Théorie des groupes

Table des matières

1. Introduction.

1.1. Groupes.

Définition 1.1. Un *groupe* est un ensemble non vide G avec une operation $* : GxG \to G$ et qui vérifie les propriétés :

(1) d'associativité : $\forall a, b, c \in G, (a * b) * c = a * (b * c)$.

(2) d'existence d'un élément neutre: $\exists e \in G, \forall x \in G, x * e = e * x = x$.

(3) d'existence d'un inverse : $\forall x \in G, \exists y \in G, x * y = y * x = e$. On note y=x^(-1)

Exemple 1.2.

1. $(\mathbb{Z}, +)$ est un groupe. $+ : \mathbb{Z}^2 \to \mathbb{Z}\,;\ (a, b) \mapsto a + b$ est associatif, l'élément neutre est 0, l'inverse d'un $n \in \mathbb{Z}$, est $n^{-1} := -n$.
2. $(\mathbb{R}, +), (\mathbb{Q}, +), (\mathbb{C}, +)$...
3. $(\mathbb{R}, \cdot)$ n'est pas un groupe car 0 n'admet pas d'inverse.
4. $(\mathbb{N}, +)$ n'est pas un groupe car il n'y a pas d'inverse.
5. $(\mathrm{GL}_n, \cdot), \mathrm{GL}_n(\mathbb{R}) = \{A \in M_{nxn}(\mathbb{R}) \mid \det A \neq 0\}$ est un groupe : le + est associatif (exo), l'élément neutre est la matrice identité de taille n, et l'inverse de A est A^{-1} et on a bien $AA^{-1} = A^{-1}A$

Définition 1.3 (Abélien)**.** Soit $(G, *)$ un groupe. On dit que $a \in G$, et $b \in G$ *commute* si $a * b = b * a$, et que G est *abélien* ou *commutatif* si $\forall x, y \in G, x * y = y * x$.

Définition 1.4. On appelle *monoïde* un ensemble non vide G avec une opération $* : GxG \to G$ qui satisfait seulement l'associativité et l'existence d'un élément neutre. (sans inverse).

Remarque 1.5. $\{$monoÏdes$\} \subset \{$groupes$\} \subset \{$groupes abéliens$\}$

Notation 1.6.

(1) On utilise $*$ ou $\cdot$ pour l'opération d'un groupe et $+$ pour un groupe abélien.

(2) On utilise $e, e_G, 1, 1_G$ pour l'élément neutre d'un groupe, et 0 lorsqu'il est abélien.

(3) $x^{-1} := -x$ dans un groupe abélien.

(4) $a * b * c = (a * b * c) = a * (b * c) = abc$

(5) On définit la puissance d'un groupe $(G, *)$ par, $\forall x \in G, n \in \mathbb{Z}, x^n = \begin{cases} e \text{ si } n{=}0 \\ x{*}\ldots{*}x \text{ si n>0} \\ x^{-1}{*}\ldots{*}x^{-1} \text{ si } n{<}0 \end{cases}$.

Exemples 1.7. Soit X un ensemble non-vide,

1. $(S_X = \{f : X \to X \mid f \text{ bijective}\}, \circ)$ forme un groupe non abélien de symétrie X.
2. $Y \subset X$ $(S_Y := \{f : X \to X \text{ bijective} \mid f(y) = y\}, \circ)$ forme un groupe

Exemple 1.8. Pour $X = \{1, \ldots, n\}_{n \in \mathbb{N}\setminus\{0\}}$. On note $S_X = S_n := \{f : X \to X \text{ bijectives}\}$ le groupe de permutations de n éléments $e = \mathrm{id}_f, f^{-1} =$ la réciproque de f. On note $\sigma := \begin{pmatrix} 1 & \ldots & n \\ \sigma(1) & \ldots & \sigma(n) \end{pmatrix}$ Quelques exemples on a $S_2 := \left\{\mathrm{id}, \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}\right\}, S_3 := \left\{\mathrm{id}, \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}\right\}$. S_2 est abélien tandis que S_3 ne l'est pas car : $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$.

Remarque 1.9. On montrera que $(G, *)$ tel que Card $G \leq 5$ est abélien.

Exemple 1.10. $\underline{(\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}}) := \{(\overline{x} = \overline{y})} := n \mid (x - y)\} = \left\{\overline{0}, \ldots, \overline{n-1}\right\}$ est un groupe abélien fini à n éléments. On a $\overline{a} + \overline{b} = \overline{a + b}$. Le + est associatif dans $\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}}$ car il l'est dans $\mathbb{Z}$. L'élement neutre est le $\overline{0}$. l'inverse de $\overline{x} = \overline{n - x} = \overline{-x}$

Définition 1.11 (Ordre)**.** Soit $(G, *)$ un groupe. On appelle *ordre* de G son cardinal et on peut écrire sa table de multiplication pour $*$. $G = \{e, g_1, ..., g_n\}$.

$*$	e	g_1	$\dots$	g_n
e	$e * e$	$e * g_1$	$\dots$	$e * g_n$
g_1	$g_1 * e$	$g_1 * g_1$	$\dots$	$g_1 * g_n$
g_i		$g_i * g_j$		

Proposition 1.12. Soit $(G, *)$ un groupe. Alors
(1) L'élément neutre est unique.
(2) Pour tout $x \in G$, l'inverse de x est unique.
(3) En particulier, $\left(x^{-1}\right)^{-1} = x$.

Démonstration.
(1) Supposons que $e, e' \in G$ sont des éléments neutres de G alors $\forall x \in G, e * x = x * e = x = e' * x = x * e'$. On prend $x = e'$. On a $e' = e * e' = e$ car e et e' sont éléments neutre donc $e' = e$.
(2) Soit $x \in G$, $y, y' \in G$ deux inverses de x dans G.

$$(1) := x * y = y * x = e, (2) := x * y' = y' * x = e$$

. On a $y' = y' * e = y' * (x * y) \underset{\text{assoc}}{=} (y' * x) * y = e * y = y$.
(3) Comme x^{-1} est l'inverse de x, $x^{-1} * x = x * x^{-1} = e$ donc x est l'inverse de x^-1 par (2).

$\square$

Définition 1.13. Soit $(G, *)$, $(H, \cdot)$ deux groupes, le groupe produit $(GxH, \star)$ est définit par: $\star : (GxH)x(GxH) \to (GxH)\,;\; (g_1{,}h_1{,}g_2{,}h_2) \mapsto (g_1{,}h_1) \star (g_2{,}h_2) := (g_1 * g_2{,}h_1 \cdot h_2)$
(1) L'associativité s'ensuit de l'associativité de $*$, et $\cdot$.
(2) L'élement neutre est (e_G, e_H): $(g, h) \star (e_G, e_H) = (g * e_G, h \cdot e_H) = (g, h) = (e_G, e_H) \star (g, h)$.
(3) L'inverse de $(g, h) \in GxH$ est $\left(g^{-1}, h^{-1}\right)$.

1.2. Sous-groupes.

Définition 1.14. Soit $(G, *)$ un groupe. On appelle sous-groupe de $(G, *)$, un sous-ensemble non vide $H \subseteq G$ tel que :
(1) $e \in H$,
(2) $\forall x, y \in H, xy \in H$,
(3) $\forall x \in H, x^-1 \in H$.

Notation 1.15. On pourra noter pour un sous-groupe de G, $H < G$

Exemple 1.16.
1. $\mathbb{Z} < (\mathbb{R}, +)$, $\mathbb{Q} < (\mathbb{R}, +)$, $(\mathbb{R}, +) < (\mathbb{C}, +)$.
2. $\mathbb{N} \not< (\mathbb{Z}, +)$ car $-1 \notin \mathbb{N}$.
3. Soit $H = 2\mathbb{Z} = \{2n \mid n \in \mathbb{Z}\} < \mathbb{Z}$:
   a. $0 \in 2\mathbb{Z}$.
   b. $a = 2m, b = 2n \in H \Rightarrow a + b = 2(n + m) \in H$
   c. $a = 2m \in H \Rightarrow -a = 2(-m) \in H$.

Proposition 1.17. Soit $(G, *)$ un groupe et $H \subseteq G$. Alors H est un sous-groupe de G si et seulement si $e \in H$, et $\forall x, y \in H, x * y^{-1} \in H$.

Démonstration.
$\Rightarrow$ Supposons que H soit un sous groupe. Alors il verifie $e \in H$. Montrons que $x * y^{-1} \in H$ est satisfait.
Soit $(x, y) \in H$, alors $y^{-1} \in H \Rightarrow x * y^{-1} \in H$.
$\Leftarrow$ Montrons que $(H, *)$ est un sous-groupe. On a $e \in H$ Soit $x \in H, a = e, b = x$. Alors

$$a * b^{-1} = e * x^{-1} = x^{-1} \in H$$

Soit $x, y \in H, a = x, b = y^{-1}$ $a * b^{-1} = x * \left(y^{-1}\right)^{-1} = x * y \in H$. □

Proposition 1.18. Soit $(G, *)$ un groupe, $H \subseteq G$. Alors $H < G$ si et seulement si $(B) := \forall x, y \in H, x * y \in H$ et $(E) := (H, *)$ forme un groupe.

Démonstration.
$\Rightarrow$ Supposons $H < G$, alors (B). Montrons que $(H, *)$ forme un groupe.
(1) $*$ est associatif.
(2) $H < G \Rightarrow e \in H$ et $\forall x \in H, x * e = e * x = x$.
(3) Soit $x \in H, H < G$ alors $x^{-1} \in H$ et $x * x^{-1} = e$.

$\Leftarrow$ On suppose (B) et (E). Montrons que $H < G$ donc (A) et (C).
A MONTRER (A) $(H, *)$ est un groupe, notons e_H son élément neutre, $(G, *)$ est un groupe, notons e_G son élément neutre.
$\forall x \in H \subseteq G$, e_G élément neutre de G donc $x * e_G = e_G * x = x$

Preuve de (c) Soit $x \in H$, soit g l'inverse de x dans G , y' l'inverse de x dans H alors $x * y' = y' * x = e$ or l'inverse est unique donc $y = y' \in H$. □

Proposition 1.19. Soit $(G, *)$ un groupe et $H_1, H_2 \subseteq G$. On a $H_1 \cap H_2 < G$.
Plus généralement, si $(G_i)_{i \in I}$est une famille de sous-groupes de G, alors $\bigcap_{i \in I} H_i < G$.

Démonstration. $\forall i \in I, e \in G_i$, $e \in \bigcap H_i$ donc on a (A). De plus, $\forall x, y \in \bigcap_{i \in I}$, $x, y \in H_i \Rightarrow xy^{-1} \in H_i \forall i \in I \Rightarrow xy^{-1} \in \bigcap_{i \in I} H_i$.

□

Remarque 1.20. A FAIRE

Définition 1.21. Soit $(G, *)$ un groupe, $S \subset G$. On appelle sous-groupe engendré par S, noté $< S >$ le plus petit sous-groupe de G contenant S.

Remarque 1.22. equivalent a si $H < G$ et $S \subset H$ alors $< S > \subseteq H$

Proposition 1.23. $\langle S \rangle$ est bien définit et on a :

$$\langle S \rangle := \bigcap_{(H<G), S \subset H} H = \left\{g_1, \ldots, g_n \mid g_i \in S \text{ ou } S^{-1} \in S\right\}$$

Démonstration.
(1) bien définit : Soit $I = \{H < G \mid S \subset H\} \neq \{\}$ car $G \in I$ Soit $H_I = \cap_{H \in I} H < G$ par la prop précédente. Montrons que H_I est le plus petit ssgpe contenant
   (a) $S \subset H, \forall H \in I, S \subset H_I$
   (b) Soit $H < G$ tel que $S \subset H \overset{?}{\Rightarrow} H_I < H$ Or $H \in I$ donc $I_I = H \bigcap \left(\bigcap_{H \in I} H'\right) \subset H$ donc $< S > = H_I$.
(2) Montrons que $< S > = H_S$ par double inclusion.

(a) $H_S \subset < S >$

$H_S < G$ car $e = gg^{-1} \in H_S$ pour un $g \in S$ Si $x = (g_1)$

A FAIRE

$\square$

Définition 1.24.
(1) Si $G =< S >$, on dit que G est engendré par S ou que S est un système de générateurs pour G.
(2) Si $S = \{g_1, ..., g_n\}$, on note $< S \geq < g_1, ..., g_n >$.
(3) Si $G =< x >$, $x \in G$ on dit que G est monogène, si de plus G est fini, on dit qu'il est cyclique.
(4) On dit que G est finiment engendré si $\exists S \subset G$ fini tel que $G = (< S >)$.

Exemple 1.25.
1. $G = \langle G \rangle$
2. $(\mathbb{Z}, +) = \langle 1 \rangle = \langle 2, 3 \rangle$ est monogène
3. $\left(\mathbb{Z}^2, +\right) = <$ (1,0), (0,1)>: $1 = 3 - 2 \in \langle 2, 3 \rangle \Rightarrow \langle 1 \rangle \subseteq \langle 2, 3 \rangle$
4. $(\mathbb{Z}/_{3\mathbb{Z}} x \mathbb{Z}/_{5\mathbb{Z}}, +) = \left\langle \left(\overline{1}, \overline{1}\right) \right\rangle$. (exo)
5. $(\mathbb{Z}/_n\mathbb{Z}, +) = \left\langle \overline{1} \right\rangle$ est cyclique.
6. $(S_n, \circ)$ n'est pas cyclique pour n>2

Lemme 1.26. Tout groupe monogène est abélien.

Démonstration. G monogène $\Rightarrow \exists x \in G = \langle x \rangle = \{g_1, ..., g_n\}$ $\square$