text{ord}(x) \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$.
Puisque $\langle x \rangle$ est fini, il existe $m, n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ tels que $n < m$ et $x^m = x^n$, alors $x^{m-n} = e$, donc l'ensemble $\{d \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \mid x^d = e\}$ est non-vidé. Posons $d := \inf(\{d \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \mid x^d = e\})$, puisque $x^d = e$, on obtient $\langle x \rangle = \{e, x, \dots, x^{d-1}\}$, donc $\text{ord}(x) = |\{e, x, \dots, x^{d-1}\}| = d$.
- Soit $n \in \mathbb{Z}$ tel que $x^n = e$. Par division euclidienne il existe $q, r \in \mathbb{Z}$ tels que $n = \text{ord}(x)q + r$ et $0 \leq r < d$, alors $x^r = x^{n - \text{ord}(x)q} = x^n \star x^{\text{ord}(x) \cdot (-q)} = e$, par définition de $\text{ord}(x)$ on a nécessairement $r = 0$, donc $\text{ord}(x)$ divise n .

□

3. Morphismes de groupes

3.1. Définitions

Définition 3.1. Soit (G, \star) et (H, \cdot) deux groupes. Une application $\varphi : G \rightarrow H$ est un *morphisme de groupes* si elle vérifie

$$\forall x, y \in G, \varphi(x \star y) = \varphi(x) \cdot \varphi(y).$$

- Si $H = G$, on dit que φ est un *endomorphisme*.
- Si φ est une bijection, on dit que φ est un *isomorphisme*, et G et H sont *isomorphes*, noté $G \simeq H$.

Proposition 3.2. Soit (G, \star) et (H, \cdot) deux groupes, et $\varphi : G \rightarrow H$ un morphisme de groupes.

- (1) le neutre est envoyé sur le neutre, $\varphi(e_G) = e_H$,
- (2) l'inverse est envoyé sur l'inverse, $\forall x \in G, \varphi(x^{-1}) = \varphi(x)^{-1}$.

Démonstration.

- (1) On a $\varphi(e_G) = \varphi(e_G \star e_G) = \varphi(e_G) \cdot \varphi(e_G)$, donc $\varphi(e_G) = e_H$,
- (2) soit $x \in G$, alors $e_H = \varphi(e_G) = \varphi(x \star x^{-1}) = \varphi(x) \cdot \varphi(x^{-1})$, donc $\varphi(x^{-1}) = \varphi(x)^{-1}$.

□

Proposition 3.3. Soit (G, \star) et (H, \cdot) deux groupes, et $\varphi : G \rightarrow H$ un isomorphisme. Alors son inverse, noté φ^{-1} , est un isomorphisme.

Démonstration. Soit $x, y \in H$. Puisque φ est un morphisme de groupes on a

$$\varphi(\varphi^{-1}(x \cdot y)) = x \cdot y = \varphi(\varphi^{-1}(x)) \cdot \varphi(\varphi^{-1}(y)) = \varphi(\varphi^{-1}(x) \star \varphi^{-1}(y))$$

et par injectivité de φ , on obtient $\varphi^{-1}(x \cdot y) = \varphi^{-1}(x) \star \varphi^{-1}(y)$, donc φ^{-1} est un morphisme. □

Proposition 3.4. Soit (G, \star) , (H, \cdot) et (K, \blacksquare) trois groupes, et $\varphi : G \rightarrow H$ et $\psi : H \rightarrow K$ deux morphismes de groupes. Alors $\psi \circ \varphi$ est un morphisme de groupes.

Démonstration. Soit $x, y \in G$. Alors

$$\begin{aligned} (\psi \circ \varphi)(x \star y) &= \psi(\varphi(x \star y)) \\ &= \psi(\varphi(x) \cdot \varphi(y)) \\ &= \psi(\varphi(x)) \blacksquare \psi(\varphi(y)) \\ &= (\psi \circ \varphi)(x) \blacksquare (\psi \circ \varphi)(y) \end{aligned}$$

donc $\psi \circ \varphi$ est un morphisme de groupes. □

Proposition 3.5. Soit (G, \star) et (H, \cdot) deux groupes isomorphes. Alors

- (1) G et H ont le même ordre,
- (2) G est abélien si et seulement si H est abélien,
- (3) G est monogène si et seulement si H est monogène,
- (4) $\forall \varphi : G \rightarrow H$ isomorphisme, $\forall x \in G, \text{ord}(x) = \text{ord}(\varphi(x))$.

Démonstration. Soit $\varphi : G \rightarrow H$ un isomorphisme.

- (1) G et H sont en bijection, donc $|G| = |H|$.
- (2) \Rightarrow : Supposons que G est abélien. Soit $x, y \in H$, puisque φ est un isomorphisme

$$\varphi^{-1}(x) \star \varphi^{-1}(y) = \varphi^{-1}(y) \star \varphi^{-1}(x) \Rightarrow x \cdot y = y \cdot x$$

donc H est abélien.

\Leftarrow : On montre la réciproque de la même manière.

- (3) \Rightarrow : Supposons que G est monogène. Alors il existe $x \in G$ tel que $G = \langle x \rangle$, ainsi

$$H = \varphi(G) = \varphi(\langle x \rangle) = \langle \varphi(x) \rangle$$

donc H est monogène.

\Rightarrow : On montre la réciproque de la même manière.

(4) Soit $x \in G$, alors $\forall d \in \mathbb{N} \setminus \{0\}, x^d = e_G \Leftrightarrow \varphi(x)^d = e_H$, donc $\text{ord}(x) = \text{ord}(\varphi(x))$.

□

3.2. Image et noyau

Définition 3.6. Soit (G, \star) et (H, \cdot) deux groupes, et $\varphi : G \rightarrow H$ un morphisme de groupes.

- On appelle *image* de φ l'ensemble $\text{im}(\varphi) := \varphi(G)$.
- On appelle *noyau* de φ l'ensemble $\ker(\varphi) := \varphi^{-1}(e_H)$.

Proposition 3.7. Soit (G, \star) et (H, \cdot) deux groupes, et $\varphi : G \rightarrow H$ un morphisme de groupes. Alors $\text{im}(\varphi)$ est un sous-groupe de H et $\ker(\varphi)$ est un sous-groupe de G . Plus généralement si G' est un sous-groupe de G et H' un sous-groupe de H , alors $\varphi(G')$ est un sous-groupe de H et $\varphi^{-1}(H')$ est un sous-groupe de G .

Démonstration. On considère $\varphi(G')$,

(1) $e_H = \varphi(e_G)$, donc $e_H \in \varphi(G')$,

(2) soit $x, y \in \varphi(G')$, il existe $u, v \in G'$ tels que $x = \varphi(u)$ et $y = \varphi(v)$, alors

$$x \cdot y^{-1} = \varphi(u) \cdot \varphi(v)^{-1} = \varphi(u \star v^{-1})$$

puisque G' est un sous-groupe de G , on a $u \star v^{-1} \in G'$, donc $x \cdot y^{-1} \in \varphi(G')$.

D'après la Proposition 2.3, $\varphi(G')$ est un sous-groupe de H .

On considère $\varphi^{-1}(H')$,

(1) $e_G = \varphi(e_H)$, donc $e_G \in \varphi^{-1}(H')$.

(2) soit $x, y \in \varphi^{-1}(H')$, alors $\varphi(x), \varphi(y) \in H'$ et

$$x \star y^{-1} \in \varphi^{-1}(H') \Leftrightarrow \varphi(x \star y^{-1}) \in H' \Leftrightarrow \varphi(x) \cdot \varphi(y)^{-1} \in H'$$

puisque H' est un sous-groupe de H , on a $\varphi(x) \cdot \varphi(y)^{-1} \in H'$, donc $x \star y^{-1} \in \varphi^{-1}(H')$.

D'après la Proposition 2.3, $\varphi^{-1}(H')$ est un sous-groupe de G .

□

Proposition 3.8. Soit (G, \star) et (H, \cdot) deux groupes, et $\varphi : G \rightarrow H$ un morphisme de groupes.

- φ est surjectif si et seulement si $\text{im}(\varphi) = H$.
- φ est injectif si et seulement si $\ker(\varphi) = \{e_G\}$.

Démonstration.

- Par définition.

\Rightarrow : Supposons que φ est injectif. Soit $x \in \ker(\varphi)$, alors $\varphi(x) = e_H$, donc $x = e_G$.

\Leftarrow : Supposons que $\ker(\varphi) = \{e_G\}$. Soit $x, y \in G$ tels que $\varphi(x) = \varphi(y)$, puisque φ est un morphisme on a $\varphi(x \star y^{-1}) = e_H$, et $\ker(\varphi) = \{e_G\}$ d'où $x \star y^{-1} = e_G$, donc $x = y$ et φ est injectif.

□

4. Groupes symétriques

4.1. Définitions

Définition 4.1. Soit $n \in \mathbb{N}$. On appelle *groupe symétrique*, noté S_n , l'ensemble de toutes les bijections de $\{1, \dots, n\}$ dans lui-même muni de la composition.

- On appelle *permutations* les éléments de S_n .
- Soit σ une permutation, on la note

$$\sigma := \begin{pmatrix} 1 & \dots & n \\ \sigma(1) & \dots & \sigma(n) \end{pmatrix}.$$

Définition 4.2. Soit $\sigma \in S_n$ une permutation. On appelle *support* de σ l'ensemble

$$\text{supp}(\sigma) := \{i \in \{1, \dots, n\} \mid \sigma(i) \neq i\}.$$

Lemme 4.3. Soit $\sigma_1, \sigma_2 \in S_n$ deux permutations. Si σ_1 et σ_2 sont de supports disjoints, alors elles commutent.

Démonstration. Soit $i \in \{1, \dots, n\}$. Alors

- si $i \notin \text{supp}(\sigma_1) \cup \text{supp}(\sigma_2)$, on a $(\sigma_1 \circ \sigma_2)(i) = (\sigma_2 \circ \sigma_1)(i) = i$,
- si $i \in \text{supp}(\sigma_1)$, alors $i \notin \text{supp}(\sigma_2)$ et $\sigma_1(i) \notin \text{supp}(\sigma_2)$, et on a $(\sigma_1 \circ \sigma_2)(i) = (\sigma_2 \circ \sigma_1)(i) = i$,
- si $i \in \text{supp}(\sigma_2)$, de la même manière $(\sigma_1 \circ \sigma_2)(i) = (\sigma_2 \circ \sigma_1)(i) = i$.

Donc σ_1 et σ_2 commutent. □

4.2. k -cycles

Définition 4.4. Soit $a_1, \dots, a_k \in \{1, \dots, n\}$ deux à deux distincts. On appelle *k -cycle*, noté (a_1, \dots, a_k) , la permutation définie par

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}, (a_1, \dots, a_k)(i) := \begin{cases} a_{j+1} & \text{si } j \in \{1, \dots, k-1\} \text{ avec } i = a_j \\ a_1 & \text{si } i = a_k \\ i & \text{sinon} \end{cases}$$

- On dit que k est sa *longueur*.
- On appelle *transposition* un 2-cycle.

Proposition 4.5. Soit $(a_1, \dots, a_k) \in S_n$ un k -cycle. Alors l'inverse de (a_1, \dots, a_k) est (a_k, \dots, a_1) .

Démonstration. Soit $i \in \{1, \dots, n\}$. Alors

- s'il existe $j \in \{1, \dots, k-1\}$ tel que $i = a_j$, on a

$$(a_k, \dots, a_1)((a_1, \dots, a_k)(a_j)) = (a_k, \dots, a_1)(a_{j+1}) = a_j = i,$$

- si $i = a_k$, on a

$$(a_k, \dots, a_1)((a_1, \dots, a_k)(a_k)) = (a_k, \dots, a_1)(a_1) = a_k = i,$$

- sinon on a

$$(a_k, \dots, a_1)((a_1, \dots, a_k)(i)) = (a_k, \dots, a_1)(i) = i.$$

Donc (a_k, \dots, a_1) est l'inverse de (a_1, \dots, a_k) . □

Proposition 4.6. Soit $(a_1, \dots, a_k) \in S_n$ un k -cycle. Alors on peut l'écrire comme une composition de $k-1$ transpositions.

Démonstration. On écrit $(a_1, \dots, a_k) = (a_1, a_2) \circ \dots \circ (a_{k-1}, a_k)$. □

4.3. Permutations conjuguées

Définition 4.7. Soit $\sigma_1, \sigma_2 \in S_n$ deux permutations. On dit que σ_1 et σ_2 sont conjuguées s'il existe $\tau \in S_n$ telle que $\sigma_1 = \tau \circ \sigma_2 \circ \tau^{-1}$.

Lemme 4.8. Soit $(a_1, \dots, a_k) \in S_n$ un k -cycle. Alors

$$\forall \sigma \in S_n, \sigma \circ (a_1, \dots, a_k) \circ \sigma^{-1} = (\sigma(a_1), \dots, \sigma(a_k))$$

Démonstration. Soit $\sigma \in S_n$. Soit $i \in \{1, \dots, n\}$, alors

- s'il existe $j \in \{1, \dots, k-1\}$ tel que $i = \sigma(a_j)$, alors $\sigma^{-1}(i) = a_j$ et on a

$$\sigma((a_1, \dots, a_k)(\sigma^{-1}(i))) = \sigma((a_1, \dots, a_k)(a_j)) = \sigma(a_{j+1}),$$

- si $i = \sigma(a_k)$, alors $\sigma^{-1}(i) = a_k$ et on a

$$\sigma((a_1, \dots, a_k)(\sigma^{-1}(i))) = \sigma((a_1, \dots, a_k)(a_k)) = \sigma(a_1),$$

- sinon on a

$$\sigma((a_1, \dots, a_k)(\sigma^{-1}(i))) = \sigma(\sigma^{-1}(i)) = i.$$

Donc $\sigma \circ (a_1, \dots, a_k) \circ \sigma^{-1} = (\sigma(a_1), \dots, \sigma(a_k))$. □

Corollaire 4.9. Soit $(a_1, \dots, a_k) \in S_n$ un k -cycle. Alors il est conjugué à $(1, \dots, k)$.

Démonstration. On prend $\sigma \in S_n$ telle que $\forall i \in \{1, \dots, k\}, \sigma(a_i) = i$. □

Théorème 4.10. Soit $\sigma \in S_n$ une permutation. On peut écrire σ comme une composition de cycles à supports disjoints $\tau_1, \dots, \tau_m \in S_n$. De plus cette écriture est unique à l'ordre des cycles près, et leurs longueurs k_1, \dots, k_m vérifient $\sum_{l=1}^m k_l = n$.

Démonstration. On raisonne par récurrence sur le cardinal de $\text{supp}(\sigma)$.

- Pour $|\text{supp}(\sigma)| = 0$, on a $\sigma = \text{id}$.
- Pour $|\text{supp}(\sigma)| > 0$, supposons que la propriété soit vérifiée pour toute permutation dont le cardinal du support est inférieur.

Soit $i \in \text{supp}(\sigma)$, puisque $\sigma \in S_n$, il existe $p \in \{1, \dots, n\}$ minimal tel que $\sigma^p(i) = i$, alors on pose $\tau_1 = (i, \sigma(i), \dots, \sigma^{p-1}(i))$. Alors τ_1 agit comme σ sur l'ensemble $\{i, \sigma(i), \dots, \sigma^{p-1}(i)\}$, donc on a $|\text{supp}(\tau_1^{-1} \circ \sigma)| < |\text{supp}(\sigma)|$. Par hypothèse de récurrence, on peut écrire $\tau_1^{-1} \circ \sigma$ comme une composition de cycles à supports disjoints $\tau_2, \dots, \tau_m \in S_n$, et $\sigma = \tau_1 \circ \tau_2 \circ \dots \circ \tau_m$.

Soit $i \in \{1, \dots, n\}$, puisque les supports sont disjoints, i se trouve dans le support d'un seul des cycles, d'où l'unicité de l'écriture et $\sum_{l=1}^m k_l = n$. □

Définition 4.11. Soit $\sigma \in S_n$ et $\tau_1, \dots, \tau_m \in S_n$ la décomposition de σ en cycles à supports disjoints, ordonnés par longueur $k_1 \leq \dots \leq k_m$. On appelle (k_1, \dots, k_m) le *type* de σ .

Théorème 4.12. Soit $\sigma_1, \sigma_2 \in S_n$ deux permutations. Alors σ_1 et σ_2 sont conjuguées si et seulement si elles ont le même type.

Démonstration.

\Rightarrow : Supposons que σ_1 et σ_2 sont conjuguées. D'après le [Lemme 4.8](#), σ_1 et σ_2 ont le même type.

\Leftarrow : Supposons que σ_1 et σ_2 ont le même type (k_1, \dots, k_m) .

D'après le [Corollaire 4.9](#), σ_1 et σ_2 sont conjuguées à

$$\sigma_3 := (1, \dots, k_1) \circ (k_1 + 1, \dots, k_1 + k_2) \circ \dots \circ (k_1 + \dots + k_{m-1} + 1, \dots, k_m)$$

donc il existe $\tau_1, \tau_2 \in S_n$ telles que $\sigma_1 = \tau_1 \circ \sigma_3 \circ \tau_1^{-1}$ et $\sigma_2 = \tau_2 \circ \sigma_3 \circ \tau_2^{-1}$.

Alors $\sigma_1 = (\tau_1 \circ \tau_2^{-1}) \circ \sigma_2 \circ (\tau_2 \circ \tau_1^{-1})$, donc σ_1 et σ_2 sont conjuguées. □

Corollaire 4.13. Soit $\sigma \in S_n$ une permutation. On peut écrire σ comme une composition de transpositions.

Démonstration. On peut écrire σ comme une composition de cycles à supports disjoints, et chaque cycle comme une composition de transpositions. \square

4.4. Signature d'une permutation

Définition 4.14. Soit $\sigma \in S_n$ une permutation. On appelle *signature* de σ le nombre rationnel

$$\text{sign}(\sigma) := \prod_{1 \leq i < j \leq n} \frac{\sigma(j) - \sigma(i)}{j - i}.$$

Exemple 4.15. On calcule la signature de la transposition $(1, 2)$

$$\begin{aligned} \text{sign}((1, 2)) &= \frac{\sigma(2) - \sigma(1)}{2 - 1} \cdot \prod_{2 < j \leq n} \frac{\sigma(j) - \sigma(1)}{j - 1} \cdot \prod_{2 < j \leq n} \frac{\sigma(j) - \sigma(2)}{j - 2} \cdot \prod_{3 \leq i < j \leq n} \frac{\sigma(j) - \sigma(i)}{j - i} \\ &= \frac{2 - 1}{1 - 2} \cdot \prod_{2 < j \leq n} \frac{j - 2}{j - 1} \cdot \prod_{2 < j \leq n} \frac{j - 1}{j - 2} \cdot 1 \\ &= -1 \end{aligned}$$

Théorème 4.16. L'application $\text{sign} : (S_n, \circ) \rightarrow (\{-1, 1\}, \cdot)$ est un morphisme de groupes.

Démonstration. Soit $\sigma \in S_n$. Alors on calcule

$$|\text{sign}(\sigma)| = \prod_{1 \leq i < j \leq n} \frac{|\sigma(j) - \sigma(i)|}{|j - i|}$$

puisque σ est une bijection, on a $\{\{\sigma(i), \sigma(j)\} \mid 1 \leq i < j \leq n\} = \{\{i, j\} \mid 1 \leq i < j \leq n\}$, alors

$$|\text{sign}(\sigma)| = \prod_{1 \leq i < j \leq n} \frac{|j - i|}{|j - i|} = 1$$

donc $\text{sign}(\sigma) \in \{-1, 1\}$.

Soit $\tau \in S_n$. Alors

$$\begin{aligned} \text{sign}(\sigma \circ \tau) &= \prod_{1 \leq i < j \leq n} \frac{\sigma(\tau(j)) - \sigma(\tau(i))}{j - i} \\ &= \prod_{1 \leq i < j \leq n} \frac{\sigma(\tau(j)) - \sigma(\tau(i))}{\tau(j) - \tau(i)} \cdot \prod_{1 \leq i < j \leq n} \frac{\tau(j) - \tau(i)}{j - i} \end{aligned}$$

puisque τ est une bijection, de la même manière on a

$$\begin{aligned} \text{sign}(\sigma \circ \tau) &= \prod_{1 \leq i < j \leq n} \frac{\sigma(j) - \sigma(i)}{j - i} \cdot \prod_{1 \leq i < j \leq n} \frac{\tau(j) - \tau(i)}{j - i} \\ &= \text{sign}(\sigma) \cdot \text{sign}(\tau) \end{aligned}$$

donc sign est un morphisme de groupes. \square

Corollaire 4.17.

- Soit $(a, b) \in S_n$ une transposition. Alors $\text{sign}((a, b)) = -1$.
- Soit $(a_1, \dots, a_k) \in S_n$ un k -cycle. Alors $\text{sign}((a_1, \dots, a_k)) = (-1)^{k-1}$.
- Soit $\sigma \in S_n$ une permutation de type (k_1, \dots, k_m) . Alors $\text{sign}(\sigma) = \prod_{l=1}^m (-1)^{k_l-1}$.

Démonstration. Puisque sign est un morphisme de groupes.

- Comme (a, b) est conjuguée à $(1, 2)$, $\text{sign}((a, b)) = \text{sign}((1, 2)) = -1$.
- Comme $(a_1, \dots, a_k) = (a_1, a_2) \circ \dots \circ (a_{k-1}, a_k)$, on a

$$\text{sign}((a_1, \dots, a_k)) = \text{sign}((a_1, a_2)) \dots \text{sign}((a_{k-1}, a_k)) = (-1)^{k-1}.$$

- De la même manière, σ se décompose en cycles à supports disjoints, $\text{sign}(\sigma) = \prod_{l=1}^m (-1)^{k_l-1}$.

□

4.5. Groupes alternés

Définition 4.18. Soit $\sigma \in S_n$ une permutation. On dit que σ est *paire* si $\text{sign}(\sigma) = 1$, ou *impaire* si $\text{sign}(\sigma) = -1$. On appelle *groupe alterné* l'ensemble

$$A_n := \{\sigma \in S_n \mid \sigma \text{ est paire}\} = \ker(\text{sign}).$$

Proposition 4.19. Soit $\sigma \in S_n$ une permutation. Alors σ est paire si et seulement si elle peut s'écrire comme une composition de 3-cycles.

Démonstration.

\Rightarrow : Supposons que σ est paire. Alors σ est la composition d'un nombre pair de transpositions. On considère la permutation $(a, b) \circ (c, d) \in S_n$,

- si $\{a, b\} = \{c, d\}$, alors $(a, b) \circ (c, d) = \text{id}$,
- si $\{a, b\} \cap \{c, d\} = \{b\} = \{c\}$, alors $(a, b) \circ (c, d) = (a, b, d)$,
- si $\{a, b\} \cap \{c, d\} = \emptyset$, alors $(a, b) \circ (c, d) = (a, b, c) \circ (b, c, d)$,

donc $(a, b) \circ (b, c)$ est un produit de 3-cycles.

\Leftarrow : Supposons que σ est une composition de 3-cycles. Alors $\text{sign}(\sigma) = 1$, donc σ est paire.

□

5. Groupes quotients

5.1. Relations d'équivalence

Définition 5.1. Soit E un ensemble. On appelle *relation* sur E un sous-ensemble R de $E \times E$.

Si $(x, y) \in R$, on écrit xRy .

Définition 5.2. Soit R une relation sur un ensemble E . On dit que R est une *relation d'équivalence* si elle vérifie les propriétés suivantes

- (1) R est réflexive, $\forall x \in E, xRx$,
- (2) R est symétrique, $\forall x, y \in E, xRy \Rightarrow yRx$,
- (3) R est transitive, $\forall x, y, z \in E, xRy$ et $yRz \Rightarrow xRz$.

Dans ce cas, on notera \sim pour R .

Exemple 5.3. Soit $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$, on pose $R_n := \{(a, b) \in \mathbb{Z}^2 \mid n|a - b\}$.

1. Soit $x \in \mathbb{Z}$, alors $n|0 = x - x$, donc $xR_n x$,
2. soit $x, y \in \mathbb{Z}$, si $xR_n y$, alors $n|x - y$, d'où $n|y - x$, donc $yR_n x$,
3. soit $x, y, z \in \mathbb{Z}$, si $xR_n y$ et $yR_n z$, alors $n|x - y$ et $n|y - z$, d'où $n|(x - y) + (y - z) = x - z$, donc $xR_n z$.

Donc R_n est une relation d'équivalence, si $(a, b) \in \mathbb{Z}^2$ on notera $a \equiv b \pmod n$ pour $aR_n b$.

Définition 5.4. Soit \sim une relation d'équivalence sur un ensemble E .

- Soit $x \in E$. On appelle *classe d'équivalence* de x , notée \bar{x} , l'ensemble $\bar{x} := \{y \in E \mid x \sim y\}$.
- Soit $x \in E$. On appelle *représentant* de x tout élément de \bar{x} .
- On appelle *espace quotient* de E modulo \sim l'ensemble $E/\sim := \{\bar{x} \mid x \in E\}$.
- On appelle *projection canonique* de E sur E/\sim l'application $\pi : E \rightarrow E/\sim; x \mapsto \bar{x}$.

Exemple 5.5. Soit $n \in \mathbb{N}$, on considère de nouveau la relation d'équivalence R_n . Alors

$$\forall x \in \mathbb{Z}, \bar{x} = \{y \in \mathbb{Z} \mid x \equiv y \pmod n\} = \{x + nk \mid k \in \mathbb{Z}\}$$

on notera $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ pour \mathbb{Z}/R_n .

Définition 5.6. Soit E un ensemble. On appelle *partition* de E une famille $(E_i)_{i \in I}$ de sous-ensembles de E qui vérifie les propriétés suivantes

- (1) les sous-ensembles sont deux à deux disjoints, $\forall i, j \in I, i \neq j \Rightarrow E_i \cap E_j = \emptyset$,
- (2) l'union des sous-ensembles forme E , $\bigsqcup_{i \in I} E_i := \bigcup_{i \in I} E_i = E$.

Proposition 5.7. Soit E un ensemble et \sim une relation d'équivalence sur E .

- (1) Soit $x, y \in E$, alors les énoncés suivants sont équivalents
 - (a) $\bar{x} = \bar{y}$,
 - (b) $x \in \bar{y}$,
 - (c) $x \sim y$.
- (2) L'espace quotient de E modulo \sim forme une partition de E .
- (3) Soit $(E_i)_{i \in I}$ une partition de E . Alors $R := \{(x, y) \in E \mid \exists i \in I, x, y \in E_i\}$ est une relation d'équivalence.

Démonstration.

- (1) (a) \Rightarrow (b) : Supposons que $\bar{x} = \bar{y}$, alors $x \in \bar{x}$, donc $x \in \bar{y}$.
(b) \Rightarrow (c) : Supposons que $x \in \bar{y}$, alors $y \in \bar{y}$, donc $x \sim y$.
(c) \Rightarrow (a) : Supposons que $x \sim y$. Soit $z \in \bar{x}$, alors $z \sim x$, et par transitivité $z \sim y$, donc $z \in \bar{y}$. Réciproquement si $z \in \bar{y}$, alors $z \in \bar{x}$, donc $\bar{x} = \bar{y}$.
- (2) Soit $x, y \in E$. Si $\bar{x} \cap \bar{y} \neq \emptyset$, il existe $z \in \bar{x} \cap \bar{y}$ tel que $z \sim x$ et $z \sim y$, donc $x \sim y$ et $\bar{x} = \bar{y}$.
Soit $x \in E$, alors $x \in \bar{x} \subset \bigsqcup_{x \in E} \bar{x}$, donc $E = \bigsqcup_{x \in E} \bar{x}$.

- (3) (a) Soit $x \in E$, alors il existe $i \in I$ tel que $x \in E_i$, donc xRx .
 (b) Soit $x, y \in E$, alors si xRy , il existe $i \in I$ tel que $x, y \in E_i$, donc yRx .
 (c) Soit $x, y \in E$, alors si xRy et yRz , il existe $i, j \in I$ tels que $x, y \in E_i$ et $y, z \in E_j$, mais puisque $(E_i)_{i \in I}$, alors $y \in E_i \cap E_j$, puisqu'il s'agit d'une partition on a $i = j$, donc xRz .

Donc R est une relation d'équivalence.

□

Définition 5.8. Soit E un ensemble et \sim une relation d'équivalence sur E . On appelle *système de représentants* pour \sim un sous-ensemble F de E tel que

$$\forall \alpha \in E / \sim, \exists ! x \in F, x \in \alpha$$

c'est-à-dire $\pi|_F : F \rightarrow E / \sim$ est bijective.

Définition 5.9. Soit E et F deux ensembles, et $f : E \rightarrow F$ une fonction. On dit que f est *bien définie* si

$$\forall x, y \in E, x \sim y \Rightarrow f(x) = f(y)$$

Proposition 5.10. Soit E et F deux ensembles, et \sim une relation d'équivalence. Soit $f : E \rightarrow F$ une application, $\pi : E \rightarrow E / \sim$ la projection canonique. Alors il existe $\bar{f} : E / \sim \rightarrow F$ bien définie telle que $\bar{f} \circ \pi = f$ si et seulement si

$$\forall x, y \in E, x \sim y \Rightarrow f(x) = f(y).$$

Démonstration.

\Rightarrow : Supposons que \bar{f} soit bien définie et que $\bar{f} \circ \pi = f$. Soit $x, y \in E$ tels que $x \sim y$, alors $\pi(x) = \pi(y)$, d'où $\bar{f}(\pi(x)) = \bar{f}(\pi(y))$, donc $f(x) = f(y)$.

\Leftarrow : Supposons que $\forall x, y \in E, x \sim y \Rightarrow f(x) = f(y)$.

Soit $\alpha \in E / \sim$, on pose $x_\alpha \in E$ un représentant de α , on définit $\bar{f}(\alpha) = f(x_\alpha)$. Soit $\beta \in E / \sim$, si $\beta = \alpha$, alors $x_\beta \sim x_\alpha$, d'où $f(x_\beta) = f(x_\alpha)$, donc $\bar{f}(\beta) = \bar{f}(\alpha)$, c'est-à-dire \bar{f} est bien définie. □

5.2. Classes modulo un sous-groupe

Définition 5.11. Soit (G, \star) un groupe et H un sous-groupe de G . On appelle *relation modulo H à gauche*, la relation \sim_H sur G définie par

$$\forall x, y \in G, x \sim_H y \Leftrightarrow y \in xH \Leftrightarrow x^{-1} \star y \in H$$

où $xH = \{x \star y \mid y \in H\}$.

Remarque 5.12. On peut définir la *relation modulo H à droite* \sim^H d'une manière similaire.

Proposition 5.13. Soit (G, \star) un groupe et H un sous-groupe de G . Alors \sim_H est une relation d'équivalence sur G , dont les classes d'équivalences sont $\forall x \in G, \bar{x} = xH$.

Démonstration.

(1) Soit $x \in G$, alors $x \star e \in xH$, donc $x \sim_H x$.

(2) Soit $x, y \in G$, alors si $x \sim_H y$, on a $x^{-1} \star y \in H$, d'où $y^{-1} \star x = (x^{-1} \star y)^{-1} \in H$, donc $y \sim_H x$.

(3) Soit $x, y, z \in G$, alors si $x \sim_H y$ et $y \sim_H z$, on a $y \in xH$ et $z \in yH$, d'où $z \in xH$, donc $x \sim_H z$.

□

Notation 5.14. Soit (G, \star) un groupe et H un sous-groupe de G . Alors on note les espaces quotients $G/H := G / \sim_H$ et $H \backslash G := G / \sim^H$.

Proposition 5.15. Soit (G, \star) un groupe et H un sous-groupe de G . Alors les ensembles G/H et $H \backslash G$ sont isomorphes. En particulier si G est fini, on a $|G/H| = |H \backslash G|$.

Démonstration. On considère le morphisme $\varphi : G/H \rightarrow H \backslash G; xH \mapsto Hx^{-1}$, il est bien définie et admet pour inverse $\psi : H \backslash G \rightarrow G/H; Hx \mapsto x^{-1}H$, donc c'est un isomorphisme. \square

5.3. Théorème du nombre de classes et théorème de Lagrange

Définition 5.16. Soit (G, \star) un groupe et H un sous-groupe de G . On appelle *indice* de H dans G

$$[G : H] := |G/H|.$$

Théorème 5.17 (Théorème du nombre de classes). Soit (G, \star) un groupe et H un sous-groupe de G . Alors si G est fini

$$|G| = [G : H]|H|$$

Démonstration. On pose $n := [G : H]$ et on considère $\{x_1, \dots, x_n\}$ un système de représentants pour \sim_H . On sait que la famille $(x_i H)_{i \in \{1, \dots, n\}}$ forme une partition de G , d'où

$$|G| = \sum_{i=1}^n |x_i H| = \sum_{i=1}^n |H| = n|H|$$

c'est-à-dire $|G| = [G : H]|H|$. \square

Corollaire 5.18 (Théorème de Lagrange). Soit (G, \star) un groupe et H un sous-groupe de G . Alors si G est fini, $|H|$ divise $|G|$, en particulier si $x \in G$, $\text{ord}(x)$ divise $|G|$.

Corollaire 5.19.

- (1) Soit (G, \star) un groupe fini d'ordre n et $x \in G$. Alors $x^n = e$.
- (2) Soit (G, \star) un groupe fini, H un sous-groupe de G et K un sous-groupe de H . Alors K est un sous-groupe de G et

$$[G : K] = [G : H][H : K].$$

Démonstration.

- (1) D'après le **Théorème de Lagrange 5.18**, $\text{ord}(x)$ divise n , donc $x^n = e$.
- (2) D'après le **Théorème du nombre de classes 5.17**,

$$[G : K] = \frac{|G|}{|K|} = \frac{[G : H]|H|}{|K|} = \frac{[G : H][H : K]|K|}{|K|} = [G : H][H : K].$$

\square

5.4. Sous-groupes distingués et groupes quotients

Théorème 5.20. Soit (G, \star) un groupe et H un sous-groupe de G . Alors les énoncés suivants sont équivalents

- (1) H est distingué.
- (2) Il existe un morphisme $\varphi : G \rightarrow G$ tel que $H = \ker(\varphi)$.
- (3) G/H a une structure de groupes telle que la projection canonique $\pi : G \rightarrow G/H$ est un morphisme de groupes.

Démonstration.

1. \Rightarrow 3. : Supposons que H est distingué.

On considère l'application $\cdot : G/H \times G/H \rightarrow G/H; (xH, yH) \mapsto xyH$, alors elle est bien définie et $(G/H, \cdot)$ forme un groupe.

3. \Rightarrow 2. : Supposons que G/H a une structure de groupe.

Alors la projection canonique $\pi : G \rightarrow G/H$ est un morphisme de groupes et $\ker(\pi) = H$.

2. \Rightarrow 1. : Supposons qu'il existe un tel morphisme φ .

Soit $h \in H$ et $g \in G$, alors

$$\varphi(g \star h \star g^{-1}) = \varphi(g) \star \varphi(h) \star \varphi(g)^{-1} = \varphi(x) \star \varphi(x)^{-1} = e$$

puisque $H = \ker(\varphi)$, on a $g \star h \star g^{-1} \in H$. □

Corollaire 5.21. Soit (G, \star) un groupe et H un sous-groupe de G . Si G est abélien, alors G/H a une structure de groupes.

Théorème 5.22 (Propriété d'universalité du groupe quotient). Soit (G, \star) un groupe et H un sous-groupe distingué de G . Soit (K, \cdot) un groupe, $\pi : G \rightarrow G/H$ la projection canonique et $\varphi : G \rightarrow K$ un morphisme de groupes. Alors il existe un morphisme $\bar{\varphi} : G/H \rightarrow K$ tel que $\bar{\varphi} \circ \pi = \varphi$, si et seulement si $H \subset \ker(\varphi)$. Dans ce cas $\text{im}(\bar{\varphi}) = \text{im}(\varphi)$ et $\ker(\bar{\varphi}) = \ker(\pi(\varphi))$.

Démonstration.

\Rightarrow : Supposons qu'il existe un tel morphisme $\bar{\varphi}$.

Soit $x \in H$, alors $\varphi(x) = \bar{\varphi}(\pi(x)) = \bar{\varphi}(\{e\}) = H$, donc $H \subset \ker(\varphi)$.

\Leftarrow : Supposons que $H \subset \ker(\varphi)$.

Soit $x \in H$, on définit $\bar{\varphi}(xH) = \varphi(x)$, alors $\bar{\varphi}$ est bien définie. Puisque $\bar{\varphi} \circ \pi = \varphi$ et π est surjectif, on a $\text{im}(\bar{\varphi}) = \text{im}(\varphi)$ et $\ker(\bar{\varphi}) = \pi(\ker(\varphi))$. □

Corollaire 5.23 (Théorème d'isomorphisme). Soit (G, \star) et (K, \cdot) deux groupes, et $\varphi : G \rightarrow K$ un morphisme de groupes. Alors il existe un isomorphisme $\bar{\varphi} : G/\ker(\varphi) \rightarrow \text{im}(\varphi)$.

Démonstration. On pose $H := \ker(\varphi)$, alors par le [Propriété d'universalité du groupe quotient 5.22](#), il existe $\bar{\varphi} : G/\ker(\varphi) \rightarrow \text{im}(\varphi)$ telle que $\bar{\varphi} \circ \pi = \varphi$. Puisque $\ker(\bar{\varphi}) = \pi(\ker(\varphi)) = \pi(H) = \{e\}$, $\bar{\varphi}$ est injectif, et par définition $\bar{\varphi}$ est surjectif. Donc $\bar{\varphi}$ est un isomorphisme. □

Proposition 5.24. Soit (G, \star) un groupe. Alors si (G, \star) est monogène, il existe $n \in \mathbb{N}$ tel qu'il est isomorphe à $(\mathbb{Z}, +)$ ou à $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +)$.

Démonstration. Soit $x \in G$ un générateur et $\varphi : \mathbb{Z} \rightarrow G; m \mapsto x^m$.

Alors φ est un morphisme de groupes et $\text{im}(\varphi) = \langle x \rangle = G$, donc φ est surjectif. Soit $d := \text{ord}(x)$

- si $d = +\infty$, alors φ est injectif, et par le [Théorème d'isomorphisme 5.23](#), $\mathbb{Z}/\ker(\varphi) \simeq \text{im}(\varphi)$, c'est-à-dire $\mathbb{Z} \simeq G$,
 - sinon $\ker(\varphi) = d\mathbb{Z}$, et par le [Théorème d'isomorphisme 5.23](#), $\mathbb{Z}/\ker(\varphi) \simeq \text{im}(\varphi)$, c'est-à-dire $\mathbb{Z}/d\mathbb{Z} \simeq G$.
-

Proposition 5.25. Soit (G, \star) un groupe et $x, y \in G$ tels que $x \star y = y \star x$. Notons $a := \text{ord}(x)$ et $b := \text{ord}(y)$, alors $\text{ord}(x \star y)$ divise $\text{ppcm}(a, b)$. De plus si $\langle x \rangle \cap \langle y \rangle = \{e\}$, on a $\text{ord}(x \star y) = \text{ppcm}(a, b)$

Démonstration. Posons $m := \text{ppcm}(a, b)$ et $d := \text{pgcd}(a, b)$.

Alors il existe $a', b' \in \mathbb{Z}$ tels que $a = da'$ et $b = db'$, d'où $m = da'b'$. Alors

$$(x \star y)^m = x^m \star y^m = (x^{da'})^{b'} \star (y^{db'})^{a'} = e$$

donc $\text{ord}(x \star y)$ divise $\text{ppcm}(a, b)$. □

Proposition 5.26. Soit $n, m \in \mathbb{Z}$. Alors $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ est isomorphe à $\mathbb{Z}/nm\mathbb{Z}$ si et seulement si $\text{pgcd}(n, m) = 1$.

Démonstration. Soit $x \in \mathbb{Z}$. Notons \bar{x} et $[x]$ les classes respectives de x modulo n et m .

\Rightarrow : Supposons que $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ est isomorphe à $\mathbb{Z}/nm\mathbb{Z}$. Alors $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ est cyclique.

Soit (a, b) un générateur de $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$, c'est-à-dire $\text{ord}((a, b)) = nm$, alors

$$\text{ppcm}(\text{ord}(a), \text{ord}(b)) \cdot (a, b) = (\bar{0}, [0])$$

donc $nm \mid \text{ppcm}(\text{ord}(a), \text{ord}(b))$, on en déduit $nm \mid \text{ppcm}(n, m)$, d'où $\text{pgcd}(n, m) = 1$.

\Leftarrow : Supposons que $\text{pgcd}(n, m) = 1$. Posons $\varphi : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}; x \mapsto (\bar{x}, [x])$.

Alors φ est bien un morphisme, et on a

$$\begin{aligned} \ker(\varphi) &= \{k \in \mathbb{Z} \mid (\bar{k}, [k]) = (\bar{0}, [0])\} \\ &= \{k \in \mathbb{Z} \mid n \mid k \text{ et } m \mid k\} \\ &= \{k \in \mathbb{Z} \mid nm \mid k\} = nm\mathbb{Z} \end{aligned}$$

d'après le [Propriété d'universalité du groupe quotient 5.22](#), il existe un morphisme $\bar{\varphi} : \mathbb{Z}/nm\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ injectif. Enfin puisque $|\mathbb{Z}/nm\mathbb{Z}| = |\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}|$, on en déduit que $\bar{\varphi}$ est un isomorphisme. □

6. Actions de groupes

6.1. Définitions

Définition 6.1. Soit (G, \star) un groupe et X un ensemble. On appelle *action* de G sur X une application $\psi : G \times X \rightarrow X$ qui vérifie les propriétés suivantes

- (1) $\forall x \in X, \psi(e, x) = x$,
- (2) $\forall g, h \in G, \forall x \in X, \psi(g, \psi(h, x)) = \psi(gh, x)$.

Dans ce cas, on notera $\forall g \in G, \forall x \in X, g \star x := \psi(g, x)$.

Notation 6.2. Soit (G, \star) un groupe et X un ensemble. Si G agit sur X , on note $G \curvearrowright X$.

Définition 6.3. Soit (G, \star) un groupe qui agit sur un ensemble X et $x \in X$.

- (1) On appelle *stabilisateur* de x , l'ensemble $G_x := \{g \in G \mid g \star x = x\}$.
- (2) On appelle *orbite* de x , l'ensemble $O_x := \{g \star x \mid g \in G\}$.

Lemme 6.4. Soit (G, \star) un groupe qui agit sur un ensemble X et $x \in X$. Alors le stabilisateur de x est un sous-groupe de G . De plus

$$\forall g \in G, G_{g \star x} = g(G_x)g^{-1}.$$

Démonstration. On vérifie facilement que G_x est un sous-groupe de G . Soit $g \in G$, alors $h \in G_{g \star x}$ si et seulement si $h \star (g \star x) = g \star x$, si et seulement si $(g^{-1} \star h \star g) \star x = x$, si et seulement si $g^{-1} \star h \star g \in G_x$, si et seulement si $h \in g(G_x)g^{-1}$. \square

6.2. Espace des orbites

Définition 6.5. Soit (G, \star) un groupe qui agit sur un ensemble X et $x, y \in X$. Alors on définit la relation \sim par

$$x \sim y \Leftrightarrow y \in O_x.$$

Proposition 6.6. Soit (G, \star) un groupe qui agit sur un ensemble X . Alors \sim est une relation d'équivalence sur X , dont les classes d'équivalences sont $\forall x \in X, \bar{x} = O_x$.

Démonstration.

- (1) Soit $x \in X$, alors $x = e \star x$, d'où $x \in O_x$, donc $x \sim x$.
- (2) Soit $x, y \in X$, alors si $x \sim y$, il existe $g \in G$ tel que $y = g \star x$, d'où $x = g^{-1} \star y$, donc $y \sim x$.
- (3) Soit $x, y, z \in X$, alors si $x \sim y$ et $y \sim z$, il existe $g, h \in G$ tels que $y = g \star x$ et $z = h \star y$, d'où $z = (h \star g) \star x$, donc $x \sim z$.

\square

Définition 6.7. Soit (G, \star) un groupe qui agit sur un ensemble X . On dit que l'action est

- (1) *transitive*, si $\forall x, y \in X, \exists g \in G, y = g \star x$,
- (2) *fidèle*, si $\forall g \in G \setminus \{e\}, \exists x \in X, g \star x \neq x$,
- (3) *libre*, si $\forall g \in G \setminus \{e\}, \forall x \in X, g \star x \neq x$.

Dans ce cas, on dit que G agit respectivement *transitivement*, *fidèlement* et *librement* sur X .

Proposition 6.8. Soit (G, \star) un groupe qui agit transitivement sur un ensemble X et $x \in X$. Alors l'application $f_x : G/G_x \rightarrow X; gG_x \mapsto g \star x$, est bien définie et est bijective.

Démonstration. Soit $g, h \in G$ tels que $g \sim h$. Alors $gG_x = hG_x$, d'où $h^{-1} \star g \in G_x$, c'est-à-dire $g \star x = h \star x$, donc f_x est bien définie. De plus f_x est injective puisque $g \star x = h \star x$ donne $gG_x = hG_x$. Enfin f_x est surjective puisque G agit transitivement sur X . \square

Théorème 6.9 (Formule des classes). Soit (G, \star) un groupe fini qui agit sur un ensemble fini X et $x_1, \dots, x_n \in X$ un système de représentant pour \sim . Alors

$$|X| = \sum_{i=0}^n |O_{x_i}| = \sum_{i=0}^n [G : G_{x_i}].$$

7. Classification des groupes abéliens finis

7.1. Décomposition en p -groupes

Définition 7.1. Soit (G, \star) un groupe abélien d'ordre n et p un nombre premier qui divise n . On appelle composante p -primaire de G , l'ensemble

$$G_p := \{x \in G \mid \exists q \in \mathbb{N}, \text{ord}(x) = p^q\}.$$

Remarque 7.2. Soit (G, \star) un groupe abélien d'ordre n et $p_1^{r_1} \dots p_k^{r_k}$ la décomposition de n en facteurs premiers. Alors

$$\forall i \in \{1, \dots, k\}, G_{p_i} = \{x \in G \mid x^{p_i^{r_i}} = e\}.$$

Lemme 7.3. Soit (G, \star) un groupe abélien d'ordre $n = ab$ tels que $\text{pgcd}(a, b) = 1$. Soit $k \in \mathbb{N}$,

$$G(k) := \{x \in G \mid x^k = e\}$$

alors $G(k)$ est un sous-groupe de G et G est isomorphe à $G(a) \times G(b)$.

Démonstration. Puisque G est abélien, l'application $\varphi_k : \mathbb{N} \rightarrow G; x \mapsto x^k$ est un morphisme de groupes, donc $G(k) = \ker(\varphi_k)$ est un sous-groupe de G .

Posons $\varphi : G(a) \times G(b) \rightarrow G; (x, y) \mapsto x \star y$, G est abélien donc c'est un morphisme de groupes. Soit $x \in G$, puisque $\text{pgcd}(a, b) = 1$, il existe $u, v \in \mathbb{Z}$ tels que $au + bv = 1$, alors

$$x = x^{au+bv} = x^{au} \star x^{bv}$$

or $(x^{bv})^a = (x^v)^n = e$ et $(x^{au})^b = (x^u)^n = e$, d'où $x^{bv} \in G(a)$ et $x^{au} \in G(b)$, on en déduit que φ est surjectif puisque $x = \varphi(x^{bv}, x^{au})$.

Soit $(x, y) \in G(a) \times G(b)$ tel que $\varphi(x, y) = e$, alors $x = y^{-1} \in G(a) \cap G(b)$, on en déduit $\text{ord}(x) \mid a$ et $\text{ord}(x) \mid b$, d'où $\text{ord}(x) \mid \text{pgcd}(a, b) = 1$ et $x = y = e$, donc φ est injectif. Donc G est isomorphe à $G(a) \times G(b)$ \square

Définition 7.4. Soit (G, \star) un groupe d'ordre n et p un nombre premier. On dit que G est un p -groupe s'il existe $k \in \mathbb{N}$ tel $n = p^k$.

Lemme 7.5. Soit (G, \star) un groupe abélien d'ordre n et p un nombre premier tel que

$$\forall x \in G, \exists l_x \in \mathbb{N}, \text{ord}(x) = p^{l_x}.$$

Alors G est un p -groupe.

Démonstration. Notons $G := \{x_1, \dots, x_n\}$.

Posons $\varphi : H = \langle x_1 \rangle \times \dots \times \langle x_n \rangle \rightarrow G; (y_1, \dots, y_n) \mapsto y_1 \dots y_n$, puisque G est abélien φ est un morphisme de groupes. Il est évidemment surjectif, alors d'après le [Théorème d'isomorphisme 5.23](#), G est isomorphe à $H / \ker(\varphi)$. De plus $|H| = \prod_{i=1}^n p^{l_{x_i}} = p^{\sum_{i=1}^n l_{x_i}}$, et $|G|$ divise $|H / \ker(\varphi)| \cdot |\ker(\varphi)| = |H|$, donc G est un p -groupe. \square

Théorème 7.6. Soit (G, \star) un groupe abélien d'ordre n et $p_1^{r_1} \dots p_k^{r_k}$ la décomposition de n en facteurs premiers. Soit $i \in \{1, \dots, k\}$, alors la composante p_i -primaire de G est un groupe à $p_i^{r_i}$ éléments et G est isomorphe à $G_{p_1} \times \dots \times G_{p_k}$.

Démonstration. Soit $i \in \{1, \dots, k\}$, on a d'après les Lemme 7.3 et Lemme 7.5, avec $G_{p_i} = G(p_i^{r_i})$ est bien un sous-groupe de G , et donc un p_i -groupe. Par récurrence directe sur le Lemme 7.3, G est isomorphe à $G_{p_1} \times \dots \times G_{p_k}$, en comparant l'ordre des deux groupes, on en déduit que G_{p_i} est d'ordre $p_i^{r_i}$. \square

Exemple 7.7. On considère $G := \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/5\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/5^2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/7^3\mathbb{Z}$. Alors les composantes p -primaires de G sont

$$\begin{aligned} G_2 &= \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \{\bar{0}\} \times \{\bar{0}\} \times \{\bar{0}\} \\ G_5 &= \{\bar{0}\} \times \mathbb{Z}/5\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/5^2\mathbb{Z} \times \{\bar{0}\} \\ G_7 &= \{\bar{0}\} \times \{\bar{0}\} \times \{\bar{0}\} \times \mathbb{Z}/7^3\mathbb{Z}. \end{aligned}$$

On considère $H := \mathbb{Z}/6\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/60\mathbb{Z}$. On a $|H| = 6 \cdot 60 = (2 \cdot 3)(2^2 \cdot 3 \cdot 5)$, alors les composantes p -primaires de H sont

$$\begin{aligned} H_2 &= \{(\bar{a}, [b]) \in H \mid 2^3 a \in 6\mathbb{Z} \text{ et } 2^3 b \in 60\mathbb{Z}\} \\ &= \{(\bar{a}, [b]) \in H \mid 2^2 a \in 3\mathbb{Z} \text{ et } 2b \in 15\mathbb{Z}\} \\ &= \{(\bar{a}, [b]) \in H \mid a \in 3\mathbb{Z} \text{ et } b \in 15\mathbb{Z}\} \\ &\simeq \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/4\mathbb{Z} \\ H_3 &\simeq \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} \\ H_5 &\simeq \{\bar{0}\} \times \mathbb{Z}/5\mathbb{Z}. \end{aligned}$$

7.2. Décomposition des p -groupes en produit de groupes cycliques

Théorème 7.8. Soit p un nombre premier et (G, \star) un p -groupe abélien. Alors il existe $n_1, \dots, n_k \in \mathbb{N}$, uniquement déterminés par G , tels que G est isomorphe à

$$(\mathbb{Z}/p^k\mathbb{Z})^{n_k} \times \dots \times (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^{n_1}.$$

Démonstration. Admis. \square

Corollaire 7.9. Soit (G, \star) un groupe abélien fini. Alors G est isomorphe à un produit de groupes cycliques

Corollaire 7.10. Soit (G, \star) un groupe abélien fini. Alors il existe $n_1, \dots, n_k \in \mathbb{N}$, uniquement déterminés par G , tels que $n_1 \mid \dots \mid n_k$ et G est isomorphe à

$$\mathbb{Z}/n_1\mathbb{Z} \times \dots \times \mathbb{Z}/n_k\mathbb{Z}.$$

Exemple 7.11. Considérons le groupe

$$G = \mathbb{Z}/4\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z}/8\mathbb{Z})^2 \times \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/9\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z}/5\mathbb{Z})^2$$

dans lequel 3 est le nombre maximal de facteurs dans la décomposition d'un p -groupe ($p = 2$). On fait donc un tableau avec 3 colonnes

$p = 2$	2^2	2^3	2^3
$p = 3$	1	3	3^2

$p = 5$	1	5	5
	4	120	360

et on en déduit que

$$G \simeq \mathbb{Z}/4\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/120\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/360\mathbb{Z}.$$

7.3. Facteurs invariants d'un groupe

Définition 7.12. Soit (G, \star) un groupe abélien fini. On appelle *facteurs invariants* de G , les $n_1, \dots, n_k \in \mathbb{N}$ de sa décomposition en groupes cycliques

Corollaire 7.13. Soit (G, \star) et (H, \cdot) deux groupes abéliens finis. Alors G et H sont isomorphes si et seulement si ils ont les mêmes facteurs invariants.