

105 Groupe des permutations d'un ensemble fini. Applications.

Pour toute cette leçon, on fixe un entier $n \geq 1$.

I – Généralités

1. Définitions

DÉFINITION 1

Soit E un ensemble. On appelle **groupe des permutations** de E le groupe des bijections de E dans lui-même. On le note $S(E)$.

[ROM21]
p. 37

NOTATION 2

Si $E = \llbracket 1, n \rrbracket$, on note $S(E) = S_n$, le groupe symétrique à n éléments.

NOTATION 3

Soit $\sigma \in S_n$. On note :

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ \sigma(1) & \sigma(2) & \dots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

pour signifier que σ est la bijection $\sigma : k \mapsto \sigma(k)$.

Le théorème suivant justifie que, pour un ensemble à n éléments, on peut se contenter d'étudier S_n en lieu et place de $S(E)$.

THÉORÈME 4

(i) Soient E et F deux ensembles en bijection. Alors $S(E)$ et $S(F)$ sont isomorphes.

(ii)

$$|S_n| = n!$$

THÉORÈME 5

Théorème de Cayley.

Tout groupe G est isomorphe à un sous-groupe de $S(G)$.

p. 53

2. Orbites et cycles

DÉFINITION 6

Soit $\sigma \in \llbracket 1, n \rrbracket$. On a une action naturelle de $H = \langle \sigma \rangle$ sur $\llbracket 1, n \rrbracket$ définie par

$$\forall k \in \mathbb{Z}, \forall j \in \llbracket 1, n \rrbracket, \sigma^k \cdot j = \sigma^k(j)$$

Les orbites pour cette action sont les $H \cdot j = \{\sigma(j) \mid j \in \llbracket 1, n \rrbracket\}$. On les note $\mathcal{O}_\sigma(j)$.

p. 41

REMARQUE 7

- Les orbites selon σ sont décrites par la relation

$$x \sim y \iff \exists k \in \mathbb{Z} \text{ tel que } y = \sigma^k(x)$$

- Une orbite $\mathcal{O}_\sigma(j)$ est réduite à un point si et seulement si $\sigma(j) = j$.

DÉFINITION 8

Soient $l \leq n$ et $i_1, \dots, i_l \in \llbracket 1, n \rrbracket$ des éléments distincts. La permutation $\gamma \in S_n$ définie par

$$\gamma(j) = \begin{cases} j & \text{si } j \notin \{i_1, \dots, i_l\} \\ i_{k+1} & \text{si } j = i_k \text{ avec } k < l \\ i_1 & \text{si } j = i_l \end{cases}$$

et notée $(i_1 \dots i_l)$ est appelée **cycle** de longueur l et de **support** $\{i_1, \dots, i_l\}$. Un cycle de longueur 2 est une **transposition**.

p. 37

PROPOSITION 9

Une permutation σ est cycle si et seulement s'il n'y a qu'une seule orbite $\mathcal{O}_\sigma(j)$ non réduite à un point.

p. 42

REMARQUE 10

La composée de deux cycles n'est pas un cycle en général.

EXEMPLE 11

Avec $\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \end{pmatrix} \in S_4$, on a $\sigma^2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \end{pmatrix}$ qui n'est pas un cycle.

PROPOSITION 12

L'ordre d'un cycle est égal à sa longueur.

PROPOSITION 13

Soient σ et τ deux cycles de S_n dont on note respectivement $\text{Supp}(\sigma)$ et $\text{Supp}(\tau)$ les supports. Si $\text{Supp}(\sigma) \cap \text{Supp}(\tau) = \emptyset$, alors $\text{Supp}(\sigma\tau) = \text{Supp}(\sigma) \cup \text{Supp}(\tau)$ et dans ce cas :

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

(ii) $\sigma\tau = \text{id} \implies \sigma = \tau = \text{id}$.

THÉORÈME 14

Toute permutation de S_n s'écrit de manière unique (à l'ordre près) comme produit de cycles dont les supports sont deux à deux disjoints.

EXEMPLE 15

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 2 & 4 & 5 & 1 & 3 & 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 5 \end{pmatrix}$$

DÉFINITION 16

On appelle **type** d'une permutation $\sigma \in S_n$ et on note $[l_1, \dots, l_m]$ la liste des cardinaux l_i des orbites dans $\llbracket 1, n \rrbracket$ de l'action du groupe $\langle \sigma \rangle$ sur $\llbracket 1, n \rrbracket$, rangée dans l'ordre croissant.

PROPOSITION 17

Une permutation de type $[l_1, \dots, l_m]$ a pour ordre $\text{ppcm}(l_1, \dots, l_m)$.

EXEMPLE 18

La permutation de l'Exemple 15 est d'ordre 6.

3. Signature

DÉFINITION 19

Soit $\sigma \in S_n$. On appelle **signature** de σ , notée $\epsilon(\sigma)$ le nombre rationnel

$$\epsilon(\sigma) = \prod_{i \neq j} \frac{\sigma(i) - \sigma(j)}{i - j}$$

EXEMPLE 20

$$\epsilon\left(\begin{pmatrix} 1 & 2 \end{pmatrix}\right) = -1$$

PROPOSITION 21

$\epsilon : S_n \rightarrow \mathbb{Q}^*$ est un morphisme de groupes. Pour une permutation $\sigma \in S_n$, on a les propriétés suivantes :

- (i) Si σ est une transposition, $\epsilon(\sigma) = -1$.
- (ii) Si l est le nombre de transpositions qui apparaît dans une décomposition de σ en produit de transpositions, alors $\epsilon(\sigma) = (-1)^l$.
- (iii) Si σ est de type $[l_1, \dots, l_m]$, alors $\epsilon(\sigma) = (-1)^{l_1 + \dots + l_m - m}$.

En particulier, si $n \geq 2$, l'image de ϵ est le sous-groupe $\{\pm 1\}$ de $\mathbb{Q}^*$.

PROPOSITION 22

Le seul morphisme non trivial de S_n dans $\mathbb{C}^*$ est ϵ .

[PEY]
p. 20

DÉFINITION 23

- Soit $\sigma \in S_n$. Si $\epsilon(\sigma) = 1$, on dit que σ est **paire**. Sinon, on dit qu'elle est **impaire**.
- Le noyau de ϵ (constitué donc des permutations paires) est un sous-groupe distingué de S_n appelé **groupe alterné** et noté A_n .

[ULM21]
p. 64

PROPOSITION 24

Pour $n \geq 2$,

$$|A_n| = \frac{n!}{2}$$

II – Structure

1. Conjugaison

PROPOSITION 25

Deux permutations σ et τ de S_n sont conjuguées si et seulement si elles sont du même type. En particulier, pour $\omega \in S_n$ et tout cycle $(i_1 \dots i_l) \in S_n$, on a :

$$\omega(i_1 \dots i_l)\omega^{-1} = (\omega(i_1) \dots \omega(i_l))$$

p. 60

EXEMPLE 26

Les types possibles d'une permutation de S_4 sont [1] (l'identité), [2] (les transpositions), [2, 2] (les doubles transpositions), [3] (les 3-cycles) et [4] (les 4-cycles) : on a 5 classes de conjugaison de tailles respectives 1, 6, 3, 8 et 6.

PROPOSITION 27

Pour tout $n \geq 3$, $Z(S_n) = \{\sigma \in S_n \mid \forall \tau \in S_n, \sigma\tau = \tau\sigma\} = \{\text{id}\}$.

[PER]
p. 13

LEMME 28

Les 3-cycles sont conjugués dans A_n pour $n \geq 5$.

p. 15

2. Générateurs

PROPOSITION 29

(i) S_n est engendré par les transpositions. On peut même se limiter aux transpositions de la forme $(1 \ k)$ ou encore $(k \ k+1)$ (pour $k \leq n$).

(ii) S_n est engendré par $(1 \ 2)$ et $(1 \ \dots \ n)$.

[ROM21]
p. 44**EXEMPLE 30**

Pour $\sigma = (1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5)(6 \ 7)$, on a $\sigma = (1 \ 2)(2 \ 3)(3 \ 4)(4 \ 5)(6 \ 7)$.

PROPOSITION 31

A_n est engendré par les 3-cycles pour $n \geq 3$.

3. Simplicité

LEMME 32

Les 3-cycles sont conjugués dans A_n pour $n \geq 5$.

[PER]
p. 15**LEMME 33**

Le produit de deux transpositions est un produit de 3-cycles.

[ROM21]
p. 49**THÉORÈME 34**

A_n est simple pour $n \geq 5$.

[PER]
p. 28**COROLLAIRE 35**

Le groupe dérivé de A_n est A_n pour $n \geq 5$, et le groupe dérivé de S_n est A_n pour $n \geq 2$.

COROLLAIRE 36

Pour $n \geq 5$, les sous-groupes distingués de S_n sont S_n , A_n et $\{\text{id}\}$.

COROLLAIRE 37

Soit H un sous-groupe d'indice n de S_n . Alors, H est isomorphe à S_{n-1} .

DEV

III – Applications

1. Déterminant

Soit $\mathbb{K}$ un corps et soit E un espace vectoriel de dimension n sur $\mathbb{K}$.

DÉFINITION 38

Soient $E_1, \dots, E_p$ et F des espaces vectoriels sur $\mathbb{K}$ et $f : E_1, \dots, E_p \rightarrow F$.

- f est dite **p -linéaire** si en tout point les p applications partielles sont linéaires.
- Si f est p -linéaire et si $E_1 = \dots = E_p$ ainsi que $F = \mathbb{K}$, f est une **forme p -linéaire**. On note $\mathcal{L}_p(E, \mathbb{K})$ l'ensemble des formes p -linéaires sur E .
- Si de plus $f(x_1, \dots, x_p) = 0$ dès que deux vecteurs parmi les x_i sont égaux, alors f est dite **alternée**.

EXEMPLE 39

En reprenant les notations précédentes, pour $p = 2$, f est bilinéaire.

PROPOSITION 40

$\mathcal{L}_p(E, \mathbb{K})$ est un espace vectoriel et, $\dim(\mathcal{L}_p(E, \mathbb{K})) = |\dim(E)|^p$.

THÉORÈME 41

L'ensemble des formes p -linéaires alternées sur E est un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension 1. De plus, il existe une unique forme p -linéaire alternée f prenant la valeur 1 sur une base $\mathcal{B}$ de E . On note $f = \det_{\mathcal{B}}$.

DÉFINITION 42

$\det_{\mathcal{B}}$ est l'application **déterminant** dans la base $\mathcal{B}$. En l'absence d'ambiguïté, on s'autorise à noter $\det = \det_{\mathcal{B}}$.

PROPOSITION 43

Soit $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ une base de E . Si $x_1, \dots, x_n \in E$ ($\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, on peut écrire $x_i = \sum_{j=1}^n x_{i,j} e_j$), on a la formule $\det_{\mathcal{B}}(x_1, \dots, x_n) = \sum_{\sigma \in S_n} \epsilon(\sigma) \prod_{i=1}^n x_{i, \sigma(i)}$.

COROLLAIRE 44

Soit $\mathcal{B}$ une base de E .

(i) Si $\mathcal{B}'$ est une autre base de E , alors $\det_{\mathcal{B}'} = \det_{\mathcal{B}'}(\mathcal{B}) \det_{\mathcal{B}}$.

(ii) Une famille de vecteurs est liée si et seulement si son déterminant est nul dans une base quelconque de E .

(iii) Soient $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, alors $\det_{\mathcal{B}}(AB) = \det_{\mathcal{B}}(A) \det_{\mathcal{B}}(B)$.

(iv) Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, alors $\det_{\mathcal{B}}(A) = \det_{\mathcal{B}}({}^t A)$ et pour tout $\lambda \in \mathbb{K}$, $\det_{\mathcal{B}}(\lambda A) = \lambda^n \det_{\mathcal{B}}(A)$.

(v) Si on effectue une permutation $\sigma \in S_n$ sur les colonnes d'une matrice A , alors le déterminant de A est multiplié par $\epsilon(\sigma)$.

NOTATION 45

Soit $a \in \mathbb{F}_p$. On note $\left(\frac{a}{p}\right)$ le symbole de Legendre de a modulo p .

[I-P]
p. 203

LEMME 46

Soient $p \geq 3$ un nombre premier et V un espace vectoriel sur $\mathbb{F}_p$ de dimension finie. Les dilatations engendrent $\text{GL}(V)$.

THÉORÈME 47

Théorème de Frobenius-Zolotarev.

Soient $p \geq 3$ un nombre premier et V un espace vectoriel sur $\mathbb{F}_p$ de dimension finie.

$$\forall u \in \text{GL}(V), \epsilon(u) = \left(\frac{\det(u)}{p} \right)$$

où u est vu comme une permutation des éléments de V .

DEV

2. Matrices de permutation

Soit $\mathbb{K}$ un corps et soit E un espace vectoriel de dimension n sur $\mathbb{K}$.

[ROM21]
p. 54

DÉFINITION 48

À tout $\sigma \in S_n$ on associe la matrice de passage de la base canonique $(e_i)_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket}$ à la base $(e_{\sigma(i)})_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket}$ que l'on note P_{σ} : c'est la **matrice de permutation** associée à σ .

REMARQUE 49

En reprenant les notations précédentes, $\forall j \in \llbracket 1, n \rrbracket, P_{\sigma} e_j = e_{\sigma(j)}$.

PROPOSITION 50

$\sigma \mapsto P_{\sigma}$ est un morphisme de groupes injectif de S_n dans $\text{GL}_n(\mathbb{K})$. De plus, on a

$$\det(P_{\sigma}) = \epsilon(\sigma)$$

COROLLAIRE 51

Tout groupe fini d'ordre n est isomorphe à un sous groupe de $GL_n(\mathbb{F}_p)$ pour un premier $p \geq 2$.

3. Polynômes symétriques

Soit $\mathbb{K}$ un corps de caractéristique différente de 2.

[GOU21]
p. 83

DÉFINITION 52

Soit $P \in \mathbb{K}[X_1, \dots, X_n]$. On dit que P est **symétrique** si

$$\forall \sigma \in S_n, P(X_{\sigma(1)}, \dots, X_{\sigma(n)}) = P(X_1, \dots, X_n)$$

EXEMPLE 53

Dans $\mathbb{R}[X]$, le polynôme $XY + YZ + ZX$ est symétrique.

DÉFINITION 54

On appelle **polynômes symétriques élémentaires** de $A[X_1, \dots, X_n]$ les polynômes noté Σ_p où $p \in \llbracket 1, n \rrbracket$ définis par

$$\Sigma_p = \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_p \leq n} X_{i_1} \dots X_{i_p}$$

EXEMPLE 55

- $\Sigma_1 = X_1 + \dots + X_n$.
- $\Sigma_2 = \sum_{1 \leq i < j \leq n} X_i X_j$.
- $\Sigma_n = X_1 \dots X_n$.

REMARQUE 56

Si $P \in A[X_1, \dots, X_n]$, alors $P(\Sigma_1(X_1, \dots, X_n), \dots, \Sigma_n(X_1, \dots, X_n))$ est symétrique. Et la réciproque est vraie.

THÉORÈME 57

Théorème fondamental des polynômes symétriques.

Soit $P \in A[X_1, \dots, X_n]$ un polynôme symétrique. Alors,

$$\exists ! \Phi \in A[\Sigma_1, \dots, \Sigma_n] \text{ tel que } \Phi(\Sigma_1, \dots, \Sigma_n)$$

EXEMPLE 58

$P = X^3 + Y^3 + Z^3$ s'écrit $P = \Sigma_1^3 - 3\Sigma_1\Sigma_2 + 3\Sigma_3$.

APPLICATION 59**Relations coefficients - racines.**

Soit $P = a_0X^n + \dots + a_n \in \mathbb{K}[X]$ avec $a_0 \neq 0$ scindé sur $\mathbb{K}$, dont les racines (comptées avec leur ordre de multiplicité) sont $x_1, \dots, x_n$. Alors

$$\forall p \in \llbracket 1, n \rrbracket, \Sigma_p(x_1, \dots, x_n) = (-1)^p \frac{a_p}{a_0}$$

En particulier,

- $\Sigma_1(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i = -\frac{a_1}{a_0}$.
- $\Sigma_n(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n x_i = (-1)^n \frac{a_n}{a_0}$.

p. 64

APPLICATION 60**Théorème de Kronecker.**

Soit $P \in \mathbb{Z}[X]$ unitaire tel que toutes ses racines complexes appartiennent au disque unité épointé en l'origine (que l'on note D). Alors toutes ses racines sont des racines de l'unité.

[I-P]
p. 279**COROLLAIRE 61**

Soit $P \in \mathbb{Z}[X]$ unitaire et irréductible sur $\mathbb{Q}$ tel que toutes ses racines complexes soient de module inférieur ou égal à 1. Alors $P = X$ ou P est un polynôme cyclotomique.

Bibliographie

Les maths en tête

[GOU21]

Xavier GOURDON. *Les maths en tête. Algèbre et probabilités*. 3^e éd. Ellipses, 13 juill. 2021.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/13722-25266-les-maths-en-tete-algebre-et-probabilites-3e-edition-9782340056763.html>.

L'oral à l'agrégation de mathématiques

[I-P]

Lucas ISENMANN et Timothée PECATTE. *L'oral à l'agrégation de mathématiques. Une sélection de développements*. 2^e éd. Ellipses, 26 mars 2024.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/15218-28346-loral-a-lagregation-de-mathematiques-une-selection-de-developpements-2e-edition-9782340086487.html>.

Cours d'algèbre

[PER]

Daniel PERRIN. *Cours d'algèbre. pour l'agrégation*. Ellipses, 15 fév. 1996.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/7778-18110-cours-d-algebre-agregation-9782729855529.html>.

L'algèbre discrète de la transformée de Fourier

[PEY]

Gabriel PEYRÉ. *L'algèbre discrète de la transformée de Fourier. Niveau M1*. Ellipses, 15 jan. 2004.

<https://adtf-livre.github.io>.

Mathématiques pour l'agrégation

[ROM21]

Jean-Étienne ROMBALDI. *Mathématiques pour l'agrégation. Algèbre et géométrie*. 2^e éd. De Boeck Supérieur, 20 avr. 2021.

<https://www.deboecksuperieur.com/ouvrage/9782807332201-mathematiques-pour-l-agregation-algebre-et-geometrie>.

Théorie des groupes

[ULM21]

Felix ULMER. *Théorie des groupes. Cours et exercices*. 2^e éd. Ellipses, 3 août 2021.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/13760-25304-theorie-des-groupes-2e-edition-9782340057241.html>.