Theorie des groupes

Bcp de monde...

September 2024

Table des matières

Exemples en tout genres

0.1 Section1

Définition : (distance)
mdr a definition d'une distance

0.1.1 Sous-section1

Théorème :

$$\dim \ker \varphi + \dim \operatorname{Im} f = \dim E$$

Preuve :
exemple de preuve

$\square$

0.1.2 Comment faire un lemme

Lemme :
avec la box noire sans nom

Lemme : nom
sasn la box mais avec le nom

test

Lemme :
sans rien

Chapitre 1

Notion de groupe, morphisme, produit direct

1.1 Groupes, sous-groupes, exemples

1.1.1 Définitions

Définition : (Groupe)
Un groupe est un ensemble non vide G munis d'une loi $*$ telle que :

(i) $*$ est associative

(ii) $*$ possède un neutre $e \in G$

(iii) Tout élément possède un inverse pour $*$

Définition : (Groupe abélien)
Un groupe G est dit <u>abélien</u> si $\forall (x, y) \in G,\ xy = yx$

1.1.2 Sous-groupes

Définition : (Sous-groupe)
Un sous-ensemble H de G est appelé sous-groupe si :

- $e \in H$
- $\forall x, y \in H, xy^1 \in H$

Définition : (Groupe fini)
G est dit fini si il est cardinal fini, on note alors $o(G) = |G|$, appelé ordre de G.

1.1.3 Sous-groupe engendré

Définition : (Sous-groupe engendré par une partie)
Soient G un groupe et $S \subset G$
Soit G_S l'ensemble des sous groupes de G qui contiennent S.

On appelle sous groupe engendré par S l'ensemble : $\langle S \rangle := \bigcap_{H \in G_S} H$

Si de plus $\langle S \rangle = G$ on dit que S est une partie génératrice de G ou que S engendre G

Définition : (Groupe de type fini)
Si G est engendré par un singleton, on dit que G est monogène.
Un groupe monogène fini est dit cyclique.
Si il existe une partie finie $S \subseteq G$ qui engendre G, on dit que G est de type fini.

Définition : (Ordre d'un élément)

- Si $\langle x \rangle$ est infini, on dit que x est d'ordre infini.
- Si $\langle x \rangle$ est fini, on dit que x est d'ordre $|\langle x \rangle|$

Si $x^n = e$ alors $o(x)|n$

1.2 morphismes de groupes

Définition : (Morphisme de groupe)

Soit $(G, *), (H, \cdot)$ deux groupes. Un morphisme de groupes de G dans H est une application

$$f: \quad G \quad \longrightarrow \quad H \quad \text{tel que } \forall x, y \in G, f(x * y) = f(x) \cdot f(y)$$

Exercice :

1. $f(e_G) = e_H$
2. $f^{-1}(x) = f(x^{-1})$
3. $\forall n \in \mathbb{N}\ ,\ f^n(x) = f(x^n)$
4. Si $K < G$, alors $f(K) < H$
5. Si $K < H$, alors $f^{-1}(K) < G$

Exemple :

1. $\epsilon: \quad \mathcal{S}_n \quad \longrightarrow \quad \{-1, 1\}$
2. $det: \quad \mathbb{GL}_n(\mathbb{R}) \quad \longrightarrow \quad \mathbb{R}^*$
3. $exp: \quad \mathbb{C} \quad \longrightarrow \quad \mathbb{C}^*$
4. Mais $\ exp: \quad \mathcal{M}_2(\mathbb{R}) \quad \longrightarrow \quad (\mathbb{GL}_2(\mathbb{R}), \times)$

1.2.1 Isomorphismes

Définition : (Isomorphisme)

1. Un isomorphisme de G dans H est un morphisme de groupes bijectif.
2. G et H sont isomorphe ssi il existe un isomorphisme entre les deux.

Exercice :
Si f est un isomorphisme alors f^{-1} aussi

Exercice :

1. $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$ et $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ ne sont pas isomorphe
2. $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z}$ et $\mathbb{S}_n$ ne sont pas isomorphe (car l'un est abélien et l'autre non).
3. $\mathbb{Z}/mn\mathbb{Z}$ et $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ sont isomorphe ssi $m \wedge n = 1$

Définition : (Automorphisme)
Un automorphisme est un isomorphisme d'un groupe G dans lui-même. L'ensemble des automorphismes de G se note $Aut(G)$.

Exercice :
Montrer que $Aut(G) < \mathbb{S}_G$, où $\mathbb{S}_G$ désigne l'ensemble des bijections de GG dans lui même

Exercice :
$\forall g \in G$, on note $\sigma_g : \left| \begin{array}{ccc} G & \longrightarrow & G \\ x & \longmapsto & gxg^{-1} \end{array} \right.$ (automorphisme intérieur associé à g), montrer que $\sigma_g \in Aut(G)$

Exercice :
On note $Int(G)$ l'ensemble des automorphismes intérieurs de G, montrer que $Int(G) < Aut(G)$

Théorème :
(Théorème de Cayley)
Tout groupe G est isomorphe à un sous-groupe de $\mathbb{S}_G$. En particulier, si $|G| = n$, alors G est isomorphe à un sous-groupe de $\mathcal{S}_n$.

Preuve :
Pour tout $g \in G$, on pose $\tau_g : \left| \begin{array}{ccc} G & \longrightarrow & G \\ x & \longmapsto & gx \end{array} \right.$ τ_g est une bijection de G dans G. Notons $T_G := \{\tau_g, g \in G\} \subseteq \mathbb{S}_G$.
Vérifions que :

1. $T_G < \mathbb{S}_G$
2. G est isomorphe à T_G

Preuve de 1 :

- $Id_G = \tau_e \in T_G (T_G \neq \emptyset)$
- $\forall g_1, g_2 \in G, \forall x \in G, \tau_{g_1 g_2}(x) = g_1 g_2 x = g_1(g_2 x) = \tau_{g_1}(\tau_{g_2}(x))$, donc on a bien $\tau_{g_1 g_2} = \tau_{g_1}\tau_{g_2}$
- $\forall g \in G, \tau_{g^{-1}} \circ \tau_g = \tau_g \circ \tau_{g^{-1}} = Id_G$ Donc $(\tau_g)^{-1} = \tau_{g^{-1}} \in T_G$

Preuve de 2 :
Notons $\phi : \left| \begin{array}{ccc} G & \longrightarrow & T_G \\ g & \longmapsto & \tau_g \end{array} \right.$ Alors ϕ est un morphisme (d'après la preuve de 1) ϕ est immédiatement surjectif, mais il est également injectif :
Soit $g \in G$ tel que $\tau_g = Id_G$. Alors $\forall x \in G, gx = x$. Si on prend $x = e_G$, on obtient $g = e_G$. Donc $Ker(\phi) = e_G$, et donc ϕ est injectif.

$\square$

1.3 Produits directs

Définition : (Produit direct)
Le groupe "produit direct" de deux groupes G_1, G_2 est l'ensemble $G_1 \times G_2$ muni de la loi :
$\cdot : \left| \begin{array}{ccc} (G_1 \times G_2) \times (G_1 \times G_2 & \longrightarrow & G_1 \times G_2 \\ ((x_1, x_2), (y_1, y_2)) & \longmapsto & (x_1 y_1, x_2 y_2) \end{array} \right.$

Exercice :
vérifier que $G_1 \times G_2$ muni de cette loi ests bien un groupe.

Définition : (Projections et injections canoniques)

1. Projections canoniques $p_i : \left| \begin{array}{ccc} G_1 \times G_2 & \longrightarrow & G_i \\ (x_1, x_2) & \longmapsto & x_i \end{array} \right.$.
2. Injections canoniques : $q_1 : \left| \begin{array}{ccc} G_1 & \longrightarrow & G_1 \times G_2 \\ x_1 & \longmapsto & (x_1, e_2) \end{array} \right.$ et $q_2 : \left| \begin{array}{ccc} G_2 & \longrightarrow & G_1 \times G_2 \\ x_2 & \longmapsto & (e_1, x_2) \end{array} \right.$

Remarque :
$\text{Im}(q_i)$ est isomorphe à G_i. Ainsi $G1 \times G_2$ contient un sous-groupe isomorphe à G_1, de même pour G_2.
Remarque :
$\forall\ x = (x_1, x_2) \in G_1 \times G_2$, on a :
$x = (p_1(x), p_2(x)) = (x_1, x_2) = (x_1, e_2)(e_1, x_2) = (e_1, x_2)(x_1, e_2) = q_1(x_1)q_2(x_2) = q_2(x_2)q_2(x_1)$

Théorème :
Un groupe G est isomorphe au produit direct $G1 \times G_2$ ssi G contient deux sous-groupes H_1, H_2 tel que :

1. H_i est isomorphe à $G_i (i = 1, 2)$
2. $h_1 h_2 = h_2 h_1, \forall h_1 \in H_1, \forall h_2 \in H_2$
3. $G = H_1 H_2$
4. $H_1 \cap H_1 = \{e_G\}$

Preuve :
$\boxed{\Rightarrow}$ Supposons qu'il existe $\phi : \quad G_1 \times G_2 \quad \longrightarrow \quad G$ isomorphe.

1. On a que $G_1 \simeq \{G_1, e_2\} \simeq \phi(\{G_1, e_2\}) := H_1$ il suffit alors de remarquer que H_1 est un sous groupe de G. On construit de même H_2
2. $\forall (h_1, h_2) \in H_1 \times H_2$, on note $h'_1 = (h_1, e_2)$ idem pour h'_2, on a alors :
$$h_1 h_2 = \phi(h'_1 h'_2) = \phi(h'_2 h'_1) = h_2 h_1$$
3. $\forall x \in G, \exists!\ x' = (h_1, h_2) \in G_1 \times G_2$ tel que $\phi(x') = x$. On a alors :
$$x = \phi(x') = \phi(h'_1 h'_2) = h_1 h_2$$
4. Immédiat

$\boxed{\Leftarrow}$ Construisons un isomorphisme de G dans $G_1 \times G_2$
Fait : $\forall g \in G, \exists!(h_1, h_2) \in H_1 \times H_2$ tel que $g = h_1 h_2$
En effet : l'existence vient de 3), l'unicité vient de 4) :$g = h_1 h_2 = k_1 k_2$ alors $(k_1)^{-1} h_1 = k_2 (h_2)^{-1}$. Comme $H_1 \cap H_2 = \{e\}$ on obtient $(k_1)^{-1} h_1 = k_2 (h_2)^{-1} = e_G \Rightarrow h_1 = k_1$ et $h_2 = k_2$
Notons $\phi_1 : \quad H_1 \quad \longrightarrow \quad G_1$ et $\phi_2 : \quad H_2 \quad \longrightarrow \quad G_2$ les isomorphismes données par 1).
Posons $\phi : \left| \begin{array}{ccc} G & \longrightarrow & G_1 \times G_2 \\ h_1 h_2 & \longmapsto & (\phi_1(h_1), \phi_2(h_2)) \end{array} \right.$
Mq ϕ est un morphisme (α), injectif (β), surjectif γ

(α) : $\phi(h_1h_2h'_1h'_2) = \phi(h_1h'_1h_2h'_2) = (\phi_1(h_1h'_1), \phi_2(h_2h'_2)) = (\phi_1(h_1), \phi_1(h'_1), \phi_2(h_2)\phi_2(h'_2)) = (\phi_1(h_1), \phi_2(h_2))(\phi_1(h'_1), \phi_2($
$\phi(g)\phi(g')$
(β) : Soit $x = h_1h_2$ tel que $\phi(x) = (\phi_1(h_1), \phi_2(h_2)) = (e_1, e_2)$
Alors $\phi_1(h_1) = e_1$ et $\phi_2(h_2) = e_2 \Rightarrow h_1 = h_2 = e_G$
(γ) : Soit $x = (x_1, x_2) \in G_1 \times G_2$, soit (h_1, h_2) tel que $\phi_i(h_i) = x_i$, alors $x = (\phi_1(h_1), \phi_2(h_2)) = \phi(h_1, h_2)$, cela montre la surjectivité de ϕ.

$\square$

Exemple :
$(\mathbb{Z}/2^\alpha\mathbb{Z}, +, \times) estanneau$. On note $(\mathbb{Z}/2^\alpha\mathbb{Z})^\times$ l'ensemble des éléments inversibles de l'anneau (pour la loi $\times$). Si $\alpha \geq 3$, $(\mathbb{Z}/2^\alpha\mathbb{Z})^\times$ est isomorphe à $(\mathbb{Z}/2^{\alpha-2}\mathbb{Z}) \times (\mathbb{Z}/2\mathbb{Z})$

Chapitre 2

Classes modulo un sous-groupe, sous-groupes distingués

2.1 Classes à droite, classes à gauche

Soit $H < G$. On définit $x\mathcal{R}_H y \iff xy^{-1} \in H$ et $x_H\mathcal{R}y \iff x^{-1}y \in H$

Exemple :

1. $\mathcal{R}_H$ et ${}_H\mathcal{R}$ définissent deux relations d'équivalences
2. La classe d'équivalence de x pour $\mathcal{R}_H$ est Hx appelée classe à droite de x modulo H, idem pour ${}_H\mathcal{R}$

Exemple :
Dans $\mathbb{S}_3, \sigma := (1,2,3), \tau := (1,2)$
$\mathbb{S}_3\{e, \sigma, \sigma^2, \tau, \tau\sigma, \sigma\tau\}$, pour $H = \{e, \tau\}$
$H_\sigma = \{\sigma, \tau\sigma\}, H_{\sigma^2} = \{\sigma^2, \tau\sigma^2(= \sigma\tau)\}$
$\sigma H = \{\sigma, \sigma\tau\}, \sigma^2 H = \{\sigma^2, \sigma^2\tau(= \tau\sigma)\}$
donc $\sigma H \neq H\sigma$

Exemple :
Si G est abélien, on a $xH = Hx, \forall x \in G$.

Remarque :
$\forall g \in G$, $\tau_g : \left| \begin{array}{ccc} G & \longrightarrow & G \\ x & \longmapsto & gx \end{array} \right.$ est une bijection. En particulier, $\tau_g|_H$ est une bijection de H sur gH. De même, $\rho_g : \left| \begin{array}{ccc} G & \longrightarrow & G \\ x & \longmapsto & xg \end{array} \right.$, alors $\rho_g|_H$ est une bijection de H sur Hg.

Remarque :
Soit $\{e\} \cup \{x_i, i \in I\}$ un système de représentants des classes à gauche modulo H. On a alors $G = H \sqcup \bigsqcup_{i \in I} x_i H$ (union disjointe).

Remarque :
L'application : $x_i H \longrightarrow H(x_i)^{-1}$ est une bijection de l'ensemble des classes à gauche sur l'ensemble des classes à droite.

Définition : (Indice de H dans G)
L'indice de H dans G est le cardinal (fini ou infini) de l'ensemble des classes à gauche (= cardinal de l'ensemble des classes à droite), il est noté $[G : H]$

On en déduit le théorème de Lagrange :

Théorème :
Théorème de Lagrange Soit G un groupe fini et $H < G$. Alors :

1. $|G| = |H|[G : H]$
2. $\forall x \in G, o(x) \mid |G|$

2.2 Sous-groupes distingués

Définition : (S)
oit G un groupe fini, $H < G$ est dit distingué (ou normal) dans G ssi $\forall x \in G, xH = Hx$.
Le cas échéant on note : $H \triangleleft$

Définition : (U)
n groupe G est dit simple ssi ses seuls sous-groupes distingué sont $\{e\}$ et G.

Remarque :
Si G est abélien, tout $H < G$ est distingué.

Exemple :
Soit $H < G$. Alors $H \triangleleft G \iff \forall g \in G, gHg^{-1} = H$

Propriété :
Soit ${}_H \backslash G$ l'ensemble des classes à gauche modulo H.
L'application $: \begin{array}{ccc} (xH, yH) & \longrightarrow & xyH \end{array}$ est bien définie ssi $H \triangleleft G$.
Idem pour les classes à droites G/H.

Preuve :
$\Rightarrow$) Soit $h \in H, y \in G$, l'application est bien définie, donc $egH = hgH$ donc $yH = hgH$ donc $H = y^{-1}hyH$, donc $y^{-1}hy \in H$.
$\Leftarrow$) Si $x, x' \in G$ tel que $xH = x'H$, et si $y, y' \in G$ tel que $yH = y'H$, alors on a $h, h' \in H$ vérifiant : $x' = xh$ et $y' = yh'$. Donc $x'y' = xyy^{-1}hyh'$, avec $y^{-1}hyh' \in H$ car $H \triangleleft G$. Donc $x'y'H \subseteq xyH$, par symétrie on a $\supseteq$

$\square$

Théorème :
Groupe quotient Soit G un groupe, $H \triangleleft G$. On note $\bar{x}$ la classe de x modulo H, $\frac{G}{H}$ l'ensemble des classes modulo H. Alors :

1. L'application $* : \left| \begin{array}{ccc} (\frac{G}{H}) \times (\frac{G}{H}) & \longrightarrow & \frac{G}{H} \\ (\bar{x}, \bar{y}) & \longmapsto & \bar{x} * \bar{y} := \bar{xy} \end{array} \right.$ munit $\frac{G}{H}$ d'une structure de groupe tel que $\bar{e} = H$ est l'élément neutre.
2. En particulier, l'application $\pi : \begin{array}{ccc} G & \longrightarrow & \frac{G}{H} \end{array}$ est un morphisme de groupes de noyau H.

2.2.1 Sous-groupes distinguées et noyaux

Propriété :
Si $\phi : \begin{array}{ccc} G & \longrightarrow & G' \end{array}$ un morphisme, alors $Ker(\phi) \triangleleft G$.

Preuve :
Si $h \in Ker(\phi), g \in G, \phi(ghg^{-1}) = \phi(g)\phi(h)\phi(g)^{-1} = \phi(g)\phi(g)^{-1} = e_{G'}$, donc $ghg^{-1} \in Ker(\phi)$.

□

Théorème :
Groupes distingués et morphismes Soit G un groupe. Alors $H \lhd G$ ssi $\exists G'$ groupe, $\exists\ \phi : \quad G \quad \longrightarrow \quad G'$ morphisme tel que $H = Ker(\phi)$

Exemple :

1. $\varepsilon : \quad \mathbb{S}_n \quad \longrightarrow \quad -1, 1$ (*signature*), alors $A_n := Ker(\varepsilon) \lhd \mathbb{S}_n$
2. $det : \quad \mathbb{GL}_n(\mathbb{R}) \quad \longrightarrow \quad \mathbb{R}^*$, alors $\mathbb{SL}_n(\mathbb{R}) := Ker(det) \lhd \mathbb{GL}_n(\mathbb{R})$

Théorème : Premier théorème d'isomorphisme
Soit $\phi : \quad G \quad \longrightarrow \quad G'$ un morphisme de groupe. Alors, $G/Ker(\phi)$ est isomorphe à $Im(\phi)$.

Chapitre 3

Étude de $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, de $\mathcal{S}_n$, de $\mathbb{D}_n$

3.1 J'ai pas le nom...

3.1.1 Autres exemples de sous groupes normaux

- j'ai pas le premier...
- Le centre d'un groupe $Z(G) = \{g \in G,\ gx = gx\ \forall x \in G\}$ est un sous groupe normal de G. (preuve en exercice (feuille 3)). $Z(G)$ est en fait caractéristique c'est à dire qu'il est invariant par tout automorphisme intérieur
- Le groupe dérivé de G est le sous-groupe (noté D(G)) qui est engendré par les commutateurs de G c'est à dire les éléments de la forme $[a, b] = aba^{-1}b^{-1}$ est aussi un sous-groupe normal.

Exemple :

1. Si G est abélien alors $Z(G) = G$
2. Si $n \leq 3$ alors $Z(S_n) = \{e\}$

Preuve :
Preuve du deuxième point :
Soit $\sigma \in \mathcal{S}_n$ avec $\sigma \neq e$.
Soit alors $i \in [\![1, n]\!]$ tel que l'on ait $\sigma(i) := j \neq i$
Soit enfin $k \in [\![1, n]\!] \setminus \{i, j\}$, on pose $\tau = (j, k)$.
On à bien $\sigma\tau \neq \tau\sigma$, car $\sigma\tau(i) = j \neq \tau\sigma(j) = k$

□

Exercice :

- $D(G) \lhd G$ et $G/D(G)$ est abélien
- Soit $H \lhd$ alors G/H est abélien$\Leftrightarrow$ $D(G) < H$
- D(G) est un sous groupe caractéristique de G
- $\forall n \leq 3 \quad D(S_n) = A_n$ ou A_n est le groupe alterné, désigne les permutations de signature paire

Définition : (Normalisateur d'un sous-groupe)
Soit $H < G$, on note$N_G(H) = \{g \in G,\ gH = Hg\ \}$, on l'appel le normalisateur de H dans G

Exercice :
Mq $H \lhd N_g(H)$ et que $N_g(H) < G$

Exemple :
Dans A_4
Soit $H = \{e, (1,2), (3,4)\} < A_4$, $|H| = 2$.
O a $H < D(A_4)$ et $H \triangleleft D(A_4)$ car $\dfrac{|D(A_4)|}{|H|} = 2$.
Verifier que $N_{A_4}(H) = D(A_4)$:

Soit $N = N_{A_4}(H)$ pour simplifier. On sait que $D(A_4) < N$ donc $|D(A_4| = 4$ divise $|N|$ donc $|N| \in \{4, 8, 12\}$, mais vu $N < A_4$, $|N|$ divise 12, donc $|N| = 4$ où $|N| = 12$. Mais $N \neq A_4$ car $(1,2,3)H(1,2,3) \neq H$

3.2 Groupes Monogènes, cycliques, symétriques, diédraux

3.2.1 Groupes Monogènes

Définition : (Groupe monogène)
Un groupe G est dit monogène si il est engendré par une unique élément

Théorème :
Soit G un groupe monogène alors :

- Ou bien G est isomorphe à $\mathbb{Z}$
- Ou bien G est isomorphe à $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ pour un certain $n \in \mathbb{N}$

Preuve :

Soit $G =< x >$ et soit $\psi : \left| \begin{array}{ccc} \mathbb{Z} & \longrightarrow & G \\ k & \longmapsto & x^k \end{array} \right.$. ψ est un morphisme de groupe, il est surjectif.
Si il est injectif on à bien $G \simeq \mathbb{Z}$.
Sinon, il existe $n \in \mathbb{N}$ tq $\ker \psi = n\mathbb{Z}$

$$\begin{tikzcd}
\mathbb{Z} \arrow[r, "\psi"] \arrow[d, "\pi"'] & G \\
\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \arrow[ur, "\tilde{\psi}"'] &
\end{tikzcd}$$

Et d'après le premier théorème d'isomorphisme, il existe un isomorphisme de groupe
$\tilde{\psi} : \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \longrightarrow Im(\psi) = G$ tel que le diagramme ci-dessus commute.

□

Propriété :
Tout groupe fini d'ordre p avec p premier est cyclique

Preuve :
utiliser lagrange

□

3.2.2 Sous-groupes d'un groupe monogène

Propriété :

1. Tout sous-groupe non trivial d'un groupe monogène infini est infini
2. Tout sous groupe d'un groupe cyclique est monogène et cyclique

Preuve :

1. Ici $G \simeq \mathbb{Z}$, donc tout $H < G$ est isomorphe à un sous-groupe de $\mathbb{Z}$ i ;e. un groupe de la forme $n\mathbb{Z}$ pour $n \neq 0$, donc H est infini
2. On reprend le diagramme :

$$\begin{tikzcd} \mathbb{Z} \arrow[r, "\psi"] \arrow[d, "\pi"'] & G \\ \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \arrow[ur, "\tilde{\psi}"'] & \end{tikzcd}$$

Soit $K < G = \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ on à $K = \pi(\pi^{-1}(K))$ car π est surjective. Comme $\pi^{-1}(K)$ est un sous groupe de $\mathbb{Z}$ il existe $k > 0$ tq $\pi^{-1}(K) = k\mathbb{Z}$.
Alors $K = \pi(k\mathbb{Z})$ est le sous-groupe de $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ engendré par $\pi(k)$, K est donc monogène et fini

$\square$

Remarque :
Si on reprend la preuve précédente on à $\pi^{-1}(0) = n\mathbb{Z} \subset \pi^{-1}(K) = k\mathbb{Z}$.
Ainsi, $n\mathbb{Z} \subset k\mathbb{Z}$ et donc k$|n$. Par conséquent, pour tout sous-groupe K de $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, il exise un diviseurk de n tq $\pi(k)$ engendre K, l'ordre de $\pi(k)$ étant $\frac{n}{k}$, on a $|K| = \frac{n}{k}$ en particulier ce diviseur est unique on à donc le thm suivant.

Théorème :
Soit $G =< x >$ un groupe cyclique d'ordre n alors :
Pour tout diviseur d de n, il existe un unique sous groupe d'ordre d de G et ce sous groupe est engendré par $x^{\frac{n}{d}}$

Propriété :

Soit G un groupe non trivial alors :

$$\text{G n'a pas de d'autres sous-groupes que } G, \{e\} \iff \text{G est cyclique d'ordre p premier}$$

Preuve :
$\boxed{\Leftarrow}$ évident par lagrange

$\boxed{\Rightarrow}$ Soit$x \in G \setminus \{e\}$ alors $< x >= G$ par hypothèse. Si G était infini, il posséderait des sous-groupes non triviaux de type $n\mathbb{Z}$, donc G est fini. Comme il n'a pas d'autres sous-groupes que $\{e\}$ et G on a forcément $|G| = p$ premier par le théorème précédent.

$\square$

Théorème :
Soit G un groupe monogène : $G =< x >$

1. Si G est infini, alors les seuls générateurs de G sont x et x^{-1}

2. Si G est fini (il est cyclique d'ordre n) alors l'ensemble de ses générateurs est donné par $\{x^k : k \in \mathbb{Z}, k \wedge n = 1\}$

Preuve :

1. Soit $\psi : k \in \mathbb{Z} \to x^k \in G$ (vue précédemment) qui est un isomorphisme de groupes. En particulier, ψ échange les générateurs. Comme les seuls générateurs de $\mathbb{Z}$ sont 1 et -1, on conclut.

2. Soit $k \in \mathbb{Z}$, alors :

$$G =< x > \iff \exists m \in \mathbb{Z}, x^{km} = x$$
$$\iff \exists m \in \mathbb{Z}, n|km - 1 \iff \exists (m, q) \in \mathbb{Z}, km - nq = 1$$
$$\iff pgcd(k, n) = 1$$

□

Exercice :
L'ensemble des générateurs de $G \simeq \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ est aussi égal à $\{\bar{k} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} : 0 \leq k \leq n - 1, k \wedge n = 1\}$

Définition : (Fonction d'Euler)
La fonction d'Euler est la fonction $\varphi : \mathbb{N}^* \to \mathbb{N}^*$ telle que :
— $\varphi(1) = 1$
— $\varphi(n) = |\{k \in \mathbb{N} : 1 \leq k \leq n, k \wedge n = 1\}|$

3.3 Anneau $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$

On rappelle que les opérations d'addition et de multiplication sont bien définies sur $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ (pas de dépendance des représentants) et que cet anneau est unitaire.

Définition : (Inverse modulo n)
On dit que $\bar{k} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ est inversible s'il existe $\bar{m} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ tel que $\bar{k}\bar{m} = \bar{1}$

Propriété :
Soit $n \geq 2$. Les éléments inversibles de $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ sont exactements les générateurs de $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +)$
L'ensemble des éléments inversibles est alors un groupe abélien fini d'ordre $\varphi(n)$.

Preuve :
Utiliser la caractérisation précédente avec Bézout.

□

3.4 Produits directs de groupes cycliques, calcul de $\varphi(n)$

On considère le morphisme d'anneaux unitaires :

$$f : k \in \mathbb{Z} \to (\bar{k}, \bar{\bar{k}}) \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$$

Théorème :
Le morphisme d'anneaux unitaires f induit par passage au quotient par son noyau un isomorphisme d'anneaux unitaires $\bar{f} : \mathbb{Z}/nm\mathbb{Z} \to \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ si et seulement si $m \wedge n = 1$

Preuve :
Il faut vérifier $\bar{f}$ est bijective ssi $m \wedge n = 1$:

f est surjective
$\iff |Im(f)| = mn$
$\iff |\mathbb{Z}/ker(f)| = mn$ *(grâce au théorème d'isomorphisme)*
$\iff ker(f) = mn\mathbb{Z}$
$\iff m\mathbb{Z} \cap n\mathbb{Z} = mn\mathbb{Z}$
$\iff m \wedge n = 1$

□

Propriété :
Si $m \wedge n = 1$, alors $\varphi(nm) = \varphi(n)\varphi(m)$

Théorème :
Soit $n = p_1^{\alpha_1} \cdots p_k^{\alpha_k}$, décomposé en facteur premiers. Alors :

$$\varphi(n) = n\left(1 - \frac{1}{p_1}\right) \cdots \left(1 - \frac{1}{p_k}\right)$$

Preuve :
Il nous suffit de calculer $\varphi(p^\alpha)$ pour p premier et $\alpha \geq 1$. On a :
$\varphi(p^\alpha) = |\{k \in \{1, \cdots, p^\alpha\} : k \wedge p^\alpha = 1\ \}| = |\{1, \cdots, p^\alpha\} \backslash \{p, 2p, \cdots, p^{\alpha-1}p\}| = p^\alpha - p^{\alpha-1} = p^\alpha\left(1 - \frac{1}{p}\right)$

□

3.5 Structure des groupes abéliens finis (admis)

Référence : Livre de F. Ulmer "Théorie des groupes" chap 12

Soit G un groupe fini abélien d'ordre N. Il existe une décomposition unique $N = d_1 \cdots d_n$ avec $d_n \geq 2$ et $d_{i+1}|d_i$ telle que :

$$G \simeq \mathbb{Z}/d_1\mathbb{Z} \times \cdots \times \mathbb{Z}/d_n\mathbb{Z}$$

Exemple :
On peut lister, à isomorphisme près, tous les groupes abiéliens d'ordre $72 = 3^2 \times 2^3$ avec les séquences suivantes : $(3^2 \times 2^2, 2), (3 \times 2, 3 \times 2, 2), (3 \times 2^3, 3), (2^2 \times 3, 2 \times 3), (3^2 \times 2, 2, 2)$

3.6 Groupes symétriques

On note $\mathcal{S}_n$ l'ensemble des permutations de $\{1, 2, ..., n\}$ que l'on munit de la loi de composition : c'est un groupe d'ordre $n!$

3.6.1 Support, orbite

Définition : (support)
Le support de $\sigma \in \mathcal{S}_n$ est l'ensemble $\{i \in \{1, ..., n\}\ ;\ \sigma(i) \neq i\}$

Exercice :
Soit $\sigma \in \mathcal{S}_n$. Montrer que

- σ et σ^{-1} ont le même support
- si $k \in \mathbb{Z}$, σ et σ^k ont le même support
- deux permutations dont les supports sont disjoints commutent

Définition : (orbite)
Soit $\sigma \in \mathcal{S}_n$. On définit la relation d'équivalence sur $\{1, ..., n\}$:

$$i\mathcal{R}j \Longleftrightarrow \exists r \in \mathbb{Z} \mid \sigma^r(i) = j.$$

La classe de i est notée $\Omega(i) = \{\sigma^r(i), r \in \mathbb{Z}\}$ et est appelée σ-orbite de i.

3.6.2 Notion de cycle

Définition : (r-cycle)
$\sigma \in \mathcal{S}_n$ est un r-cycle si il existe $j_1, ..., j_r$ dans $\{1, ..., n\}$ tq $\sigma(j_1) = j_2, ..., \sigma(j_{r-1}) = j_r, \sigma(j_r) = j_1$, et si pour $k \notin \{j_1, ..., j_r\}, \sigma(k) = k$.
Alors le support de σ est $\{j_1, ..., j_r\}$. On notera $\sigma = (j_1, ..., j_r)$

Définition : (transposition, permutation circulaire)
1. Un 2-cycle est appelé transposition
2. le n-cycle $(1, ..., n)$ est appelé permutation circulaire

Exemple :
Si $\sigma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 3 & 1 & 2 & 6 & 5 & 4 \end{pmatrix} \begin{matrix} \leftarrow & i \\ \leftarrow & \sigma_0(i) \end{matrix}$
alors $\sigma_0 = (1, 2, 3)(4, 6)$.

Théorème :
Toute permutation $\sigma \in \mathcal{S}_n \setminus \{e\}$ se décompose sous la forme $\sigma = \gamma_1 \circ \gamma_2 \circ ... \circ \gamma_s$ où $s \in \mathbb{N}^*$, et où les γ_i sont des cycles différents de e dont les supports sont disjoints deux à deux. Cette décomposition est unique à l'ordre près des facteurs.

Exercice :
1. montrer que l'ordre de σ est égal au ppcm des longueurs des cycles $\gamma_1, ..., \gamma_s$.
2. calculer σ_0^{1000}.

3.6.3 Formules importantes

Propriété :
Pour tout$\tau \in \mathcal{S}_n$, $\tau(j_1, ..., j_r)\tau^{-1} = (\tau(j_1), ..., \tau(j_r))$.

Propriété :
$(j_1, ..., j_r) = (j_1, j_2)(j_2, j_3)...(j_{r-1}, j_r)$

<u>**Cas particulier :**</u> $(a, b, c) = (a, b)(b, c)$
<u>**Applications de ces deux propriétés :**</u>

1. Deux r-cycles de $\mathcal{S}_n$ sont conjugués dans $\mathcal{S}_n$
2. $(1,i)(1,j)(1,i) = (1,i)(1,j)(1,i)^{-1} = (i,j)$
3. $\mathcal{S}_n$ est engendré par les transpositions du type $(j, j+1)$ où $j \in \{1, ..., n-1\}$
   preuve : laissée en exercice au lecteur, l'idée est de montrer que (i,j) est un produit de transpositions du type $(k, k+1)$ par récurrence sur $j-1$ en utilisant $(i,j) = (j-1,j)(i,j-1)(j-1,j)$
4. $\mathcal{S}_n$ est engendré par $(1,2)$ et $\eta = (1,2,...,n)$
   preuve : $\eta^i(1,2)\eta^{-i} = (i+1, i+2)$

3.6.4 Générateurs

Soit $n \geq 2$.

Théorème :
1. $\mathcal{S}_n$ est engendré par les transpositions
2. $\mathcal{S}_n$ est engendré par les transpositions du type $(1,j)$ où $j \in \{2, ..., n\}$

3.6.5 Centre

Théorème :
$Z(\mathcal{S}_n) = \{e\}$ pour $n = 1$ et $n \geq 3$.

3.6.6 Signature

Définition : (signature)
Soit $\sigma \in \mathcal{S}_n$. On pose $\epsilon(\sigma) = (-1)^{n-t}$ où t est le nombre de σ-orbites différentes.

Exemple :
• $\sigma = e$: on a $\sigma(i) = i$ pour tout $i \in \{1, ..., n\}$, chaque point est une orbite donc $t = n$ et $\epsilon(\sigma) = 1$
• $\sigma = (1,2)$: ici il y a $n-2$ éléments fixés qui donnent chacun une orbite, et $\{1,2\}$ est une autre orbite donc $\epsilon(\sigma) = -1$.
• $\sigma = (1, ..., r)$: $\epsilon(\sigma) = (-1)^{r-1}$

Propriété :
Soit $\sigma \in \mathcal{S}_n$ où $n \geq 2$. Alors $\epsilon(\sigma \circ \tau) = (-1) \times \epsilon(\sigma)$ pour toute transposition $\tau \in \mathcal{S}_n$.
En particulier, si σ est un produit de k transpositions, on a $\epsilon(\sigma) = (-1)^k$.

Remarque :
Ainsi, la parité du nombre de transpositions nécessaires pour décomposer σ ne dépend que de σ.

Théorème :
Si $n \geq 2$, $\epsilon : \mathcal{S}_n \longrightarrow \{1, -1\}$ est un morphisme de groupes surjectif.

Preuve :
Soient $\sigma, \sigma' \in \mathcal{S}_n$. On décompose $\sigma = \tau_1 \circ ... \circ \tau_k$ et $\sigma' = \tau'_1 \circ ... \circ \tau'_{k'}$ en produits de transpositions.
Alors $\epsilon(\sigma \circ \sigma') = (-1)^{k+k'} = \epsilon(\sigma) \times \epsilon(\sigma')$.

□

Définition : (Groupe alterné)
Soit $n \geq 2$. $\mathcal{A}_n$ est le noyau de ϵ, on le nomme groupe alterné.

Remarque :
C'est un sous groupe distingué de $\mathcal{S}_n$ d'indice 2, car le noyau d'un morphisme
Remarque :
Si τ est une transposition, $(\tau\mathcal{A}_n) \cap \mathcal{A}_n = \emptyset$, d'où $\mathcal{S}_n = (\tau\mathcal{A}_n) \sqcup \mathcal{A}_n$.

Théorème :
1. Si $n \geq 3$, $\mathcal{A}_n$ est engendré par les 3-cycles.
2. Si $n \geq 5$, deux 3-cycles sont conjugués dans $\mathcal{A}_n$
3. Si $n \geq 2$ alors $D(\mathcal{S}_n) = \mathcal{A}_n$, si $n \geq 5$ alors $D(\mathcal{A}_n) = \mathcal{A}_n$.

Preuve :
1. Soit $\sigma \in \mathcal{A}_n$, σ est un produit d'un nombre pair de transpositions, or $(i,j)(j,k) = (i,j,k)$ et $(i,j)(k,l) = (i,j,k)(j,k,l)$.
2. Soient $(i,j,k), (i',j',k')$ deux 3-cycles. Il existe $\sigma \in \mathcal{S}_n$ tel que $\sigma(i) = i'$, $sigma(j) = j', \sigma(k) = k'$. Alors $\sigma(i,j,k)\sigma^{-1} = (i',j',k')$. Sans perte de généralité, on peut supposer que $\sigma \in \mathcal{A}_n$, en effet $n \geq 5$, donc il existe une transposition $\tau = (r,s)$ avec $r,s \notin \{i,j,k\}$, et on peut remplacer σ par $\sigma\tau$.
3. $D(\mathcal{A}_n) \subset D(\mathcal{S}_n) \subset \mathcal{A}_n$ car si $a,b \in \mathcal{S}_n$, alors $\epsilon([a,b]) = 1$.
Montrons que si $n \geq 5$, les 3-cycles, qui engendrent $\mathcal{A}_n$, sont des commutateurs (de $\mathcal{A}_n$).
Soit $\sigma = (i,j,k)$ un 3-cycle. σ^2 est aussi un 3-cycle donc d'après 2. les deux sont conjugués : il existe $\eta \in \mathcal{A}_n$ tel que $\sigma^2 = \eta\sigma\eta^{-1}$ i.e. $\sigma = [\eta,\sigma]$.

□

Cas particuliers :

1. $D(\mathcal{A}_3) = \{e\}$
2. $D(\mathcal{A}_4) = \{e, (1,2)(3,4), (1,3)(2,4), (1,4)(2,3)\}$

Preuve :

1. $\mathcal{A}_3 =< (1,2,3) >$ donc $\mathcal{A}_3 \simeq \mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ est abélien
2. On note $V = \{e, (1,2)(3,4), (1,3)(2,4), (1,4)(2,3)\}$, c'est un sous groupe distingué de $\mathcal{A}_4$. Alors le groupe quotient $\mathcal{A}_4/V$ est d'ordre 3 donc isomorphe à $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ qui est abélien. Ainsi $D(\mathcal{A}_4)$ est un sous-groupe de V. Par le théorème de Lagrange, $D(\mathcal{A}_4)$ est de cardinal 1, 2, ou 4. $\mathcal{A}_4$ n'est pas abélien donc ce n'est pas 1. Si c'était 2, $D(\mathcal{A}_4)$ serait de la forme $\{e, (i,j)(k,l)\}$ qui n'est pas distingué.

□