

Structures Algebriques

David Wiedemann

Table des matières

1	Preuves	4
1.0.1	Proprietes de preuves formelles	4
1.1	Ensembles	6
2	Applications entre ensembles	7
2.1	Relations d'equivalence	9
2.2	Cardinal d'un ensemble	10
3	Theorie des nombres	13
3.1	Algorithme d'Euclide	13
3.2	Theoreme fondamental de l'arithmetique	14
4	Théorie des Groupes	16
4.1	Groupe symétrique de n	16
4.2	Construction de Groupes avec des quotients	18
4.2.1	Recette générale	18
4.3	Produits de Groupes	21
4.4	Produits de Groupes	21
4.5	Propriété universelle des Produits	22
4.6	Sous-groupes	24
4.7	L'homomorphisme sgn	26
4.8	Theoreme de Lagrange	28
4.9	Groupes diedraux	35
4.10	Sous-groupes engendres par plusieurs elements	36

List of Theorems

1	Definition (division d'entiers)	5
1	Proposition (Division avec reste)	5
2	Proposition (Paradoxe de Russel)	6

2	Definition (Formalisation des applications)	7
4	Proposition (Surjectivite de la composition)	8
3	Definition (Relations d'equivalence)	9
4	Definition (Classes d'equivalence)	10
5	Definition (L'ensemble quotient)	10
6	Definition (Cardinal d'un ensemble)	10
8	Theorème (Cantor-Schroeder-Bernstein)	11
9	Lemme	11
7	Definition	13
10	Lemme	13
8	Definition (Algorithme d'Euclide)	13
11	Lemme	14
12	Lemme	14
9	Definition (Entier)	14
13	Lemme	15
14	Proposition	15
15	Theorème	15
16	Proposition	17
10	Definition (Homomorphismes de groupes)	20
21	Lemme	20
11	Definition	21
23	Lemme	22
24	Proposition	22
12	Definition (Sous-Groupe)	24
25	Proposition	24
13	Definition	25
27	Proposition	25
28	Proposition	26
29	Proposition	26
30	Proposition	27
14	Definition (sgn)	27
31	Lemme	27
32	Corollaire	28
15	Definition	28
34	Lemme	28
35	Proposition	29
36	Theorème (Lagrange)	30
37	Corollaire	30
16	Definition	30
38	Corollaire	30
39	Theorème (Petit theoreme de Fermat)	30

17	Definition	31
18	Definition (Groupe simple)	31
40	Proposition	32
41	Theorème	32
42	Theorème	32
44	Theorème	33
45	Corollaire	34
46	Corollaire	34
47	Corollaire	34
48	Corollaire	34
49	Corollaire	35
19	Definition (Graphe nonorienté)	35
20	Definition (Isomorphismes des graphes)	35
21	Definition (Groupe diedral)	35
51	Lemme	36

Lecture 1: Introduction

Tue 15 Sep

Parties

- preuves et ensembles
- Theorie des nombres
- Theorie des groupes

1 Preuves

Une grande partie du bachelor est de faire des preuves, il est donc important de comprendre quand une preuve est correcte.

Il y a deux types de preuves :

- Preuves formelles
Tres precise, mais difficile a lire.
- Preuves d'habitude
Approximation des preuves formelles, en remplaçant qqes parties par du texte "humain". Il faut s'assurer qu'on peut traduire cette preuve en preuve formelle.

1.0.1 Proprietes de preuves formelles

- Elles utilisent seulement des signes/symboles mathematiques.
 - \exists (existe)
 - \forall (pour tout)
 - $\exists!$ (existe unique)
 - \wedge (et)
 - \vee (ou)
 - \neg (non)
 - \Rightarrow (implique)
 - etc

- Elle consiste de lignes, et il y a des regles strictes que ces lignes doivent suivre.
- Regles
 - Axiomes
 - Propositions qu'on a deja montrees.
 - Tautologies
- Exemples

$$\neg(A \vee B) \iff ((\neg A) \vee (\neg B))$$

- Modus Ponens : Si on a que

$$\begin{cases} A \Rightarrow B \\ A \end{cases}$$

Alors B est vrai ¹

Dans ce cours 0 n'est ni positif, ni negatif.

Definition 1 (division d'entiers)

q divise a ($q|a$) si il existe un entier r tel que $a = q \cdot r$.

Proposition 1 (Division avec reste)

$a, q \neq 0$ entiers non-negatifs,

$\Rightarrow \exists$ entiers non-negatifs

b et r t.q.

$$a = b \cdot q + r$$

et

$$r < q$$

Preuve

Unicite Supposons que $\exists b, r, b', r'$ entiers non-negatifs et $r < q$ et $r' < q$.

$$a = bq + r$$

$$a = b'q + r'$$

Alors

$$\underbrace{(b - b')}_{{-q, 0, q}} q = \underbrace{r' - r}_{{-q < r' - r < q}}$$

1. Pour lire plus, regarder "Calcul des predicats" sur wikipedia

$$\Rightarrow r' - r = 0$$

$$(b - b')q = 0 \Rightarrow b = b'$$

Existence

Par induction sur a .

- $a = 0 \Rightarrow b = 0$ et $r = 0$

0 supposons que on connait l'existence pour a remplace par $a - 1$. Alors, $\exists c, s$ tq

$$a - 1 = cq + s$$

$$s < q$$

Alors, soit $s < q - 1$

$$a = (a - 1) + 1$$

$$= cq + s + 1$$

Alors on peut dire que $s + 1 = r$. Sinon $s = q - 1$

$$a = (a - 1) + 1$$

$$= cq + \underbrace{s + 1}_{=q}$$

$$= (c + 1) \cdot q + 0$$

□

1.1 Ensembles

Premiere approche :

ensemble = { collection de choses }

Exemple :

$$\underbrace{\{\{\{\emptyset\}, \emptyset\}\emptyset\}}_A$$

$$\Rightarrow A \in A$$

Proposition 2 (Paradoxe de Russel)

$$B = \{A \text{ est un ensemble} | A \in A\}$$

peut pas etre un ensemble.

Preuve

Supposons que B est un ensemble et $B \subset B \iff B \not\subset B \iff B \subset B \dots$ □

Question :

Alors, qui sont les ensembles? Reponse :

Axiome de Zermelo-Fraenkel

Quelques exemples de Zermelo-Fraenkel

1) et 2) impliquent que \emptyset est un ensemble.

2) A ensemble, $E(x)$ expression $\rightarrow \{a \in A | E(a) \text{ vrai}\}$ 3) A_i ensembles ($i \in I$)

$$\rightarrow \bigcup_{i \in I} A_i$$

est un ens. 4)...

5) axiome de l'ensemble puissance

A ensemble

$$\rightarrow 2^A = \{B \subseteq A | B \text{ sous-ens. de } A\}$$

Exemple : $\{0, 1\} = A$

$$2^A = \{\emptyset, \{0\}, \{1\}, \{0, 1\}\}$$

6) A_i ensembles ($i \in I$) \rightarrow on peut choisir $a_i \in A_i$ a la meme fois

7) etc...

Consequences 1) Les ensembles finis existent.

(i) \emptyset

(ii) $\{\emptyset\}$

...

2) $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$ est un ensemble 3) $\mathbb{Z} = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$

4) $2 \cdot \mathbb{N} = \{x \in \mathbb{N} | 2|x\}$ 5) $A \subseteq B$

Alors on peut definir la difference

$$B \setminus A = \{x \in B | x \notin A\}$$

6) $A, B \subseteq C$

$$A \cap B = \{x \in C | x \in A, x \in B\}$$

Lecture 2: Applications entre ensembles

Tue 22 Sep

2 Applications entre ensembles

Plus complet dans les notes de cours.

Definition 2 (Formalisation des applications)

Soit A, B deux ensembles, alors

$$\phi : A \rightarrow B$$

On la définit comme un sous-ensemble du produit cartésien :

$$\Gamma_\phi \subseteq A \times B$$

$$\forall a \exists ! b : (a, b) \in \Gamma_\phi$$

Une manière de penser d'une application est comme une machine qui prend a et qui sort b , la machine aura un fonctionnement déterministe.

Propriété 3 (Propriété des applications)

Soit $\phi : A \rightarrow B$

1. *injective* :

$$\phi(a) = \phi(b) \iff a = b$$

2. *surjective*

$$\forall b \in B \exists a : \phi(a) = b$$

3. *bijective* \iff *injective et surjective*

L'inverse

$$\phi^{-1} : B \rightarrow A \iff \phi(a) = b$$

4. *Image*

$$\phi(A) = \{\phi(a) | a \in A\} \subseteq B$$

5. $\phi : A \rightarrow B, \xi : B \rightarrow C$, alors

$$(\xi \circ \phi)(a) = \xi(\phi(a))$$

L'ordre est étrange.

Proposition 4 (Surjectivité de la composition)

(i) ξ *surjectif*

(ii) ϕ *pas nécessairement* \iff *il existe un contre exemple.*

Preuve

(i) $\forall c \in C : \exists a : \xi(\phi(a)) = c$

Donc $\exists b := \phi(a) \Rightarrow \xi(b) = c$

(ii)

□

2.1 Relations d'équivalence

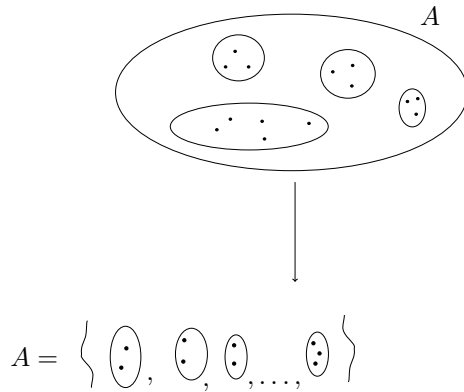


FIGURE 1 – schema relation d'équivalence

Definition 3 (Relations d'équivalence)

Une relation d'équivalence de A est un sous ensemble du produit $R \subseteq A \times A$ tq.

1. (identite) $\forall a \in A : (a, a) \in R$
2. (reflexivite) : $(a, b) \in R \iff (b, a) \in R$
3. (transitivite) : $(a, b) \in R, (b, c) \in R \Rightarrow (a, c) \in R$.

Exemple (Exemple de transitivite)

$A = \mathbb{Z}$, alors :

$$R \subseteq \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} : (a, b) \in R \iff m|a - b$$

$$1. (a, a) \in R : m|a - a.$$

$$2. (a, b) \in R \Rightarrow (b, a) \in R$$

$$\Rightarrow m|a - b \quad m|b - a = -(a - b)$$

Ce qui est équivalent.

$$3. (a, b) \in R, (b, c) \in R \Rightarrow (a, c) \in R$$

$$m|a - b, m|b - c \Rightarrow m|(a - b) + (b - c) = a - c$$

Definition 4 (Classes d'équivalence)

Soit $R \subseteq A \times A$ rel. d'équivalence. et $a \in A$.

La classe d'équivalence de a est

$$R_a = \{b \in A | (a, b) \in R\}$$

Definition 5 (L'ensemble quotient)

L'ensemble quotient de R :

$$A/R = \{R_a | a \in A\} \subseteq 2^A$$

Exemple (Cas de relation d'équivalence)

$m = 3$ et R la relation d'équivalence précédente.

$$A = \mathbb{Z} = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$$

Alors :

$$R \supseteq (0, 3)$$

$$(1, 4)$$

$$(1, 7)$$

$$(11, 8)$$

$$R_a = \{b \in A | (a, b) \in R\} = \{b \in \mathbb{Z} | 3 | a - b\} \text{ Pour le cas } a = 1, \text{ on a :}$$

$$R_1 = \{\dots, -5, -2, 1, 4, 7, \dots\} = 1 + 3\mathbb{Z}$$

$$R_0 = 3\mathbb{Z}$$

$$R_2 = \{\dots, -4, -1, 2, 5, \dots\}$$

$$A/R = \{3\mathbb{Z}, 3\mathbb{Z} + 1, 3\mathbb{Z} + 2\}$$

En general, pour m arbitraire

$$A/R = \{m\mathbb{Z}, m\mathbb{Z} + 1, \dots, m\mathbb{Z} + (m - 1)\}$$

2.2 Cardinal d'un ensemble

La question generale est : comment mesure-t'on la taille d'un ensemble (meme pour des ensembles infinis) ?

Definition 6 (Cardinal d'un ensemble)

1. A et B ont le meme cardinal si il existe $\phi : A \rightarrow B$ bijection, on note $|A| = |B|$

2. A a un cardinal plus petit que B si \exists une injection

$$\psi : A \hookrightarrow B$$

On note $|A| \leq |B|$.

Par exemple, il n'existe pas de bijection de \mathbb{Z} à \mathbb{R} , par contre il existe une injection $\mathbb{Z} \hookrightarrow \mathbb{R}$ donc $|\mathbb{Z}| < |\mathbb{R}|$. On dit que $|\mathbb{Z}| = \omega_0 = \aleph_0$ et on note $|R| = \kappa$

Exemple

On veut montrer que $|\mathbb{N}| = |\mathbb{Z}|$ et

$$\phi : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$$

$$\phi : \begin{array}{l} 0 \leq x \mapsto 2x \\ 0 > x \mapsto -2x - 1 \end{array}$$

Devoir : montrer que ϕ est une bijection.

Theorème 8 (Cantor-Schroeder-Bernstein)

$|A| \leq |B|, |B| \leq |A|$ alors $|A| = |B|$. Autrement dit :

$$f : A \hookrightarrow B, B \hookrightarrow A \Rightarrow \exists \text{bij} A \mapsto B$$

Lemme 9

Si il existe

$$X \subseteq A$$

$$X = A \setminus g(B \setminus f(X))$$

Ou g et f sont des injections.

Alors il existe une bijection $A \mapsto B$

Preuve

$$Y_A := A \setminus X = g(Y)$$

$$X_B = f(X)$$

$$Y = B \setminus f(x)$$

Union disjointe $B = Y \sqcup X_B$

□

Preuve

$f : A \hookrightarrow B$ et $g : B \hookrightarrow A$.

Il faut : X tq :

$$X = A \setminus g(B \setminus f(x)) = H(X)$$

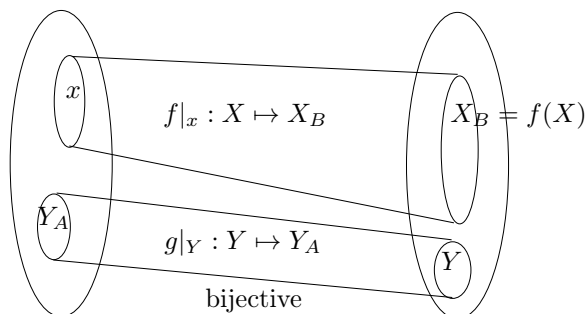


FIGURE 2 – preuve fonction bizarre

$$X \subseteq Z \Rightarrow f(X) \subseteq f(Z)$$

$$\Rightarrow B \setminus f(x) \supseteq B \setminus f(Z)$$

$$\Rightarrow g(B \setminus f(x)) \supseteq g(B \setminus f(Z))$$

$$\Rightarrow A \setminus g(B \setminus f(x)) \supseteq g(B \setminus f(Z))$$

$$\Rightarrow A \setminus g(B \setminus f(Z)) \subseteq A \setminus g(B \setminus f(x))$$

$$\Rightarrow H(X) \subseteq H(Z)$$

□

Soit $W = \bigcap_{X \subseteq A, H(X) \subseteq X} X$ Lire les notes pour voir que $W = H(W)$

Lecture 3: mardi

Preuve

Tue 29 Sep

C'est suffisant de montrer que

$$H(W) = W$$

On montre la double inclusion \subset :

$W \subseteq \bigcap_{x \subseteq A, H(x) \subseteq x} X$, alors

$$\begin{aligned} H(W) &\subseteq \bigcap_{x \subseteq A, H(x) \subseteq x} H(X) \\ &\subseteq \bigcap_{x \subseteq A, H(x) \subseteq x} X = W \end{aligned}$$

\supseteq :

$H(W)$ est un X comme dans la définition de W .

$$\Rightarrow W \subseteq H(W)$$

□

Question :

$|\mathbb{R}| = \omega_1$?

Hypothese du continu

On peut montrer qu'on ne peut pas demontrer ca.

3 Theorie des nombres

3.1 Algorithme d'Euclide

Definition 7

$a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{Z}, b \neq 0$, alors

$$\underbrace{(a, b)}_{\text{plus grand commun diviseur}} = \{c \in \mathbb{Z}^{>0} \mid c|a, c|b\}$$

Cette valeur existe car il y a une borne superieure donnee par $|b|$.

Lemme 10

$a, b \in \mathbb{Z}, a \neq 0, r \in \mathbb{Z}$

$$(a, b) = (a, b + ra)$$

Preuve

Si qqchose divise a et b , il divise aussi a . Il divise aussi $b + a$

$$(b + ra) - ra = b$$

Detail dans les notes moodle

□

Definition 8 (Algorithme d'Euclide)

$a, b \in \mathbb{Z}^0$, soit

$$\begin{aligned} a_1 &:= \max\{a, b\} \\ a_2 &:= \min\{a, b\} \end{aligned} \quad i := 2$$

Pas recursif :

Si $q_i | q_{i-1} \rightarrow$ on arrete et on pose $t := i$.

Sinon $q_{i-1} = s_i q_i + q_{i+1}$

$$q_i \nmid q_{i-1} \Rightarrow q_{i+1} \neq 0$$

$$\text{et } q_{i+1} < q_i$$

$$q_1 > q_2 > q_3 > \dots q_t > 0, \text{ avec } q_i \text{ entier}$$

Lemme 11 $\exists m, n \in \mathbb{Z}$ tel que

$$am + bn = q_t$$

Preuve*On demontre que q_i*

$$m_i q_i + n_i q_{i+1} = q_t$$

On utilise l'induction descendante sur i . $\exists m_i, n_i \in \mathbb{Z}$ $i = t - 1$

$$1q_t + 0q_{t-1} = q_t$$

Pas d'induction

$$q_i = s_o q_{i+1} + q_{i+2}$$

Par hypothese d'induction

$$\begin{aligned} & \underbrace{m_{i+1} q_{i+1} + n_{i+1} q_{i+2}}_{= m_{i+1} q_{i+1} + n_{i+1} (q_i - s_{i+1} q_{i+1})} = q_t \\ & = \underbrace{n_{i+1}}_{m_i} q_i + \underbrace{(m_{i+1} - n_{i+1} s_{i+1})}_{n_i} q_{i+1} \end{aligned}$$

□

Lemme 12 $q_t | q_i$ pour chaque i .**Preuve***On demontre de la meme facon que le lemme d'avant avec induction descendante.*

□

On peut combiner les deux lemmes : donc

$$(a, b) | q_t$$

$$q_t | (a, b)$$

Donc l'algorithme d'Euclide donne le pgcd.

3.2 Theoreme fondamental de l'arithmetique**Definition 9 (Entier)***Soit $p \geq 2$ un entier*

1. p irreductible si pour chaque $a | p \Rightarrow a = 1$ ou $a = p$, $a \in \mathbb{N}$
2. p premier : $\forall a, b \in \mathbb{Z}^{>0}$

$$p | a.b \Rightarrow p | a \text{ ou } p | b$$

Lemme 13
 $q, a, b \in \mathbb{Z}^{>0}$

$$q|a.b \text{ et } (q, a) = 1 \\ \Rightarrow q|b$$

Preuve

$$(q, a) = 1$$

$$1 = mq + na, \text{ avec } m, n \in \mathbb{Z}$$

$$b = mqb + nab$$

$$\Rightarrow q|b$$

□

Proposition 14

Soit $p \geq 2$ entier

p irréductible $\iff p$ premier

Preuve

\Leftarrow

On veut montrer que $a.b = p \Rightarrow a = 1$ ou $b = 1$ On sait que p premier

$$p|a.b \Rightarrow p|a \text{ ou } p|b$$

$$\underbrace{\Rightarrow}_{a, b \geq p} p|a \text{ ou } p|b$$

$\Rightarrow :$

p irréductible

$$p|ab$$

Deux possibilités :

1. $p|a$ on a fini
2. $p \nmid a \Rightarrow (p, a) \neq p$
 p irréductible $(p, a)|p$, donc

$$(p, a) = 1$$

$$\text{Donc } \Rightarrow p|b$$

□

Théorème 15
 $n \in \mathbb{Z}^{>0},$

$$n = \prod_{i=1}^r p_i, \text{ avec } p \text{ premiers}$$

et c'est unique modulo l'ordre des premiers

Preuve

Existence

Induction sur n

$n = 2$ premier donc vérifie.

Pas d'induction : 2 possibilités :

- n premier $\Rightarrow p_1 = n, r = 1$
- n n'est pas premier \Rightarrow pas irréductible
 $\Rightarrow a.b = n$
tel que $a, b < n$
 $\Rightarrow a = \prod p_i$ et $b = \prod p_i$, donne la décomposition pour n .

Unicité

$$n = \prod_{i=1}^r p_i = \prod_{j=1}^s q_j, \text{ avec } r \leq s$$

- $s = 1 \Rightarrow r = 1$ vérifie
- $s > 1$, alors

$$q_1 \mid \prod_{i=1}^r p_i$$

$\Rightarrow q_1$ premier

$$\Rightarrow \forall l : q_1 \mid p_l$$

donc

$$\frac{n}{q_1} = \prod_{i=1, i \neq l}^r p_i = \prod_{j=2}^s a_j$$

□

Lecture 4: mardi moitié

Tue 06 Oct

4 Théorie des Groupes

4.1 Groupe symétrique de n

Le groupe $Bij(X)$ pour $X = \{1, \dots, n\} \rightarrow S_n$

$$\sigma \in S_n \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ \sigma(1) & \sigma(2) & \dots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

La multiplication (loi de composition) est simplement la composition des applications, attention le groupe n'est pas abélien.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$$

Dans l'autre sens :

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Les autres exemples seront contruit par une relation d'équivalence, on note

$$G/R$$

Question :

Quand est-ce que G/R est-il un groupe ?

Construction :

$$[g] = R_g = \{h \in G \mid (g, h) \in R\}$$

la classe de G .

Multiplication sur $\frac{G}{R}$

Soit $x, y \in G/R$, alors

$$x = [g], y \in [f]$$

On définit

$$x \cdot y := [g \cdot f]$$

Problème on peut choisir différents représentatifs.

Donc Pour que la définition sooit sensée, il faut que

$$[g \cdot f] = [g' \cdot f'] (\forall (g, g') \in R (f, f') \in R)$$

Pour l'inverse

$$x \in G/R$$

$$x = [g]$$

$$x^{-1} = [g^{-1}]$$

Elément neutre de G/R :

$$[e] \in G/R$$

Proposition 16

La définition précédente nous donne une structure de groupe sur G/R .

Les opérations sont bien définies.

$$(g, g') \in R (h, h') \in R \Rightarrow (g \cdot h, g' \cdot h') \in R$$

$$(g, g') \in R \Rightarrow (g^{-1}, (g')^{-1}) \in R$$

Preuve

Il faut vérifier les 3 conditions de groupe.

— (associativité)

$$x \cdot (y \cdot z) = [g] \cdot [f \cdot h] = [g \cdot f] \cdot [h] = (x \cdot y) \cdot z$$

Les deux autres propriétés sont laissées en exercice.

□

Exemple ($G = \mathbb{Z}, +$)

Soit

$$R = \{(x, y) \in \mathbb{Z} \mid m \mid x - y\}$$

$$G/R = \{m \cdot \mathbb{Z}, m\mathbb{Z} + 1, \dots, m\mathbb{Z} + (m - 1)\}$$

Les éléments de G/R sont des éléments et des groupes.

Il faut vérifier que $+$ et $-$ sont bien définis par rapport à R et ainsi on obtient le groupe

$$(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}, +)$$

Lecture 5: mardi

Tue 13 Oct

4.2 Construction de Groupes avec des quotients

Exemple

$$G = (\mathbb{Z}, +)$$

On dénote

$$G/R = \{R_x \mid x \in G\} = \{[x] \mid x \in G\}$$

Dans ce cas

$$\mathbb{Z}/m\mathbb{Z} = \{m\mathbb{Z}, m\mathbb{Z} + 1, \dots, m\mathbb{Z} + m - 1\}$$

4.2.1 Recette générale

Construction de la structure de groupes sur G/R

— Représentant

$$x \in G/R$$

g est un représentant de x si $x = [g]$.

— $[g] \cdot [f] = [g \cdot f]$

— $[g]^{-1} = [g^{-1}]$

— $e_{G/R} = [e]$

Il faut que ce soit bien défini, donc si

$$(g, g') \in R, (f, f') \in R$$

Alors

$$(g.f, g'.f') \in R$$

De même, si $(g, g') \in R$

$$\Rightarrow (g^{-1}, g'^{-1}) \in R$$

Exemple

$(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}, +)$

Il faut vérifier la condition la condition.

— $(g, g') \in R, (f, f') \in R \implies (g.f, g'.f') \in R$, alors

$$m|g - g' \text{ et } m|f - f' \text{ et } m|g + f - (g' + f')$$

— $(g, g') \in R$, alors $(g^{-1}, g'^{-1}) \in R$, en effet

$$m|g - g' \text{ et } m|-g - -g'$$

Donc on a vérifié que c'est un groupe.

Exemple

$(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times$

pas stable avec la multiplication.

Par contre $(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}, \bullet)$ monoïde avec $[1]$ l'élément neutre. Mais $[0]^{-1}$ n'existe pas
Donc il faut jeter les classes qui n'ont pas d'inverses, i.e. tous les éléments sauf $[p]$, p premiers.

Donc

$$\{[g] \in \mathbb{Z}/m\mathbb{Z} \mid (g, m) = 1\} = (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times \subseteq \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$$

Pour le moment, il s'agit que d'un sous-ensemble

On veut voir que la structure de monoïde induit une structure de groupe sur $(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times$.

$$[g], [f] \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times \Rightarrow [g.f] \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times$$

$$\text{Autrement dit } (g, m) = 1, (f, m) = 1 \Rightarrow (g.f, m) = 1$$

Clairement, $\{1\} \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times$

De plus, soit $[g] \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times$, on veut montrer que

$$\Rightarrow [g^{-1}] \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times$$

autrement dit,

$$(g, m) = 1 \implies \exists f \in \mathbb{Z}, \exists x \in \mathbb{Z} \text{ tel que } g.f = 1 + mx$$

Ce qui est immédiat, par Bézout.

Donc $(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times$ est un groupe !

Definition 10 (Homomorphismes de groupes)

Soient G, H deux groupes.

Une application

$$\phi : G \rightarrow H$$

est un homomorphisme si

$$\forall g, f \in G : \phi(g.f) = \phi(g).\phi(f)$$

ϕ est un endomorphisme si ϕ est un homomorphisme

$$\phi : G \rightarrow G$$

ϕ est un isomorphisme si

$$\phi : G \rightarrow H$$

est un homomorphisme bijectif.

G et H sont isomorphes si il existe

$$\phi : G \rightarrow H$$

un isomorphisme. On note

$$G \simeq H$$

Lemme 21

$$\phi : G \rightarrow H$$

un homomorphisme, alors

$$\phi(g^n) = \phi(g)^n$$

Preuve

pour $n=0$:

$$\text{à montrer : } \phi(e_G) = e_H$$

$$e_H \cdot \phi(g) = \phi(g) = \phi(e_G.g) = \phi(e_G)\phi(g)$$

Donc $e_H = \phi(e_G)$.

Pour $n > 0$:

$$\phi(g^n) = \phi(g \dots g) = \phi(g) \dots \phi(g) = \phi(g)^n$$

Pour $n < 0$:

On a démontré la semaine passée

$$\phi(g)^n \cdot \phi(g)^{-n} = \phi(g)^0 = e_H$$

Il suffit de montrer que
 $\phi(g^n)$ est aussi un inverse de $\phi(g)^{-n}$
 $\phi(g^n)\phi(g^{-n}) = \phi(g^n g^{-n}) = \phi(e_G) = e_H$ □

Exemple

— $(G, +)$ abélien, $n \in \mathbb{N}$

$$G \ni x \mapsto n.x$$

C'est un homomorphisme car

$$n(x + y) = nx + ny$$

—

$$\phi : \mathbb{Z} \mapsto G$$

quelconque, alors

$$\phi(n \cdot 1) = \phi(1)^n \forall n \in \mathbb{Z}$$

Autre direction :

Est-ce qu'il existe

$$\phi : \mathbb{Z} \rightarrow G$$

tel que

$$\phi(1) = g$$

Il y a une seule possibilité que ce soit le cas, quand

$$\phi(n) = g^n$$

C'est un homomorphisme :

$$g^n g^m = g^{n+m}$$

Cet homomorphisme existe donc, et il est uniquement déterminé on l'appelle

$$\exp_g$$

pour "exponentielle discrete"

Lecture 6: Th. des Groupes

Tue 20 Oct

4.3 Produits de Groupes

4.4 Produits de Groupes

Definition 11

Soit G, H deux groupes

$$G \times H = \{(g, h) | g \in G, h \in H\}$$

si $|G|, |H| < \infty$, alors $|G \times H| = |G| \cdot |H|$, on munit $G \times H$ d'une structure de groupe avec la loi

$$(g, h) \cdot (g', h') = (g', h')$$

Lemme 23

C'est un groupe avec

- $e_{G \times H} = (e_G, e_H)$
- $(g, h)^{-1} = (g^{-1}, h^{-1})$

Preuve

En exo

□

4.5 Propriété universelle des Produits

Si on a $G \times H$, on a deux projections (homomorphismes) naturels

$$\begin{array}{c}
 F \times H \xrightarrow{\quad} H \\
 \underbrace{\qquad\qquad}_{pr_H} \\
 pr_F((f, h)) = f \\
 pr_H((f, h)) = h
 \end{array}$$

Ce sont trivialement des homomorphismes.

Proposition 24

Soit G, F, H des groupes

$$\begin{array}{c}
 F \times H \xrightarrow{\quad} H \\
 \underbrace{\qquad\qquad}_{pr_H} \\
 \text{et} \\
 F \times H \xrightarrow{\quad} F \\
 \underbrace{\qquad\qquad}_{pr_F} \\
 \text{de plus soit } \beta : G \rightarrow H \\
 \alpha : G \rightarrow F
 \end{array}$$

Il existe un homomorphisme unique

$$\gamma : G \rightarrow F \times H$$

tel que les compositions ci-dessus commutent.

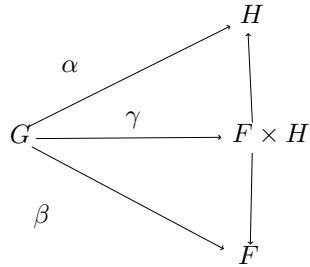


FIGURE 3 – diagrammes produits

Donc que

$$\alpha = pr_F \circ \gamma \text{ et } \beta = pr_H \circ \gamma$$

Donc

$$\alpha(g) = pr_F(\gamma(g)) = pr_F(f, h) = f$$

De plus

$$\beta(g) = pr_H(\gamma(g)) = pr_H(f, h) = h$$

Donc

$$\gamma(g) = (\alpha(g), \beta(g))$$

Preuve

Il faut montrer que γ est un homomorphisme.

$$\begin{aligned} \gamma(g)\gamma(g') &= (\alpha(g), \beta(g)) \cdot (\alpha(g'), \beta(g')) \\ &= (\alpha(g)\alpha(g'), \beta(g)\beta(g')) \\ &= (\alpha(gg'), \beta(gg')) = \gamma(gg') \end{aligned}$$

On a utilisé que la composition d'homomorphismes est un homomorphisme. \square

Utilisation

Regardons les homomorphismes de

$$\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$$

est la meme chose que considérer les morphismes de

$$\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$$

et

$$\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$$

On peut par exemple prendre l'exponentielle discrete de $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ et $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ et les combiner.

On ne doit pas vérifier que la “composition” est un morphisme car on l’a montré dans la propriété universelle.

4.6 Sous-groupes

Definition 12 (Sous-Groupe)

Soit (G, \cdot) un groupe et $H \subseteq G$ un sous-ensemble.

H est un sous-groupe si

1. $\{h \cdot h' | h, h' \in H\} = H \cdot H \subseteq H$
2. $\cdot|_H : H \times H \rightarrow H$ nous donne un groupe sur H .

Proposition 25

Soit $H \subseteq (G, \cdot)$ un sous-ensemble.

C'est un sous-groupe si et seulement si

1. $H \neq \emptyset$
2. $h, g \in H \implies h.g \in H$
3. $h \in H \implies h^{-1} \in H$

De plus, les éléments neutres de G et de H sont les mêmes, inverses aussi

Preuve

\Rightarrow

1. $e_H \in H \Rightarrow H \neq \emptyset$
2. Vrai
3. Il faut démontrer que

$$e_H = e_G$$

En effet

$$e_H \cdot e_H = e_H = e_G \cdot e_H$$

Or on peut simplifier, donc

$$e_H = e_G$$

\Leftarrow

Il faut démontrer que $e_G \in H$. En effet

$$H \neq \emptyset \Rightarrow \exists g \in H \Rightarrow g^{-1}g = e_G \in H$$

□

Exemple

1. *Sous-groupes triviaux*

$$\{e\} \subseteq G$$

$$G \subseteq G$$

2. $\{1, -1\} \subseteq (\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \cdot)$

3. $m\mathbb{Z} = \{mx | x \in \mathbb{Z}\} \subseteq (\mathbb{Z}, +)$

4. $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, m|n$ être divisible par m est bien défini sur les classes d'équivalences, autrement dit

$$x, y \in \mathbb{Z}, n|x - y \text{ alors } m|x \iff m|y$$

Donc

$$\left\{ [x] \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} | m|[x] \right\} \subseteq \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$$

est un sous-groupe.

Definition 13

Soit

$$\phi : G \rightarrow H$$

un morphisme.

1. *noyau :*

$$\ker \phi = \{g \in G | \phi(g) = e_H\} \subset G$$

2. *image :*

$$\text{Im} \phi = \{\phi(g) | g \in G\} \subset H$$

Proposition 27

L'image et le noyau sont des sous-groupes.

Preuve

La preuve pour l'image est dans le cours.

$$\ker \phi \neq \emptyset, \text{ car } \phi(e_G) = e_H$$

On démontre que c'est stable par composition

$$g, f \in \ker \phi$$

, alors

$$\phi(g.f) = \phi(g).\phi(f) = e_H \cdot e_H = e_H$$

On vérifie que c'est stable par inversion.

$$g \in \ker \phi$$

$$\phi(g)^{-1} = \phi(g^{-1})$$

donc c'est fini.

□

Lecture 7: theorie des groupes

Tue 27 Oct

Supposons $o(g) \neq \infty$, alors on note

$$|\langle g \rangle| = o(g)$$

On remarque que

$$g^n = (g^{o(g)})^r \cdot g^s$$

Proposition 28

$\phi : G \rightarrow H$ avec

$$\ker \phi = \{e\}$$

Alors ϕ injectif.

Preuve

Soient $g, h \in G$.

Supposons $\phi(g) = \phi(h)$. On a

$$\phi(g^{-1}h) = \phi(g^{-1})\phi(h) = \phi(g)^{-1}\phi(h) = e$$

Donc $g^{-1}h \in \ker \phi$ Donc

$$g^{-1}h = e$$

$$g = h$$

□

4.7 L'homomorphisme sgn

Rappelons que un cycle $\sigma \in S_n$ tel que $\exists a_1, \dots, a_r$ éléments différents de

$$\{1, \dots, n\}$$

$$\sigma(a_1) = a_2$$

$$\vdots$$

$$\sigma(a_{r-1}) = a_r$$

$$\sigma(a_r) = a_1$$

$$\sigma(i) = i \text{ sinon}$$

Proposition 29

Soit $\sigma \in S_n$, avec σ un produit de cycles disjoints de taille ≥ 2 .

Cette décomposition est unique modulo l'ordre des cycles

Proposition 30

$\sigma \in S_n$, alors on peut écrire σ comme un produit de transpositions.

Preuve

Il suffit de poser

$$\sigma = (a_1 \dots a_r)$$

On peut écrire σ comme produit de transpositions.

Induction sur r

— $r = 2$

On peut simplement envoyer chaque élément sur son prochain. \square

Definition 14 (sgn)

$$\text{sgn} : S_n \rightarrow \{-1, 1\}$$

On dénote

$$\text{sgn} \sigma = (-1)^{|\{(i,j) \in \mathbb{N}^2 \mid 1 \leq j < i \leq n, \sigma(j) < \sigma(i)\}|}$$

Lemme 31

$\sigma \in S_n$ et

$$1 \leq r < s \leq n$$

On définit

$$\tau = \sigma(rs)$$

Alors

$$\text{sgn}(\tau) = -\text{sgn}(\sigma)$$

Preuve

Si on applique (rs) les autres éléments restent les mêmes.

On a donc que

$$\tau(r) = \sigma(s) \text{ et } \tau(s) = \sigma(r)$$

— $i \neq j \notin \{r, s\}$ implique

$$\sigma(i) = \tau(i)$$

$$\sigma(j) = \tau(j)$$

Pas de changement.

— Soit $j < r$ ou $j > s$, alors Donc j et r sont en inversion pour σ si et seulement si j et s sont en inversions pour τ Donc il n'y a pas de contribution au nombre de paires d'inversions.

— Si $r < j < s$, alors r et j pour τ est le même que s et j pour σ . (car $\tau(r) = \sigma(s)$ et $\tau(j) = \sigma(j)$)
 et s et j sont en inversion pour τ si et seulement si r et j ne sont pas en inversion pour τ
 Si r et s sont en inversion pour τ si et seulement si r et s ne sont pas en inversion pour σ \square

Corollaire 32

sgn est un homomorphisme

Preuve

$\sigma, \tau \in S_n$, alors

$$\text{sgn}(\sigma\tau) = (-1)^{r+s} = \text{sgn } \sigma \text{sgn } \tau \quad \square$$

Lecture 8: 3 Novembre

Tue 03 Nov

4.8 Theoreme de Lagrange

Definition 15

Soit $H \leq G$, une classe à gauche (resp. à droite) est un sous-ensemble

$$g.H = \{g.h | h \in H\}$$

Ce n'est pas forcément un sous-groupe.

Exemple

Soit $G = S_3$,

$$H = \{\langle(12)\rangle\} = \{id, (12)\}$$

Regardons les classe à gauche

$$1. g = Id$$

$$Id.H = \{Id, (12)\} = (12).H$$

$$2. g = (13)$$

$$(13).H = \{(13), (123)\}$$

$$3.$$

$$(23).H = \{(23), (132)\}$$

Lemme 34

$$|gH| = |H| \forall g \in G$$

Preuve

$$\beta : x \mapsto g^{-1}x$$

et

$$gy \leftarrow y : \alpha$$

Ces deux applications sont inverses \Rightarrow ils sont en bijection. \square

Proposition 35

Soit $H \leq G$.

On définit

$$R = \{(g, f) \in G \times G \mid g^{-1}f \in H\} \subseteq G \times G$$

Alors

1. R est une relation d'équivalence
2. les classes d'équivalence de R sont les classes à gauche

Preuve

1. réflexivité $g^{-1}g = e \in H$ donc $(g, g) \in R$

2. Symétrie $(g, f) \in R$ donc $g^{-1}f \in H$

$$f^{-1}g = f^{-1}(g^{-1})^{-1} = (g^{-1}f)^{-1} \in H$$

3. Transitivité $(g, f) \in R, (f, h) \in R$, alors $g^{-1}f, f^{-1}h \in H$,

$$g^{-1}h = g^{-1}ff^{-1}h \in H$$

Donc $(g, h) \in R$

On veut $R_g = gH$

$$R_g = \{f \in G \mid (g, f) \in R\} = \{f \in G \mid g^{-1}f \in H\} = \{f \in G \mid \exists x \in H : f = gx\} = gH$$

\square

En somme :

$$H \leq G$$

Les classes à gauche

- Ont les même tailles
- H_1, \dots, H_r sont les classes à gauche

$$G = \coprod_i H_i$$

La notation \coprod_i signifie que l'intersection deux-à-deux est vide.

Donc, si G est fini

$$|G| = \sum |H_i| = r|H|$$

Theorème 36 (Lagrange)

G est fini et $H \leq G$, alors

$$|H| \mid |G|$$

De plus $\frac{|G|}{|H|} = \text{nombre de classes à gauche} = [G : H]$

Corollaire 37

$g \in G$, alors

$$\Rightarrow o(g) \mid |G|$$

Preuve

$H = \langle g \rangle$ et ensuite on utilise Lagrange. □

Definition 16

G groupe est cyclique si il existe $g \in G$ tel que

$$\langle g \rangle = G$$

Corollaire 38

$|G| = p > 0$ avec p premier, alors G cyclique

Preuve

$g \in G \setminus \{e\}$, donc

$$1 < o(g) \mid p$$

par Lagrange.

Donc $o(g) = p$ et donc $\langle g \rangle = G$. □

Theorème 39 (Petit theoreme de Fermat)

Soit $m > 0$ et a entier, avec

$$(a, m) = 1$$

Alors

$$a^{\phi(m)} \equiv 1(m)$$

Preuve

On sait que

$$[a] \in \left(\mathbb{Z} / m\mathbb{Z} \right)^{\times}$$

Donc par lagrange

$$o([a]) \mid \phi(m)$$

et donc

$$[a]^{\phi(m)} = [1] = [a^{\phi(m)}]$$

□

Prenons un groupe G

et une relation d'équivalence R sur G .

On a vu que

$$G/R$$

est un groupe si la multiplication et l'inverse sont bien définis.

Dans ce cas

$$[g] \cdot [h] = [gh]$$

Il est équivalent de demander que

$$\begin{aligned} \xi : G &\rightarrow G/R \\ g &\rightarrow Rg \end{aligned}$$

est un homomorphisme de groupe et donc

$$R_g \cdot R_h = R_{gh}$$

On applique ça aux classes à gauche

$$R = \{(g, f) | g^{-1}f \in H\}$$

On essaie de tourner

$$G/R = \{ \text{classes à gauche} \}$$

C'est nécessaire que

$$\begin{aligned} \xi_h : G &\rightarrow G/H \\ g &\rightarrow gh \end{aligned}$$

est un homomorphisme.

$$\ker \xi_h = H$$

Quelles conditions est-ce que ça pose ?

Definition 17

$H \leq G$ est normal si $\forall g \in G$

$$\forall h \in H$$

on a

$$g^{-1}hg \in H$$

On appelle ceci le conjugué de h par g .

Definition 18 (Groupe simple)

Si $H \leq G$ normal $\Rightarrow H$ trivial.

Proposition 40

Soit $\phi : G \rightarrow H$ un homomorphisme, alors le noyau de cet homomorphisme est normal $\ker \phi$ est normal.

Preuve

Soit $g \in G$, $h \in \ker \phi$

$$\phi(g^{-1}hg) = \phi(g^{-1})\phi(h)\phi(g) = \phi(g^{-1})e\phi(g) = e \quad \square$$

Theorème 41

$H \trianglelefteq G$ et R relation d'équivalence des classes à gauche de H
 G/R un groupe et

$$\begin{aligned} \xi_H : G &\rightarrow G/R \\ g &\mapsto gH \end{aligned}$$

un homomorphisme.

Lecture 9: 10 mardi

Tue 10 Nov

Theorème 42

Soit H un sous-groupe normal de G .

Les deux propositions suivantes sont équivalentes :

1. G/R_h est un groupe
2. ξ_H est un homomorphisme

Preuve

Automatique si la multiplication est bien définie par rapport à R_h (déjà fait).

1. Soient $(g, g') \in R_H$ et $(h, h') \in R_H$ Il faut montrer que $(gh, g'h') \in R_H$

$$(gh)^{-1}g'h' = h^{-1}g^{-1}g'h' = h^{-1}h'h'^{-1}g^{-1}g'h' \in H$$

2. Soient $(g, g') \in R_H$
 Il faut montrer

$$(g^{-1}g'^{-1}) \in R_H$$

On vérifie

$$(g^{-1})^{-1}(g')^{-1} = gg'^{-1} = gg'^{-1}gg^{-1} \in H \quad \square$$

Remarque

Notons que

$$|G/H| = |G : H| = \frac{|G|}{|H|}$$

Theorème 44

— H sous-groupe normal de G

— $\xi_H : G \rightarrow G/H$

— $\phi : G \rightarrow F$

tel que $H \subseteq \ker \phi$.

Alors, il existe un unique $\eta : G/H \rightarrow F$ tel que

$$\phi = \eta \circ \xi_H$$

Preuve

Il y a une possibilité pour η , si

$$\eta(gH) = \eta(\xi_H(g)) = \phi(g)$$

Il faut encore vérifier que η est un homomorphisme.

Montrons que η est bien défini. Supposons que $gH = g'H$, alors $(g, g') \in R_H$, donc $g^{-1}g' \in H$

Donc

$$\eta(gH) = \phi(g) \text{ et } \eta(g'H) = \phi(g')$$

Or $H \subseteq \ker \phi$, donc

$$\phi(g^{-1}g') = e$$

Or car ϕ est un homomorphisme, on a

$$\phi(g) = \phi(g')$$

Donc η est bien défini.

Montrons que η est un homomorphisme.

$$\eta(gH.g'H) = \eta(gg'H) = \phi(gg') = \phi(g)\phi(g') = \eta(g)\eta(g')$$

Montrons que si $H = \ker \phi \Rightarrow \eta$ injectif

$$gH \in \ker \eta$$

, donc

$$e = \eta(gH) = \phi(g)$$

Donc $g \in \ker \phi$, donc $g \in H$, donc $gH = H$, donc

$$gH = e_{G/H}$$

Donc η est injectif.

On peut donc considérer G/H comme un sous-groupe de F . Donc

$$G/H \simeq \text{Im}(\eta) \quad \square$$

Corollaire 45

Donc

$$G/\ker \phi \simeq \text{Im} \phi$$

Pour n'importe quel homomorphisme ϕ .

Corollaire 46

$$\frac{|G|}{|\ker \phi|} = |\text{Im} \phi|$$

Corollaire 47

- $\phi : G \rightarrow H$
 - $|G| = n, |H| = m$
 - $(n, m) = 1$
- Alors $\phi = e_H$

Preuve

$\text{Im} \phi \leq H$, donc par Lagrange

$$|\text{Im} \phi| \mid m$$

De meme

$$|\ker \phi| \mid n$$

Donc

$$|G/\ker \phi| = \frac{n}{|\ker \phi|} \mid n$$

Donc $|\text{Im} \phi| = |G/\ker \phi| = 1$, donc

$$\text{Im} \phi = \{e_H\} \text{ et } \ker \phi = G \quad \square$$

Et donc $\phi = e_H$.

Corollaire 48

$$\langle g \rangle \simeq \mathbb{Z}/o(g)\mathbb{Z}$$

Preuve

$$\text{dexp}_g : \mathbb{Z} \rightarrow G$$

On a vu que

$$\text{Im dexp}_g = \langle g \rangle$$

et que

$$\ker \text{dexp}_g = o(g)\mathbb{Z}$$

Donc

$$\langle g \rangle = \mathbb{Z}/o(g)\mathbb{Z}$$

□

Corollaire 49

Soit $|G| = p$ avec p premier, alors

$$G \simeq \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$$

Preuve

On a vu que

$$g \in G \setminus \{0\}$$

, alors $\langle g \rangle = G$.

Et $o(g) = p$.

□

4.9 Groupes diedraux

Graphe simple non orienté

Definition 19 (Graphe nonorienté)

C'est un ensemble V de sommets et

$$E \subseteq \{S \subseteq V \mid |S| = 2\}$$

(l'ensemble des arretes)

Definition 20 (Isomorphismes des graphes)

Soit $G = (V, E)$ et $G' = (V', E')$ deux graphes.

$$\phi : V \rightarrow V'$$

est un isomorphisme si

- ϕ bijection
- $\{v, w\} \in E \iff \{\phi(v), \phi(w)\} \in E'$

Definition 21 (Groupe diedral)

Le groupe diedral est l'ensemble des automorphismes d'un graphe.

Lecture 10: mardi
Exemple

Tue 17 Nov

$$\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$$

$$n \mapsto [n]$$

$$\{ \text{homoms } \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \rightarrow G \} \leftrightarrow \{ \text{homoms } \mathbb{Z} \rightarrow G \mid n\mathbb{Z} \leq \ker \phi \}$$

4.10 Sous-groupes engendrés par plusieurs éléments

Lemme 51

$H_i \leq G \ \forall i \in I$, alors $\bigcap_i H_i \leq G$

Preuve

1. $\bigcap_i H_i \neq \emptyset$ parce que $e \in H_i$
2. $g, h \in \bigcap_i H_i \Rightarrow \forall i, gh, g^{-1} \in H_i$.

□