

DM10
 Pour le lundi 05/01
ou avant, via cahier-de-prépa (cf. mail de vacances)

Formules possibles.

1. Formule 1, « bases » : faire le problème 1, bonne révision de ce chapitre d'algèbre (2h30)
2. Formule 2, « plus avancée en algèbre » : faire le problème 1 et le problème 2, plus dur que le précédent (5h)
3. Formule 3, « je n'ai pas fait assez d'analyse » : faire le problème 1 et le problème 3, qui mélange un peu d'algèbre et de l'analyse (4h30)
4. Formule 4, complète : faire les problèmes 1, 2 et 3

Précisez en début de DM la formule choisie.

Problème 1. Ordre d'un élément dans un groupe

Notations. Soit (G, \star) un groupe. On note e son élément neutre. On note, pour tout x dans G , x^{-1} l'inverse de x pour la loi \star . On rappelle que l'on note, pour tout x dans G et pour tout n dans \mathbb{N}^* ,

$$x^n = \underbrace{x \star x \star \cdots \star x}_{n \text{ fois}} \quad \text{et} \quad x^{-n} = \underbrace{x^{-1} \star x^{-1} \star \cdots \star x^{-1}}_{n \text{ fois}}.$$

Par convention, $x^0 = e$. On rappelle que toutes les règles de calcul usuel sur les puissances s'appliquent ici. Pour tous m et n dans \mathbb{Z} , pour tout x dans G : $x^m x^n = x^{m+n}$, $(x^{-1})^m = x^{-m}$, $(x^m)^n = x^{mn}$. En particulier, pour tout x dans G et n dans \mathbb{Z} , x^n est inversible d'inverse x^{-n} .

Définitions. Soit x un élément de G . On dit que x **admet un ordre fini** s'il existe un entier naturel **non nul** n tel que $x^n = e$. On note alors \mathcal{P}_x l'ensemble $\mathcal{P}_x = \{k \in \mathbb{N}^*, x^k = e\}$.

Si x admet un ordre fini, on nomme **ordre de** x et on note $\omega(x)$ la quantité $\omega(x) = \min(\mathcal{P}_x)$.

On rappelle que si G est un ensemble fini, on appelle **cardinal** de G le nombre d'éléments de G , et on le note $|G|$.

Un résultat à utiliser. On n'hésitera pas à utiliser l'argument suivant (et on pourra le nommer « principe des tiroirs » lorsqu'on l'utilise) : si E est un ensemble à n éléments ($n \in \mathbb{N}^*$) et si x_1, \dots, x_{n+1} sont $n+1$ éléments de E , alors il existe $(i, j) \in \llbracket 1, n+1 \rrbracket^2$ tels que $i \neq j$ et $x_i = x_j$.

A. Premières manipulations

1. Soit x dans G tel que x admet un ordre fini. Justifier l'existence de $\omega(x)$.
2. Démontrer que si (G, \star) est **fini**, alors tout élément de G admet un ordre.
On pourra considérer, si n est le cardinal de G et $x \in G$, x^0, x^1, \dots, x^n , et utiliser le principe des tiroirs.
3. Soit x dans G . Démontrer que si x est d'ordre p dans G (où $p \in \mathbb{N}^*$), alors x^0, \dots, x^{p-1} sont deux à deux distincts. *On raisonnera par l'absurde et on contredira la minimalité de p .*
4. Dans cette question, on suppose que tous les éléments de G différents de e sont d'ordre 2. Exprimer, pour tout x dans G , l'inverse de x en fonction de x , et en déduire que G est abélien.

B. Théorème de Lagrange faible

5. Un Lemme préliminaire. Démontrer le lemme préliminaire suivant :

$$\text{Si } x \text{ est dans } G, \text{ si } n \in \mathbb{N}^* \text{ et } x^n = e, \text{ alors } \omega(x) \text{ divise } n. \quad (1)$$

On pourra effectuer la division euclidienne de n par $\omega(x)$.

Dans cette partie, on va démontrer le résultat suivant :

$$\text{Si } G \text{ est fini et de cardinal } n, \text{ alors pour tout } x \text{ dans } G, \omega(x) \text{ divise } n. \quad (2)$$

On ne prouve ce résultat que dans le cas suivant : on suppose G **abélien**, c'est-à-dire commutatif.

Soit x dans G . On définit l'application $\varphi : \begin{cases} G \rightarrow G \\ y \mapsto x * y \end{cases}$

6. Démontrer que φ est une bijection de G dans G .

7. En calculant de deux manières différentes $\prod_{y \in G} \varphi(y)$, démontrer que $x^n = e$ et en déduire que $\omega(x)$ divise n .

C. Un exemple dans S_n .

Soit n un entier naturel supérieur ou égal à 2. Soit p dans $\llbracket 2, n \rrbracket$.

8. Définir ce qu'est un p -cycle, et donner, en justifiant brièvement, l'ordre d'un p -cycle.

9. Soit $\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 3 & 7 & 4 & 9 & 6 & 5 & 2 & 8 & 1 \end{pmatrix}$.

(a) Donner la décomposition en produit de cycles à supports disjoints, une décomposition en produit de transpositions, et la signature de σ .

(b) Donner, sans justification, l'ordre de σ .

10. Donner, en expliquant brièvement mais sans justifier précisément, l'ordre d'une permutation en fonction de sa décomposition en cycles à supports disjoints.

Problème 2. Théorème de Lagrange fort

Cet exercice a pour but de prouver un très joli théorème de théorie des groupes (dont vous verrez une version faible en spé) :

Théorème 1 (Lagrange)

Soit $(G, *)$ un groupe fini et H un sous-groupe de G . Alors $\text{Card}(H)$ divise $\text{Card}(G)$.

Soit donc G un groupe fini, H un sous-groupe de G . On définit la relation \mathcal{R} suivante sur G

$$\forall (x, y) \in G^2, (x \mathcal{R} y) \Leftrightarrow (x * y^{-1} \in H).$$

1. Montrer que \mathcal{R} définit bien une relation d'équivalence sur G .
2. Soit y dans G . Montrer que la classe d'équivalence de y est

$$Hy = \{h * y, h \in H\}.$$

Soient alors (y_1, y_2, \dots, y_p) les représentants des différentes classes d'équivalence Hy_1, Hy_2, \dots, Hy_p .

3. Soit φ_i l'application définie par

$$\varphi_i : \begin{cases} H \rightarrow Hy_i \\ h \mapsto h * y_i \end{cases}$$

Montrer que φ_i est une bijection de H sur Hy_i .

4. En déduire que $p \times \text{Card}(H) = \text{Card}(G)$, et conclure.

On va maintenant donner quelques conséquences de ce théorème.

5. Soit G un groupe fini, x un élément de G . On définit le sous-groupe engendré par x , noté $\langle x \rangle$, par

$$\langle x \rangle = \{x^k, k \in \mathbb{Z}\}.$$

On note ordre de x l'entier $\omega(x) = \min\{k \in \mathbb{N}^*, x^k = e\}$.

- (a) Montrer que $\langle x \rangle$ est un sous-groupe de G .
- (b) Montrer qu'il s'agit du plus petit sous-groupe de G contenant x .
- (c) Montrer que $\omega(x)$ est bien défini et que $\omega(x) | \text{Card}(G)$.

6. Supposons maintenant que G est fini de cardinal p , p premier. Montrer que G est cyclique, et en déduire qu'il est isomorphe à \mathbb{U}_p .

7. Montrer que si p n'est pas premier, il peut exister des groupes finis de cardinal p non cycliques.

On va maintenant montrer que tout groupe fini de cardinal p^2 (p premier) est abélien. Soit G un groupe fini de cardinal p^2 . Soit, pour $h \in G$, $\varphi_h : x \mapsto h * x * h^{-1}$.

8. Vérifier que φ_h est un isomorphisme de G , i.e. un morphisme de groupes bijectif.

9. Soit $x \in G$. On appelle orbite de x par l'action de G par automorphismes l'ensemble

$$\mathcal{O}(x) = \{\varphi_h(x), h \in G\}.$$

Montrer, en considérant la relation d'équivalence \sim définie par $g \sim h$ ssi $\varphi_g(x) = \varphi_h(x)$, que le cardinal de l'orbite d'un élément divise le cardinal de G .

10. On appelle centre de G l'ensemble $Z(G) = \{x \in G, \forall y \in G, x * y = y * x\}$.

- (a) Démontrer que $Z(G)$ n'est pas trivial (i.e. réduit au neutre). *On s'intéressera au cardinal des orbites.*

- (b) En déduire que G est abélien.

Problème 3. Sous-groupes de $S(\mathbb{R})$

On note G l'ensemble des bijections continues de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , muni de la loi \circ . On rappelle que (G, \circ) est un groupe, de neutre $\text{Id}_{\mathbb{R}}$. Si $f \in G$ et $n \in \mathbb{N}^*$, on note

$$f^n = \underbrace{f \circ \cdots \circ f}_{n \text{ fois}}.$$

Par convention, $f^0 = \text{Id}_{\mathbb{R}}$. Et, comme f est bijective, on note aussi $f^{-n} = f^{-1} \circ \cdots \circ f^{-1}$.

A. Généralités

1. Que peut-on dire de la monotonie des éléments de G ?
2. On note, pour $a \in \mathbb{R}^*$ et $b \in \mathbb{R}$, $f_{a,b} : x \mapsto ax + b$. On appelle $\text{Aff} = \{f_{a,b}, (a, b) \in \mathbb{R}^* \times \mathbb{R}\}$ leur ensemble. Démontrer que Aff est un sous-groupe de G .

B. Sous-groupes finis de G

Soit désormais H un sous-groupe fini de G .

3. Si H est de cardinal 1, qui est H ?

Soit désormais f dans H .

4. Démontrer qu'il existe $p \in \mathbb{N}^*$ tel que $f^p = \text{Id}_{\mathbb{R}}$.

B-I. Cas où f est strictement croissante

5. Dans cette question, on suppose f strictement croissante. Démontrer, par l'absurde que $f = \text{Id}_{\mathbb{R}}$.

B-II. Cas où f est strictement décroissante

Dans cette partie seulement, on suppose f strictement décroissante.

6. Démontrer que $f \circ f = \text{Id}_{\mathbb{R}}$.

On définit la fonction $g \in \mathbb{R}^{\mathbb{R}}$ par : $\forall x \in \mathbb{R}$, $g(x) = x - f(x)$.

7. Montrer que g est une bijection de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , et que

$$\forall x \in \mathbb{R}, f(x) = g^{-1}(-g(x)) = g^{-1} \circ (-\text{Id}_{\mathbb{R}}) \circ g(x).$$

C. Conclusion

8. Décrire le plus précisément possible les sous-groupes finis de G : quel peut être leur cardinal, quelle est la forme de leurs éléments, etc.