

ALGÈBRE GÉNÉRALE

JEAN-PAUL CALVI

RÉFÉRENCES

- [1] Burn, R.P. *Groups, a path to geometry*, Cambridge university press, Cambridge, 1985.
 - [2] Kargapolov, M. et Merzliakov I. *Eléments de la théorie des groupes*, Mir, Moscou, 1985.
 - [3] Kostrikin, A. *Introduction à l'algèbre*, Mir, Moscou, 1981.
 - [4] Kurosh, A. *Cours d'algèbre supérieure*, Mir, Moscou, 1973.
-

1. INTRODUCTION À LA THÉORIE DES GROUPES

§ 1. La structure de groupe.

1.1. *Lois internes.*

1.2. *Associativité, commutativité.* Exemple de loi non associative, non commutative.

1.3. *À quoi sert l'associativité? la commutativité?*

Théorème 1.1. *Lorsque la loi $*$ sur E est associative, on peut écrire les produits sans qu'il soit nécessaire de placer les parenthèses (autrement dit le résultat ne dépend pas de la manière dont sont placées les parenthèses). En particulier, pour $a \in E$ et $n \in \mathbb{N}^*$, on peut définir*

$$a^n =_{\text{def}} \underbrace{a * a * \cdots * a}_{n \text{ fois}}$$

et on a les relations

$$\begin{cases} a^n * a^m &= a^{n+m} & (n, m \in \mathbb{N}^*) \\ (a^n)^m &= a^{nm} & (n, m \in \mathbb{N}^*) \end{cases}$$

Date: 22 mars 2005.

Merci de signaler les erreurs et les imprécisions en écrivant à calvi@picard.ups-tlse.fr.

Enfin, si, en plus d'être associative, la loi $*$ est aussi commutative on peut permuer les éléments de $a_1 * a_2 * \dots * a_n$ de manière arbitraire sans modifier le résultat.

1.4. *Élément neutre pour une loi interne.* Soit $*$ une loi interne sur un ensemble (non vide) E . On dit qu'un élément $e \in E$ est **élément neutre** (pour $*$) si

$$\forall a \in E \quad a * e = e * a = a.$$

Par exemple 0 est élément neutre de l'addition dans \mathbb{N} .

Théorème 1.2. *Une loi interne admet au plus un élément neutre.*

1.5. *Définition d'un groupe.* Un ensemble G muni d'une loi interne $*$ est appelé groupe si

- (i) La loi $*$ est associative et admet un élément neutre, noté e — ou, s'il faut préciser, e_G .
- (ii) Pour tout $g \in G$, il existe un élément $y \in G$, appelé **élément symétrique** de g tel que

$$g * y = y * g = e.$$

On parle alors du **groupe** $(G, *)$ ou — lorsqu'il n'y a pas d'ambiguïté sur la loi $*$ — simplement du groupe G . Lorsque la loi $*$ est commutative on dit que $(G, *)$ est un **groupe commutatif** ou encore un **groupe abélien**. Lorsque G contient un nombre infini d'éléments, on dit que G est infini. Dans le cas contraire, on dit que G est fini. Le **cardinal** (c'est-à-dire le nombre d'éléments) d'un groupe G , appelé **ordre**, est noté $\text{card}(G)$ ou $o(G)$ ou $|G|$.

1.6. *L'élément symétrique.*

Théorème 1.3. *Dans un groupe tout élément admet toujours un unique élément symétrique.*

L'unique élément symétrique de g est noté g^{-1} . On a

- (i) $e^{-1} = e$. L'élément neutre est son propre symétrique.
- (ii) $(g^{-1})^{-1} = g$.
- (iii) $(g * g')^{-1} = g'^{-1} * g^{-1}$. Le symétrique d'un produit est le produit *inverse* des symétriques.
- (iv) Plus généralement $(g_1 * g_2 * \dots * g_n)^{-1} = g_n^{-1} * g_{n-1}^{-1} * \dots * g_1^{-1}$.

En particulier on a $(g^n)^{-1} = (g^{-1})^n$ ($n \in \mathbb{N}^*$). On note alors

$$g^{-n} =_{\text{def}} (g^n)^{-1}$$

ce qui permet de définir g^m pour $m \in \mathbb{Z}$ en convenant $g^0 = e$. Dans ces conditions on a les relations.

$$(g^m)^{m'} = g^{mm'} \quad \text{et} \quad g^m * g^{m'} = g^{m+m'} \quad (m, m' \in \mathbb{Z}).$$

1.7. *Sept exemples de groupes.*

a) (\mathbf{U}, \cdot) . C'est l'ensemble des nombres complexes de module 1 muni de la *multiplication des nombres complexes*. L'élément neutre est 1. C'est un groupe abélien infini.

b) $(\mathbf{Z}, +)$. L'ensemble des entiers relatifs muni de *l'addition (habituelle)*. L'élément neutre est 0, le symétrique d'un élément est son opposé. C'est un groupe abélien infini.

c) (\mathbf{U}_n, \cdot) où $n \in \mathbb{N}^*$. L'ensemble des racines n -ième de l'unité (dans \mathbb{C}). L'élément neutre est 1. C'est un groupe abélien fini. Il contient n éléments.

d) $(\mathbf{GL}_n(\mathbb{K}), \cdot)$. L'ensemble des matrices inversibles à n lignes et n colonnes à coefficients dans $\mathbb{K} = \mathbb{C}, \mathbb{R}$ ou \mathbb{Q} , muni de la *multiplication des matrices*. L'élément neutre est la matrice identité. L'élément symétrique est la matrice inverse. C'est un groupe non abélien (dès que $n > 1$) infini.

e) $(\mathbf{S}(\Omega), \circ)$. Ω est un ensemble quelconque non vide et $\mathbf{S}(\Omega)$ est l'ensemble des bijections de Ω sur Ω muni de la *composition des fonctions*. L'élément neutre est l'application identité, le symétrique est la bijection réciproque. C'est un groupe infini lorsque Ω est infini et il a pour cardinal $n!$ lorsque Ω est formé de n éléments. Il est non abélien dès que $\text{card}(\Omega) > 2$. Ce groupe est étudié en détail par la suite.

f) $(\mathbf{Is}(P), \circ)$. L'ensemble des isométries affines du plan euclidien P muni de la composition des fonctions. C'est un groupe infini non abélien contenant en particulier les translations, les rotations, les réflexions (symétries orthogonales).

g) **Produit de 2 groupes** Soient $(G_1, *_1)$ et $(G_2, *_2)$ deux groupes. On définit une loi $*_3$ sur $(G_1 \times G_2)$ par la relation suivante :

$$(g_1, g_2) *_3 (g'_1, g'_2) = (g_1 *_1 g'_1, g_2 *_2 g'_2).$$

Alors $(G_1 \times G_2, *_3)$ est un groupe, appelé le produit (ou produit direct) de $(G_1, *_1)$ par $(G_2, *_2)$. Lorsque $(G_1, *_1) = (G_2, *_2)$ on parle du groupe G^2 et on garde pour la loi de G^2 la même notation que pour la loi de G . On peut plus généralement former le produit de n groupes et lorsque tous les groupes coïncident on obtient G^n .

1.8. *Notation additive, notation multiplicative.*§ 2. **Sous-Groupes.**

2.1. *Définition et notations.* Soient $(G, *)$ un groupe et H un sous-ensemble non vide de G . On dit que H est un sous-groupe de G si

- (i) Pour tous $x, y \in H$ on a $x * y \in H$
- (ii) Pour tout $x \in H$, $x^{-1} \in H$

(Cela signifie que la restriction de $*$ à $H \times H$ donne une loi interne de H et que $(H,*)$ est alors lui-même un groupe.) Les deux conditions ci-dessus peuvent être remplacées par

(iii) Pour tous $x, y \in H$ on a $x * y^{-1} \in H$

La notation $H < G$ est employée pour dire H est sous-groupe de G . Lorsqu'on n'exclut pas la possibilité que H soit égal à G on écrit $H \leq G$.

2.2. *Six exemples de sous-groupes.*

a) $\mathbb{Z} < \mathbb{Q} < \mathbb{R} < (\mathbb{C}, +)$.

b) $m\mathbb{Z} < (\mathbb{Z}, +)$.

c) $\mathbf{U}_n < \mathbf{U} < (\mathbb{C}^*, \cdot)$.

d) $\mathbf{GL}_n(\mathbb{Q}) < \mathbf{GL}_n(\mathbb{R}) < (\mathbf{GL}_n(\mathbb{C}), \cdot)$.

e) $\mathbf{T} < \mathbf{Is}(P) < (\mathbf{S}(P), \circ)$ où \mathbf{T} l'ensemble des **translations** du plan euclidien.

f) $\mathcal{R}_A < (\mathbf{Is}(P), \circ)$ où \mathcal{R}_A l'ensemble des **rotations** de centre A du plan euclidien.

2.3. *Intersections de sous-groupes.*

Théorème 1.4. *Soient $(G,*)$ un groupe et \mathcal{F} une famille non vide de sous-groupes de G (\mathcal{F} peut contenir un nombre fini ou infini de sous-groupes). Si I est l'intersection de tous les éléments de \mathcal{F} , autrement dit $I = \bigcap_{H \in \mathcal{F}} H$ alors I est lui-même un sous-groupe de G .*

2.4. *Sous-groupe engendré par une partie.* Soit $(G,*)$ un groupe et A un sous-ensemble non vide de G . On appelle sous-groupe engendré par A le sous-groupe

$$\langle A \rangle = \bigcap_{H \in \mathcal{S}} H$$

où \mathcal{S} est l'ensemble de tous les sous-groupes de G qui contiennent A . Cet ensemble n'est pas vide car il contient G lui-même et la formule ci-dessus est par conséquent bien définie.

Théorème 1.5. *Le sous-groupe $\langle A \rangle$ est le plus petit sous-groupe de G contenant A . Autrement dit, $\langle A \rangle$ est caractérisé par les deux conditions suivantes*

(i) $\langle A \rangle$ est un sous-groupe de G contenant A .

(ii) Si H est un autre sous-groupe de G contenant A on a $\langle A \rangle \subset H$

2.5. *Description des éléments d'un sous-groupe engendré.*

Théorème 1.6. *Soient $(G,*)$ un groupe, A un sous-ensemble non vide de G et $x \in \langle A \rangle$. Il existe $n \in \mathbb{N}^*$ et des éléments y_1, y_2, \dots, y_n avec $y_i \in A$ ou $y_i^{-1} \in A$ pour $i = 1, 2, \dots, n$ tels que $x = y_1 * y_2 * \dots * y_n$.*

Pour bien des questions, on considère qu'on a déjà acquis une bonne connaissance du groupe G si on a pu exhiber un ensemble générateur le

plus petit possible car on peut alors décrire par la formule assez simple ci-dessus tous les éléments du groupe.

2.6. *Groupes cycliques, ordre d'un élément.* On dit qu'un groupe $(G,*)$ est cyclique s'il est engendré par un ensemble réduit à un seul élément i.e. $G = \langle \{a\} \rangle$. On note aussi pour simplifier $G = \langle a \rangle$.

Théorème 1.7. *Soit $(G,*)$ un groupe cyclique engendré par $a \in G$. Il y a deux possibilités. Ou bien a est d'ordre fini $d \in \mathbb{N}^*$ et on a $G = \{a^i, i = 0, 1, \dots, d-1\}$ ou bien a n'est pas d'ordre fini (on dit alors qu'il est d'ordre infini) et $G = \{a^m, m \in \mathbb{Z}\}$. Dans chaque cas les éléments des ensembles indiqués sont deux à deux distincts.*

On remarquera que l'ordre d'un élément est égal au cardinal du groupe qu'il engendre. Les groupes cycliques sont tous abéliens¹.

2.7. *Quatre exemples de sous-groupes engendrés.*

- a) $\langle m \rangle = m\mathbb{Z}$.
- b) $\langle m, n \rangle = \text{pgcd}(m, n)\mathbb{Z}$.
- c) $\mathbf{U}_n = \langle \exp(2i\pi/n) \rangle$.

d) On démontre en géométrie que toute isométrie du plan s'écrit comme la composée d'au plus *trois* réflexions (symétries orthogonales) on a donc

$$\mathbf{Is}(p) = \langle s_D : D \text{ droite du plan} \rangle.$$

§ 3. Morphismes.

3.1. *Definition.* Soit $(G,*)$ et (G',\circ) deux groupes et φ une application de G dans $G' : \varphi : G \rightarrow G'$. On dit que φ est un **morphisme de groupe** (ou simplement un **morphisme**) lorsqu'elle vérifie

$$(1) \quad \varphi(a * b) = \varphi(a) \circ \varphi(b) \quad (a, b \in G)$$

Terminologie...

- (i) Les morphismes sont aussi appelés **homomorphismes**.
- (ii) Lorsque le groupe de départ et le groupe d'arrivée sont les mêmes on parle d'**endomorphisme**.
- (iii) Un morphisme bijectif est un **isomorphisme**.
- (iv) Un isomorphisme de G dans lui-même s'appelle un **automorphisme**.

Si $\varphi : G \rightarrow G'$ est un isomorphisme alors l'application réciproque $\varphi^{-1} : G' \rightarrow G$ (qui existe puisque φ est bijective) est un isomorphisme.

Théorème 1.8. *L'image de l'élément neutre du groupe de départ par un morphisme est l'élément neutre du groupe d'arrivée. $[\varphi(e_G) = e_{G'}]$.*

1. Beaucoup d'auteurs appellent **groupe monogène** ce que nous avons appelé groupe cyclique infini et garde la dénomination de cyclique au seuls groupes finis.

Théorème 1.9. *Par un morphisme l'image du symétrique d'un élément est le symétrique de l'image de cet élément. $[\varphi(g^{-1}) = [\varphi(g)]^{-1}.]$*

Théorème 1.10. *Soient φ un morphisme de G dans G' et H un sous-groupe de G alors $\varphi(H)$ est un sous-groupe de G' . En particulier $\varphi(G)$ est un sous-groupe de G' . $[H \leq G \Rightarrow \varphi(H) \leq G'.]$*

3.2. Morphismes et image des sous-groupes.

Théorème 1.11. *Soient φ un morphisme de G dans G' et H un sous-groupe de G alors $\varphi(H)$ est un sous-groupe de G' . En particulier $\varphi(G)$ est un sous-groupe de G' . $[H \leq G \Rightarrow \varphi(H) \leq G'.]$*

Rappelons que $\varphi(H) \stackrel{\text{def}}{=} \{\varphi(h) : h \in H\}$ et s'appelle l'**image** de H par φ .

3.3. Le noyau. Soit φ un morphisme de $(G,*)$ dans (G',\circ) . On appelle **noyau** de φ et on note $\ker \varphi$ l'ensemble

$$(2) \quad \ker \varphi =_{\text{def}} \{g \in G : \varphi(g) = e_{G'}\}$$

Théorème 1.12. *Le noyau d'un morphisme est un sous-groupe du groupe de départ. $[\ker \varphi \leq G].$*

Théorème 1.13. *Pour qu'un morphisme soit injectif il faut et il suffit que son noyau se réduise à l'élément neutre. $[\varphi : G \xrightarrow{\text{morph.}} G'$ injective $\Leftrightarrow \ker \varphi = \{e_G\}.]$*

Corollaire. *Soient G et G' deux groupes finis de même cardinal et φ un morphisme de G dans G' . Pour que φ soit un isomorphisme il faut et il suffit que $\ker \varphi$ soit réduit à l'élément neutre.*

3.4. Cinq exemples de morphismes.

a)

$$\exp : \begin{array}{ccc} (\mathbb{R}, +) & \longrightarrow & (\mathbb{R}^{*+}, \cdot) \\ x & \longmapsto & \exp x. \end{array}$$

b)

$$\exp : \begin{array}{ccc} (\mathbb{R}, +) & \longrightarrow & (\mathbf{U}, \cdot) \\ x & \longmapsto & \exp ix. \end{array}$$

c)

$$\det : \begin{array}{ccc} \mathbf{GL}_n(\mathbb{K}) & \longrightarrow & (\mathbb{K}^*, \cdot) \\ A & \longmapsto & \det A \end{array}$$

d) Soit (G, \cdot) un groupe et $x \in G$. L'application

$$\phi_x : \begin{array}{ccc} (G, \cdot) & \longrightarrow & (G, \cdot) \\ g & \longmapsto & x^{-1}gx. \end{array}$$

est un automorphisme. Les automorphismes construits de cette manière s'appellent des **automorphismes intérieurs**. L'ensemble des automorphismes intérieurs, noté $\mathbf{Int}(G)$, forme lui-même un groupe lorsqu'on le munit de la loi de composition des applications.

e) Soit $(G,*)$ un groupe quelconque et $g \in G$. L'application suivante est un morphisme de groupe.

$$p_g : \begin{array}{ccc} (\mathbb{Z}, +) & \longrightarrow & (G, *) \\ m & \longmapsto & g^m. \end{array}$$

§ 4. Relation d'équivalence définie par un sous-groupe.

4.1. *Définition.* Soient $(G,*)$ un groupe et H un sous-groupe de G . On définit la relation \mathfrak{R}_H sur G par

$$x \mathfrak{R}_H y \stackrel{\text{def}}{\iff} x^{-1} * y \in H.$$

Théorème 1.14. *La relation \mathfrak{R}_H est une relation d'équivalence sur G .*

Rappelons que la classe d'équivalence de $x \in G$, notée $\mathbf{cl}(x)$ ou \bar{x} ou \dot{x} est l'ensemble des éléments de G qui sont en relation avec x

$$\mathbf{cl}(x) = \{g \in G : x \mathfrak{R}_H g\}.$$

L'ensemble de toutes les classes d'équivalence est noté G/H et est appelé le **quotient** de G par H . Lorsque $y \in \mathbf{cl}(x)$, on dit que y est un **représentant** de $\mathbf{cl}(x)$. On a toujours que x est un représentant de $\mathbf{cl}(x)$ mais, en général, $\mathbf{cl}(x)$ admet beaucoup d'autres représentants.

4.2. *Description des classes d'équivalence (à gauche).* Dans la relation \mathfrak{R}_H définie ci-dessus on a

$$\mathbf{cl}(x) = x * H$$

où $x * H = \{x * h : h \in H\}$.

4.3. *Le théorème de Lagrange.*

Théorème 1.15. *Soit $(G,*)$ un groupe fini et H un sous-groupe de G . Le cardinal de H divise le cardinal de G autrement dit $o(H) | o(G)$.*

Corollaire (de la démonstration). *Sous les mêmes hypothèses, on a plus précisément*

$$\text{card}(G) = \text{card}(G/H) \times \text{card}(H)$$

Corollaire. *Dans un groupe fini, l'ordre de tout élément divise l'ordre du groupe. $[\forall x \in G, o(x) | o(G)]$*

4.4. *Application à la caractérisation des groupes d'ordre premier.*

Théorème 1.16. *Tout groupe d'ordre premier $p > 1$ est cyclique et il est engendré par n'importe lequel de ses éléments différents du neutre. $[\forall x \in G/\{e\}, G = \langle x \rangle]$*

§5. Groupes quotients.

5.1. *Sous-groupes distingués.* Soit $(G,*)$ un groupe et H un sous-groupe de G . On dit que H est **distingué** dans G (ou **normal** dans G , ou encore **invariant**) s'il vérifie la propriété suivante

$$(3) \quad \forall x \in G \quad x^{-1} * H * x \subset H,$$

c'est-à-dire

$$\forall x \in G, \forall h \in H \quad x^{-1} * h * x \in H.$$

En réalité la condition (3) est équivalente à

$$(4) \quad \forall x \in G \quad x^{-1} * H * x = H,$$

qui est en apparence plus forte.

La notation $H \triangleleft G$ signifie que H est un sous-groupe distingué de G . Lorsqu'on n'exclut pas que H soit égal à G on écrit $H \trianglelefteq G$

5.2. *Trois exemples de sous-groupes distingués.*

a) Si $(G,*)$ est abélien alors n'importe lequel de ses sous-groupes est distingué dans G .

b) Si φ est un morphisme de $(G,*)$ dans (T,\circ) alors $\ker \varphi$ est un sous-groupe distingué de G . [$\ker \varphi \trianglelefteq G$.]

c) Soit $H = \{\lambda Id : \lambda \in \mathbb{R}^*\}$ où Id est la matrice identité dans $\mathbf{GL}_n(\mathbb{R})$. On a $H \trianglelefteq \mathbf{GL}_n(\mathbb{R})$.

5.3. *Compatibilité de \mathfrak{R}_H avec la loi de G lorsque $H \trianglelefteq G$.* Soit $(G,*)$ un groupe et $H \trianglelefteq G$. La relation d'équivalence \mathfrak{R}_H définie par le sous-groupe distingué H a la propriété remarquable d'être **compatible** avec la loi $*$. Cela signifie que, pour $g_1, g_2, r_1, r_2 \in G$,

$$\left. \begin{array}{l} g_1 \mathfrak{R}_H g_2 \\ r_1 \mathfrak{R}_H r_2 \end{array} \right\} \Rightarrow g_1 * r_1 \mathfrak{R}_H g_2 * r_2.$$

5.4. *Opération sur l'ensemble des classes. Groupe quotient. Projection canonique.* Soit $(G,*)$ un groupe et H un sous-groupe distingué de G . On rappelle que G/H désigne l'ensemble des classes d'équivalence de \mathfrak{R}_H . On peut définir une loi $\bar{*}$ sur G/H comme suit

$$(5) \quad \bar{*} : \begin{array}{ccc} G/H \times G/H & \longrightarrow & G/H \\ (\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2) & \longmapsto & \mathbf{cl} \left(\begin{array}{c} \text{n'importe quel} \\ \text{représentant de } \mathcal{C}_1 \end{array} * \begin{array}{c} \text{n'importe quel} \\ \text{représentant de } \mathcal{C}_2 \end{array} \right) \end{array}$$

Théorème 1.17. *Soit $(G,*)$ un groupe et $H \trianglelefteq G$, $(G/H, \bar{*})$ est un groupe.*

Théorème 1.18. Soit $(G, *)$ un groupe et $H \trianglelefteq G$. L'application s définie par

$$s : \begin{array}{ccc} (G, *) & \longrightarrow & (G/H, \bar{*}) \\ x & \longmapsto & \mathbf{cl}(x). \end{array}$$

est un morphisme de groupe. Il est surjectif. Son noyau est égal à H .

Le morphisme s s'appelle la **surjection** (ou **projection**) **canonique** de G sur G/H . On note parfois $s = s_H$.

5.5. Le groupe $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$. Définition. Propriétés élémentaires.

Théorème 1.19. Soit $n > 1$ et $a \in \mathbb{N}$. Pour que $\bar{a} = \mathbf{cl}(a)$ engendre $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ (i.e. $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} = \langle \bar{a} \rangle$) il faut et il suffit que a et n soient premiers entre eux.

5.6. Théorème d'isomorphisme.

Théorème 1.20. Soient G_1 et G_2 deux groupes et ϕ un homomorphisme de G_1 dans G_2 . Il existe un isomorphisme ν de $G_1/\ker \phi$ sur $\phi(G_1)$ tel que $\phi = \nu \circ s$ où s est la surjection canonique de G_1 sur $G_1/\ker \phi$. On a donc

$$G_1/\ker \phi \simeq \phi(G_1).$$

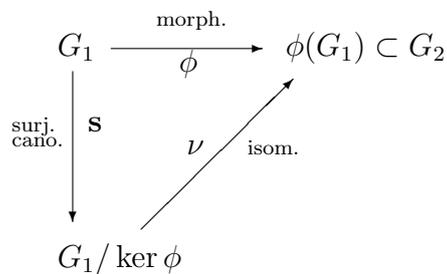


FIG. 1. Schéma du théorème d'isomorphisme $\phi = \nu \circ s$

5.7. Trois exemples d'application du théorème d'isomorphisme.

- $\mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z} \simeq \mathbf{U}$.
- $\mathbf{GL}_n(\mathbb{K})/\mathbf{SL}_n(\mathbb{K}) \simeq \mathbb{K}^*$.
- Tout groupe cyclique fini d'ordre n est isomorphe à $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$.

§ 6. Le groupe symétrique.

6.1. *Définitions.* Soit $\Omega = \{1, 2, \dots, n\}$. Une bijection de Ω sur Ω s'appelle une **permutation**. L'ensemble des permutations de Ω est noté \mathbf{S}_n . un élément f de \mathbf{S}_n est souvent représenté sous la forme d'un tableau à 2 lignes et n colonnes :

$$f = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & i_3 & \dots & n \end{pmatrix}$$

où la seconde ligne donne les images des éléments correspondant sur la première ligne. On munit \mathbf{S}_n de la loi de composition des applications que l'on note cependant ici par un point (\cdot) plutôt que par \circ .

Théorème 1.21. (\mathbf{S}_n, \cdot) est un groupe (non commutatif dès que $n > 2$) d'ordre $n!$.

(\mathbf{S}_n, \cdot) s'appelle le $(n$ -ième) **groupe symétrique**.

6.2. *Cycles.* Soit $f \in \mathbf{S}_n$. S'il existe $k \in \{2, \dots, n\}$ et a_1, a_2, \dots, a_k dans Ω tels que

$$\begin{cases} f(a_i) = a_{i+1} & i = 1, \dots, k-1 \\ f(a_k) = a_1 \\ f(b) = b & b \notin \{a_1, \dots, a_k\} \end{cases},$$

autrement dit, si f est de la forme

$$\left(\boxed{\text{Id}} \begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \end{array} \boxed{\text{Id}} \begin{array}{c} a_2 \\ a_3 \end{array} \boxed{\text{Id}} \dots \boxed{\text{Id}} \begin{array}{c} a_{k-1} \\ a_k \end{array} \boxed{\text{Id}} \begin{array}{c} a_k \\ a_1 \end{array} \right)$$

alors on dit que f est un **cycle**, ou, plus précisément un **k -cycle** et on note

$$f = (a_1 a_2 \dots a_k).$$

Les 2-cycles sont appelés **transpositions**. L'ensemble $\{a_1, \dots, a_k\}$ s'appelle le **support** du cycle f .

Théorème 1.22. Si deux cycles ont des supports disjoints alors ils commutent. De manière précise, si $\{a_1, \dots, a_k\} \cap \{b_1, \dots, b_r\} = \emptyset$ alors

$$(a_1 a_2 \dots a_k) \cdot (b_1 b_2 \dots b_r) = (b_1 b_2 \dots b_r) \cdot (a_1 a_2 \dots a_k).$$

Théorème 1.23. Si f est un k -cycle alors f est d'ordre k (c-a-d $f^k = \text{Id}$ et $f^{k-1} \neq \text{Id}$.)

Théorème 1.24. Toute permutation se décompose en un produit de cycles. Cette décomposition est unique à l'ordre près des facteurs.

On a les propriétés suivantes :

$$\begin{aligned} (a_1 a_2 a_3 \dots a_k) &= (a_1 a_2) \cdot (a_2 a_3) \dots (a_{k-1} a_k) \\ (a_1 a_2) &= (1 a_1) \cdot (1 a_2) \cdot (1 a_1). \end{aligned}$$

6.3. *Signature.* Soit $f \in \mathbf{S}_n$. On définit $\epsilon(f)$ par la relation

$$\epsilon(f) = \prod_{1 \leq i < j \leq n} \frac{f(j) - f(i)}{j - i}.$$

Quelle que soit f , on a toujours $\epsilon(f) \in \{-1, 1\}$. le nombre $\epsilon(f)$ s'appelle la **signature** de f .

Théorème 1.25. *Si $f = (1\ k)$ alors $\epsilon(f) = -1$.*

Théorème 1.26. *L'application $\epsilon : (\mathbf{S}_n, \cdot) \rightarrow (\{-1, 1\}, \cdot)$ est un morphisme de groupe. Autrement dit, quelles que soient f et g dans \mathbf{S}_n on a*

$$\epsilon(f \cdot g) = \epsilon(f) \cdot \epsilon(g).$$

Corollaire. *La signature d'une transposition quelconque est égale à -1*

Corollaire. *La signature d'un cycle de longueur k est égale à $(-1)^{k-1}$.*

Corollaire. *L'ensemble $A_n := \{f \in \mathbf{S}_n : \epsilon(f) = 1\}$ est un sous-groupe distingué de \mathbf{S}_n . On l'appelle le n -ième **groupe alterné**.*

2. INTRODUCTION AUX ANNEAUX ET CORPS

§1. La structure d'anneau.

1.1. *Définitions.* Un ensemble non vide A muni de deux lois internes — que l'on notera toujours, pour simplifier, $+$ et \cdot — est un **anneau** si

- (i) $(A, +)$ est un groupe commutatif,
- (ii) la loi \cdot est associative et elle est **distributive** par rapport à la loi $+$, c-a-d

$$\forall x, y, z \in A \quad \begin{cases} x \cdot (y + z) = (x \cdot y) + (x \cdot z) \\ (y + z) \cdot x = (y \cdot x) + (z \cdot x) \end{cases}.$$

On parle alors de l'anneau $(A, +, \cdot)$. La loi $+$ est appelée **l'addition** de A et la loi \cdot est appelée le produit (ou **la multiplication**) de A . L'élément neutre de $(A, +)$ est toujours noté 0 — ou, s'il faut être précis, 0_A — et le symétrique de $x \in A$ pour la loi $+$ est noté $-x$. On rappelle que la notation $y - x$ signifie $y + (-x)$.

Théorème 2.1. *Soit $(A, +, \cdot)$ un anneau.*

- (i) $\forall a \in A, a \cdot 0 = 0 = 0 \cdot a$. (On dit parfois que le neutre de la loi $+$ est un élément **absorbant**.)
- (ii) $\forall a, b \in A, (-a) \cdot b = a \cdot (-b) = -(ab)$.

1.2. *Différents types d'anneaux.* Anneaux commutatifs, anneaux unitaires, anneaux intègres.

1.3. *Sous-anneaux.* Soit $(A, +, \cdot)$ un anneau et B un sous-ensemble non vide de A , B est un **sous-anneau** de A si

- (i) $\forall a, b \in B, a - b \in B$
- (ii) $\forall a, b \in B, a \cdot b \in B$.

1.4. *Trois exemples d'anneaux.*

- a) $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ est un anneau commutatif, unitaire et intègre.
- b) $(M_n(\mathbb{K}), +, \cdot)$ ($\mathbb{K} = \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$) est un anneau unitaire non commutatif et non intègre.
- c) Soient I un intervalle de \mathbb{R} et $\mathcal{F}(I)$ l'ensemble des fonctions définies sur I à valeurs réelles alors $(\mathcal{F}(I), +, \cdot)$ est un anneau commutatif unitaire non intègre. (Ici les lois $+$ et \cdot sont l'addition et le produit habituel des fonctions.) L'ensemble $\mathcal{C}(I)$ des fonctions continues sur I est un sous-anneau de $\mathcal{F}(I)$.

1.5. *Morphismes d'anneaux.* Soient $(A, +, \cdot)$ et $(B, +, \cdot)$ deux anneaux et f une application de A dans B . On dit que f est un **morphisme d'anneau** si

- (i) $\forall a, a' \in A, f(a + a') = f(a) + f(a')$,
- (ii) $\forall a, a' \in A, f(a \cdot a') = f(a) \cdot f(a')$,

Attention, lorsque A et B sont *unitaires*, on rajoute la condition

- (iii) $f(1_A) = 1_B$,

Pour qu'un morphisme d'anneau soit injectif, il faut et il suffit que son noyau soit réduit au neutre 0_A .

§ 2. Elements inversibles d'un anneau unitaire. Corps.

2.1. *Le groupe des éléments inversibles.* Soit $(A, +, \cdot)$ un anneau unitaire. Un élément $a \in A$ est dit inversible s'il existe $b \in A$ tel que

$$a \cdot b = b \cdot a = 1.$$

Cet élément b , s'il existe, est unique. On le note a^{-1} . Il y a toujours au moins un élément inversible, le neutre 1 lui-même, pour lequel $1^{-1} = 1$. On note A^* l'ensemble des éléments inversibles de l'anneau A . Naturellement, puisque $(a^{-1})^{-1} = a$, si $a \in A^*$ alors $a^{-1} \in A^*$.

Théorème 2.2. *L'ensemble A^* des éléments inversibles d'un anneau unitaire $(A, +, \cdot)$ est un groupe lorsqu'on le munit de la loi \cdot .*

2.2. *Définition d'un corps.* Un anneau unitaire $(F, +, \cdot)$ tel que $1_F \neq 0_F$ pour lequel $F^* = F/\{0_F\}$ s'appelle un **corps**.

Une partie non vide L de F est un **sous-corps** de F si

- (i) $\forall x, y \in L, x - y \in F$
- (ii) $\forall x, y \in L/\{0\}, x \cdot y^{-1} \in F$

Isomorphismes de corps...

Dans un *corps commutatif* on écrit souvent $\frac{a}{b}$ à la place de $a.b^{-1}$. On a alors les règles de calcul suivantes :

- (i) $\frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{a \cdot c}{b \cdot d}$
- (ii) $\frac{a}{b} + \frac{c}{d} = \frac{ad+bc}{bd}$

2.3. *Exemples de corps.*

§ 3. L'anneau $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$.

3.1. *Construction.* Définition du produit sur $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$.

Théorème 2.3. *Quel que soit $n \in \mathbb{N}$, $n \geq 2$, $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +, \cdot)$ est un anneau commutatif unitaire.*

3.2. *Le cas premier.*

Théorème 2.4. *Quel que soit $p \in \mathbb{N}$, p premier, $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}, +, \cdot)$ est un corps commutatif.*

3.3. *Application à l'arithmétique.*

Théorème 2.5 (Petit théorème de Fermat). *Soient p premier et $a \in \mathbb{Z}$ tel que $p \nmid a$. On a toujours*

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}.$$

Autrement dit p divise toujours $a^{p-1} - 1$ dès lors qu'il ne divise pas a .

§ 4. Idéaux d'un anneau commutatif. Anneaux quotient.

4.1. *Définition.*

4.2. *Exemple : idéaux principaux.*

Théorème 2.6. *$(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ est un anneau principal.*

4.3. *Exemple : noyau des morphismes.*

4.4. *Anneaux quotients.* Soit $(A, +, \cdot)$ un anneau commutatif et I un idéal de A . Puisque, en particulier, I est un sous-groupe de $(A, +)$, on peut former le groupe quotient A/I (il faut que I soit un sous-groupe distingué mais puisque $(A, +)$ est commutatif, tous ses sous-groupes sont distingués). Les éléments de A/I sont de la forme $\mathcal{C} = \mathbf{cl}(a) = a + I = \{a + h : h \in I\}$ et la loi $+$ (précédemment notée $\bar{+}$) sur A/I vérifie

$$\mathbf{cl}(a) + \mathbf{cl}(b) = \mathbf{cl}(a + b)$$

et plus généralement

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{C}_1 + \mathcal{C}_2 & = & \mathbf{cl} \left(\begin{array}{c} \text{n'importe quel} \\ \text{représentant de } \mathcal{C}_1 \end{array} + \begin{array}{c} \text{n'importe quel} \\ \text{représentant de } \mathcal{C}_2 \end{array} \right) \\ \uparrow & & \nearrow \\ \text{loi + dans } A/I & & \text{loi + dans } A \end{array}$$

Nous allons voir que grâce au fait que I est un idéal, on peut aussi définir un produit sur A/I comme suit

$$\begin{aligned} A/I \times A/I &\longrightarrow A/I \\ \cdot : (\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2) &\longmapsto \mathbf{cl} \left(\begin{array}{c} \text{n'importe quel} \\ \text{représentant de } \mathcal{C}_1 \end{array} \cdot \begin{array}{c} \text{n'importe quel} \\ \text{représentant de } \mathcal{C}_2 \end{array} \right). \end{aligned}$$

Théorème 2.7. *Soit $(A, +, \cdot)$ un anneau commutatif et I un idéal de A alors $(A/I, +, \cdot)$ où $+$ et \cdot sont définies comme ci-dessus est un anneau commutatif. Si A est unitaire alors A/I est aussi unitaire et on a $1_{A/I} = \mathbf{cl}(1_A)$.*

Théorème 2.8. *Soient $(A, +, \cdot)$ et $(B, +, \cdot)$ deux anneaux commutatifs et $f : A \rightarrow B$ un morphisme d'anneaux. Il existe un (unique) isomorphisme $\gamma : A/\ker f \rightarrow f(A)$ tel que $f = \gamma \circ s$ où s est la surjection canonique de A sur $A/\ker f$. On a donc*

$$\frac{A}{\ker f} \simeq f(A).$$

§5. Anneaux de Polynômes.

5.1. *Définitions.* Construction (par les suites à support fini) de $A[X]$, A étant un anneau commutatif unitaire. Définition de X . Addition et produit des polynômes. Calcul de X^n .

Théorème 2.9. *Soit $P \in A[X]$. Il existe $n \in \mathbb{N}$ et des éléments $a_0, a_1, \dots, a_n \in A$ tels que P s'écrive*

$$P = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n = \sum_{i=0}^n a_iX^i.$$

De plus si

$$P = \sum_{i=0}^n a_iX^i \quad \text{et} \quad P = \sum_{i=0}^m b_iX^i$$

sont deux écritures de $P \in A[X]$, avec disons $n \leq m$, alors nécessairement

$$a_i = b_i \text{ pour } 0 \leq i \leq n \text{ et } b_i = 0_A \text{ pour } n < i \leq m.$$

Cela signifie que, si on enlève les termes nuls inutiles, l'écriture $P = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n$ est unique.

Théorème 2.10. *Soit $(A, +, \cdot)$ un anneau commutatif unitaire. $(A[X], +, \cdot)$ est un anneau commutatif unitaire avec $0_{A[X]} = 0_A$ et $1_{A[X]} = 1_A$.*

Monômes, coefficients, coefficient dominant (dom), degré (deg).

Si $P, T \in A[X]$ $\deg(P + T) \leq \max(\deg(P), \deg(Q))$ et l'égalité a lieu à moins que P et Q soient de même degré et que $\text{dom}(P) = -\text{dom}(Q)$.

Théorème 2.11. *Si l'anneau commutatif unitaire A est intègre alors $A[X]$ est aussi intègre et on a*

$$(6) \quad \deg(PT) = \deg(P) + \deg(T).$$

Avec la convention $\deg(0) = -\infty$, la formule (6) ci-dessus reste vraie lorsque $P = 0$ ou $Q = 0$.

5.2. *Polynômes et fonctions polynomiales.* Soit A un anneau commutatif unitaire. A tout polynôme $P \in A[X]$, $P = a_0 + a_1X + \cdots + a_nX^n$, on fait correspondre une fonction polynomiale $\tilde{P} : A \rightarrow A$ définie par

$$(\forall t \in A) \quad \tilde{P}(t) = a_0 + a_1t + \cdots + a_nt^n.$$

Par exemple, au polynôme nul $P = 0$ correspond la fonction constante nulle et au polynôme $P = X$ correspond la fonction identité de A . Notant $\mathcal{F}(A)$ l'anneau des fonctions de A dans A . L'application

$$F_A : \begin{array}{ccc} A[X] & \longrightarrow & \mathcal{F}(A) \\ P & \longmapsto & \tilde{P} \end{array}$$

est un morphisme d'anneau.

On note souvent $P(t)$ plutôt que $\tilde{P}(t)$. C'est un raccourci auquel il faut prendre garde.

5.3. *Division euclidienne des polynômes.*

Théorème 2.12. *Soient A un anneau commutatif unitaire intègre et $P \in A[X]$ un polynôme dont le coefficient dominant est inversible (i.e. $\text{dom}(P) \in A^*$). Quel que soit $T \in A[X]$, il existe un et un seul couple de polynômes (Q, R) tels que*

$$\begin{cases} \deg R < \deg P \\ T = QP + R \end{cases}.$$

On dit que Q est le **quotient** de la division euclidienne de T par P et R est le **reste**.

Exemple de division.

5.4. *L'anneau principal $\mathbb{K}[X]$.*

Théorème 2.13. *Si \mathbb{K} est un corps alors l'anneau $\mathbb{K}[X]$ est principal.*

5.5. *Racines des polynômes.* Soit A un anneau commutatif unitaire intègre et $P \in A[X]$. On dit qu'un élément $a \in A$ est un **zéro** de P (ou bien une **racine** de P) si $P(a) = 0$ autrement dit, plus précisément, si la fonction polynomiale \tilde{P} associée à P s'annule en a .

Théorème 2.14. *Pour que a soit racine de P il faut et il suffit que le polynôme $X - a$ divise P , c'est-à-dire qu'il existe $Q \in A[X]$ tel que $P = (X - a)Q$.*

Le théorème précédent suggère de définir la multiplicité d'une racine de la manière suivante. On dit que a est une racine (un zéro) **d'ordre k (de multiplicité k)** lorsque $(X - a)^k$ divise P (i.e. $P = (X - a)^k Q$ pour un certain $Q \in A[X]$) mais $(X - a)^{k+1}$ ne divise pas P .

Théorème 2.15. *Soient A un anneau commutatif unitaire et $P \in A[X]$. Si A est intègre et si a_1, a_2, \dots, a_r sont des zéros de P alors*

$$P = (X - a_1)^{k_1} (X - a_2)^{k_2} \dots (X - a_r)^{k_r} Q$$

où k_i est la multiplicité de a_i ($1 \leq i \leq r$) et aucun des a_i n'est racine de $Q \in A[X]$.

Corollaire. *Si A est un anneau (commutatif unitaire) intègre alors tout polynôme $P \in A[X]$ non nul admet au plus $\deg(P)$ racines en tenant compte de la multiplicité. Autrement dit si P admet m racines a_i ($i \in \{1, 2, \dots, m\}$) chacune de multiplicité s_i alors on a nécessairement $s_1 + s_2 + \dots + s_m \leq \deg(P)$.*

Ce résultat n'est plus vrai si A n'est pas supposé intègre.

Corollaire. *Si A est un anneau commutatif unitaire intègre de cardinal infini alors l'application F_A qui a tout polynôme fait correspondre sa fonction polynomiale associée est injective.*

§ 6. **Le corps des fractions d'un anneau intègre.** Soit A un anneau (commutatif unitaire) intègre. On note $A^0 =_{def} A/\{0_A\}$. Sur l'ensemble $(A \times A^0)$ on définit la relation \mathfrak{R} par

$$(a, b)\mathfrak{R}(c, d) \stackrel{def}{\iff} ad - bc = 0.$$

Le relation \mathfrak{R} est une relation d'équivalence. La classe d'équivalence d'un élément $(a, b) \in A \times A^0$ est notée $\frac{a}{b}$, $Q(A)$ désigne l'ensemble de toutes les classes d'équivalence, i.e.

$$Q(A) =_{def} \left\{ \frac{a}{b} : a \in A, b \in A^0 \right\}.$$

Sur $Q(A)$ on montre qu'on peut définir de manière consistante les deux lois $+$ et \cdot comme suit

$$\frac{a}{b} + \frac{c}{d} =_{def} \frac{ad + bc}{bd} \quad \text{et} \quad \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} =_{def} \frac{ac}{bd}.$$

Théorème 2.16. $(Q(A), +, \cdot)$ est un corps commutatif avec $0_{Q(A)} = \frac{0}{1}$ et $1_{Q(A)} = \frac{1}{1}$. De plus A devient un sous-anneau de $Q(A)$ si l'on identifie tout élément $a \in A$ avec $\frac{a}{1} \in Q(A)$. Le corps $Q(A)$ s'appelle le **corps des fractions** de l'anneau intègre A .

Exemple. Corps des fractions rationnelles.

LABORATOIRE DE MATHÉMATIQUES E. PICARD, UNIVERSITÉ PAUL SABATIER
31062 TOULOUSE CEDEX 4 FRANCE.

E-mail address: calvi@picard.ups-tlse.fr