

# Exercices 2023

## I) ENS MP-MPI

**XENS**

### 1) Algèbre

**Exercice 1** [ENS 2023 # 1] Soient  $S$  et  $T$  des ensembles finis non vides et  $f$  une application de  $S$  dans  $T$ . On pose  $X = \{(x, y) \in S^2, f(x) = f(y)\}$ .  
Montrer que  $|X| \geq \max \left( \frac{|S|^2}{|T|}, \left( \left\lceil \frac{|S|}{|T|} \right\rceil \right)^2 + |S| - \left\lceil \frac{|S|}{|T|} \right\rceil \right)$ .

*Démonstration.* Pour le terme de gauche, il s'agit de montrer que  $\sum_y n_y^2 \geq \frac{(\sum_y n_y)^2}{\sum_y 1}$ , c'est Cauchy-Schwarz.

Pour le terme de droite, c'est un principe des tiroirs, puis compter pour 1 les éléments qui ne sont pas dans le tiroir. □

**Exercice 2** [ENS 2023 # 2] Soient  $n \in \mathbb{N}^*$  et  $(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ . Montrer qu'il existe  $m \in \mathbb{Z}$  et  $S$  un sous-ensemble non vide de  $\llbracket 1, n \rrbracket$  tels que  $|m - \sum_{i \in S} x_i| \leq \frac{1}{n+1}$ .

*Démonstration.*  $S$  sera un sous-ensemble d'entiers consécutifs : considérer les sommes partielles  $S_0, \dots, S_n$ . □

**Exercice 3** [ENS 2023 # 3] Pour tout  $n \in \mathbb{N}^*$ , on note  $E(n)$  la valuation 5-adique de  $\prod_{k=1}^n k^k$ . Donner un équivalent de  $E(n)$ , quand  $n \rightarrow +\infty$ . SUP

*Démonstration.* C'est  $\sum_{q=1}^{\lfloor n/5 \rfloor} 5q + \sum_{q=1}^{\lfloor n/5^2 \rfloor} 25q + \dots$  □

**Exercice 4** [ENS 2023 # 5] Soit  $p$  un entier premier  $> 1$ . Montrer que  $-1$  est un carré modulo  $p$  si et seulement si  $p$  est somme de deux carrés d'entiers.

*Démonstration.* Si  $p$  est somme de deux carrés d'entiers,  $p \equiv 1[4]$ , et  $a$  est un carré si et seulement si  $a^{\frac{p-1}{2}} \equiv 1[p]$ .

Réciproquement, si  $p \mid m^2 + 1$ . On peut trouver  $0 < x, y < \sqrt{p}$  tels que  $p \mid m^2 x^2 - y^2$ . On obtient alors  $p \mid x^2 + y^2$ . □

**Exercice 5** [ENS 2023 # 6] 1. Soit  $p$  un nombre premier impair. Montrer que  $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^\times$  contient  $(p-1)/2$  carrés.

2. Montrer que tout élément de  $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$  s'écrit comme la somme de deux carrés de  $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ .

3. Soit  $n$  un entier impair. Montrer que tout élément de  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  s'écrit comme somme de deux carrés.

**Indication :** Commencer par le cas où  $n$  est sans facteur carré.

**Exercice 6** [ENS 2023 # 7] Si  $n \in \mathbb{N}^*$ , on pose  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$ . Si  $p$  est un nombre premier et si  $r \in \mathbb{Q}^*$  s'écrit  $\frac{a}{b}$  de manière irréductible, on définit la  $p$ -valuation  $v_p(r)$  comme  $v_p(a) - v_p(b)$ .

1. Montrer que si  $p \geq 3$  est premier, alors  $v_p(H_{p-1}) \geq 1$ .

2. Montrer que si  $p \geq 5$  est premier, alors  $v_p(H_{p-1}) \geq 2$ .

3. Montrer que si  $p \geq 5$  est premier, alors  $v_p(H_{(p-1)p}) \geq 1$ .

4. Pour  $n \in \mathbb{N}^*$ , calculer  $v_2(H_n)$ .

**Exercice 7** [ENS 2023 # 9] 1. Calculer  $\sum_{d|n} \varphi(d)$  où  $\varphi$  est l'indicatrice d'Euler.

2. Calculer  $\sum_{d|n} \mu(d)$  où  $\mu$  est la fonction de Möbius définie par  $\mu(1) = 1, \mu(p) = -1, \mu(p^k) = 0$  pour  $k \geq 2$  si  $p$  est un nombre

premier et  $\mu(nm) = \mu(n)\mu(m)$  si  $n \wedge m = 1$ . On pose  $F: x \in \mathbb{R}_+ \mapsto \left| \left\{ \frac{p}{q} \in [0, 1]; q \leq x \right\} \right|$ .

3. Montrer que  $F(x) \underset{x \rightarrow +\infty}{=} \frac{3}{\pi^2} x^2 + O(x \ln x)$ .

*Démonstration.* 1.  $\sum_{d|n} \varphi(d) = n$

2.  $\sum_{d|n} \mu(d) = 0$ , ou 1 pour  $n = 1$ .

3. Par inversion de Möbius, on a  $\varphi(d) = \sum_{d'|d} \mu\left(\frac{d}{d'}\right) d'$ . □

**Exercice 8** [ENS 2023 # 10] Soient  $p, q$  deux nombres premiers distincts. On note  $v_p(n)$  la valuation  $p$ -adique d'un entier  $n$ . On pose, pour  $m \in \mathbb{N}^*, N(m) = (1-q)(1-q^2) \dots (1-q^m)$ . Trouver une constante  $c > 0$  telle que, pour tout  $m \in \mathbb{N}^*, v_p(N(m)) \leq cm \ln(m)$ .

*Démonstration.* Relier à 423 (LTE).

On a  $v_p(a^n - b^n) = v_p(a - b) + v_p(n)$  (pour  $p \neq 2$ ).

Donc  $v_p(N(m)) = \sum_{k=1}^m v_p(1 - q) + v_p(m!)$ , plus formule de Legendre. □

**Exercice 9** [ENS 2023 # 11] Si  $X$  est un ensemble fini, on note  $X^* = \bigsqcup_{k \in \mathbb{N}} X^k$ ,  $c: (X^*)^2 \rightarrow X^*$  la concaténation et  $\ell: X^* \rightarrow \mathbb{N}$  la longueur. Soient  $A$  et  $B$  deux ensembles finis et  $\varphi: A^* \rightarrow B^*$  telle que, pour tous  $a, a' \in A$ ,  $\varphi(c(a, a')) = c(\varphi(a), \varphi(a'))$ . SUP

1. On pose  $A = \{a, b, c, d\}$  et  $B = \{0, 1\}$ . Étudier l'injectivité des applications définies sur les lettres de  $A$  puis étendues sur  $A^*$  par  $\varphi: A \rightarrow B^*$  telles que  $\varphi(a) = 0, \varphi(b) = 01, \varphi(c) = 10, \varphi(d) = 10011$ , et  $\psi: A \rightarrow B^*$  telle que  $\psi(a) = 01, \psi(b) = 10, \psi(c) = 11, \psi(d) = 00$ .

2. Montrer que, si  $\varphi$  est injective, alors  $\sum_{a \in A} |B|^{-\ell(\varphi(a))} \leq 1$ .

**Démonstration.** 1. La première est non injective : 0100110 peut être lu de deux façons.

La seconde l'est.

2. On note  $C_N$  le nombre de choix possibles, de mots, dont la longueur totale  $N$ .

On doit avoir  $C_N \leq |B|^N$ . Mais  $C_N$  vérifie une relation de récurrence :  $C_N = \sum_{a \in A} C_{N-\ell(a)}$ .

Donc les racines de cette récurrence doivent être  $\leq |B|$ , ce qui implique qu'en  $|B|$  la valeur est négative, d'où le résultat.  $\square$

**Exercice 10** [ENS 2023 # 12] 1. Soit  $n \in \mathbb{N}^*$ . Montrer que la transposition  $(1\ 2)$  et le cycle  $(1\ 2\ \dots\ n)$  engendrent le groupe symétrique  $\mathcal{S}_n$ .

2. La transposition  $(1\ 3)$  et le cycle  $(1\ 2\ 3\ 4)$  engendrent-ils  $\mathcal{S}_4$  ?

3. Soient  $n \in \mathbb{N}^*$  et  $1 \leq a < b \leq n$  tels que  $\tau = (ab)$  et  $\sigma = (1\ 2\ \dots\ n)$  engendrent  $\mathcal{S}_n$ . Montrer que  $b - a$  et  $n$  sont premiers entre eux.

4. Montrer la réciproque de la propriété précédente.

SUP

**Démonstration.** 1.

2. Non.

3. Si  $p \mid b - a \wedge n$ , alors  $\sigma(a) - \sigma(b) \equiv a - b[p]$ .

4. Facile de se ramener à un cycle  $(u\ u + 1)$

$\square$

**Exercice 11** [ENS 2023 # 14] Soit  $G$  un groupe fini. Si  $X$  et  $Y$  sont des parties non vides de  $G$ , on pose  $X^{-1} = \{x^{-1}, x \in X\}$  et  $XY = \{xy, (x, y) \in X \times Y\}$ .

SUP

Dans la suite,  $X$  désigne une partie non vide de  $G$ .

1. On suppose que  $|XX| < 2|X|$ . Montrer que  $XX^{-1} = X^{-1}X$ .

2. On suppose que  $|XX^{-1}| < \frac{3}{2}|X|$ . Montrer que  $X^{-1}X$  est un sous-groupe de  $G$ .

**Démonstration.** 1. Si  $X$  a un seul élément, ok. Sinon, alors pour tous  $a, b \in X$ , les ensembles  $aX$  et  $bX$  ne sont pas disjoints, donc il existe  $u, v$  tels que  $au = bv \Leftrightarrow a^{-1}b = uv^{-1}$ . D'où le résultat.

2.  $X^{-1}X$  contient l'élément neutre, et stable par inverse.

Si ce n'est pas un sous-groupe, c'est qu'il existe  $u^{-1}va^{-1}b$  qui ne s'écrit pas de cette forme.

!!

Quitte à translater, on peut supposer que  $e \in X$ . Alors  $XX^{-1}$  contient tous les éléments de  $X$ , et leurs inverses. Au moins la moitié des éléments de  $X$  ont leurs inverses dans  $X$  !  $\square$

**Exercice 12** [ENS 2023 # 15] Soient  $A$  un anneau et  $B \subset A$  finie non vide. On note  $E(B) = |\{(a, b, c, d) \in B^4 \mid ab = cd\}|$ . Montrer que  $E(B) \geq \frac{|B|^4}{|BB|}$ .

SUP

**Démonstration.** On note  $x_i$  le nombre de couples qui donnent une valeur  $i \in A$ . Alors  $E(B) = \sum x_i^2$ , et  $|BB| = \sum_i 1$ . Cauchy-Schwarz permet de minorer par  $(\sum x_i)^2$ , d'où le résultat.  $\square$

**Exercice 13** [ENS 2023 # 16] 1. Montrer que  $S = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$  et  $T = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  engendrent  $SL_2(\mathbb{Z})$ .

2. Soit  $m \geq 2$ . Montrer que le morphisme  $\pi: SL_2(\mathbb{Z}) \rightarrow SL_2(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})$  est surjectif.

SUP

**Démonstration.** Easy

$\square$

**Exercice 14** [ENS 2023 # 17] Soit  $p$  un nombre premier. On admet qu'il existe un anneau commutatif  $A$  dans lequel  $p^2 \cdot 1_A = 0_A$  et il existe un élément inversible  $x$  tel que :

- tout élément de  $A$  s'écrit  $P(x)x^{-k}$  pour un  $P \in \mathbb{Z}[X]$  et un  $k \in \mathbb{N}$ ;
- pour deux polynômes  $P, Q$  dans  $\mathbb{Z}[X]$  et deux entiers naturels  $k, l$ , l'égalité  $P(x)x^{-k} = Q(x)x^{-l}$  équivaut à ce que  $X^k Q$  et  $X^l P$  aient même réduit modulo  $p^2$  (autrement dit, tous les coefficients de  $X^k Q - X^l P$  sont des multiples de  $p^2$ ).

1. Soient  $P \in \mathbb{Z}[X]$  et  $k \in \mathbb{N}$ . Caractériser l'inversibilité de  $P(x)x^{-k}$  dans  $A$ .

2. Montrer que le groupe multiplicatif  $A^\times$  ne possède pas de partie génératrice finie.

**Démonstration.** !!

$\square$

**Exercice 15** [ENS 2023 # 18] Soit  $f \in \mathbb{Z}[X]$ . On pose  $S_q = \sum_{\substack{0 \leq a < q \\ a \wedge q = 1}}^{q-1} e^{\frac{2i\pi a f(n)}{q}}$  pour tout  $q \in \mathbb{N}^*$ . Montrer que, si  $q \wedge q' = 1$ , alors

$$S_{qq'} = S_q S_{q'}.$$

**Démonstration.** Les  $a \in \llbracket 1, qq' \rrbracket$  premiers avec  $q$  et  $q'$  sont les  $bq + aq'$ , avec  $a$  premier avec  $q$  et  $b$  premier avec  $q'$ .

$\square$

**Exercice 16** [ENS 2023 # 19] On dit qu'un ensemble  $X \subset \mathbb{C}$  est intégrable si :  $\forall (x, y) \in X^2, |x - y| \in \mathbb{N}$ . Montrer que, pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , il existe un ensemble intégrable  $X$  composé de  $n$  points tous sur un même cercle.

SUP

**Démonstration.** On veut que les  $\sin(\frac{\theta_i - \theta_j}{2})$  soient rationnels, c'est-à-dire les  $\sin \frac{\theta_i}{2} \cos \frac{\theta_j}{2} - \sin \frac{\theta_j}{2} \cos \frac{\theta_i}{2}$ .

Il suffit donc de prendre les doubles d'une infinité de points rationnels sur le cercle.

$\square$

**Exercice 17** [ENS 2023 # 20] Soit  $z \in \mathbb{C}$  annulé par un polynôme unitaire à coefficients entiers. Soit  $Q \in \mathbb{Z}[X]$ . Montrer que  $Q(z)$  est annulé par un polynôme unitaire à coefficients entiers. SUP

*Démonstration.* !! □

**Exercice 18** [ENS 2023 # 21] Soit  $n = 2m + 1 \geq 1$  un entier impair. Expliciter un polynôme  $P_m$  de degré  $2m$  tel que  $\forall x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Z}, \sin(nx) = (\sin x)^n P_m(\cotan x)$ .

1. Donner une expression simplifiée de  $\sum_{k=1}^m \cotan^2\left(\frac{k\pi}{n}\right)$ .
2. Donner une expression simplifiée de  $\sum_{k=1}^m \frac{1}{\sin^2\left(\frac{k\pi}{n}\right)}$ .
3. En déduire que  $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} = \frac{\pi^2}{6}$ .

*Démonstration.* Easy. □

**Exercice 19** [ENS 2023 # 22] Pour  $n \in \mathbb{N}$ , on pose  $P_n = \sum_{k=0}^n \frac{X^k}{k!}$ . SUP

1. Montrer que  $P_n$  est scindé à racines simples sur  $\mathbb{C}$ .
2. Montrer que si  $n$  est impair, alors  $P_n$  possède exactement une racine réelle, et qu'elle appartient à  $[-n, -1]$ .
3. On suppose  $n$  pair. Le polynôme  $P_n$  a-t-il une racine réelle?
4. Déterminer les variations et la convexité de  $x \mapsto P_n(x)$ .

*Démonstration.* Easy. □

**Exercice 20** [ENS 2023 # 23] Soit  $P \in \mathbb{R}[X]$  de degré  $n \geq 1$ .

1. On suppose  $P$  scindé sur  $\mathbb{R}$ . Montrer que  $\forall x \in \mathbb{R}, nP(x)P''(x) \leq (n-1)P'(x)^2$ .
2. Donner un polynôme ne vérifiant pas le résultat de la question précédente, puis un polynôme non scindé le vérifiant.

*Démonstration.* 1. □

2. Ajouter à un précédent.

**Exercice 21** [ENS 2023 # 24] Soit  $n \in \mathbb{N}^*, P = X^n + \sum_{k=0}^{n-1} a_k X^k \in \mathbb{C}[X]$ . On factorise  $P$  sous la forme  $P = \prod_{i=1}^n (X - z_i)$ . Pour  $k \in \mathbb{N}$ , on note  $S_k = \sum_{i=1}^n z_i^k$ . Montrer que, si  $k > n$ ,  $S_k + a_{n-1}S_{k-1} + \dots + a_0S_{k-n} = 0$  et que, si  $k \leq n$ ,  $S_k + a_{n-1}S_{k-1} + \dots + a_{n-k+1}S_1 = -ka_{n-k}$ . SUP

**Exercice 22** [ENS 2023 # 25] Une suite d'entiers  $(a_n)_{n \geq 1}$  est un pseudo-polynôme si pour tous  $n, m \in \mathbb{N}^*, m - n \mid a_m - a_n$ . SUP

1. Soit  $P \in \mathbb{Z}[X]$ . Montrer que  $(P(n))_{n \geq 1}$  est un pseudo-polynôme.
2. Montrer que  $(\lfloor n!e \rfloor)_{n \geq 1}$  est un pseudo-polynôme.
3. Trouver un polynôme  $P \in \mathbb{Q}[X] \setminus \mathbb{Z}[X]$  tel que  $P(\mathbb{Z}) \subset \mathbb{Z}$  et que la suite  $(P(n))_{n \geq 1}$  ne soit pas un pseudo-polynôme.

*Démonstration.* 1. □

- 2.
3.  $\frac{n(n+1)}{2}$

**Exercice 23** [ENS 2023 # 26] Montrer que, pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , il existe  $(a_0, \dots, a_n) \in (\mathbb{R}^{+*})^{n+1}$  tel que, pour tout  $(\varepsilon_0, \dots, \varepsilon_n) \in \{-1, 1\}^{n+1}$ , le polynôme  $P(X) = \sum_{k=0}^n \varepsilon_k a_k X^k$  est scindé sur  $\mathbb{R}$ . □

*Démonstration.* Easy, à relier.

**Exercice 24** [ENS 2023 # 27] Deux polynômes  $P, Q \in \mathbb{R}[X]$  sont entrelacées si

- $-P$  et  $Q$  sont scindés à racines simples sur  $\mathbb{R}$ ,
- $P$  et  $Q$  n'ont aucune racine réelle commune,
- entre deux racines consécutives de  $P$  (respectivement  $Q$ ) il y a une unique racine de  $Q$  (respectivement  $P$ ).

Soient  $P, Q \in \mathbb{R}[X]$ . Montrer que si, pour tout  $\lambda, \mu \in \mathbb{R}^*, \lambda P + \mu Q$  est scindé à racines simples sur  $\mathbb{R}$ , alors  $P$  et  $Q$  sont entrelacées. □

*Démonstration.* À relier.

**Exercice 25** [ENS 2023 # 28] Soit  $P \in \mathbb{C}[X]$  de degré  $n > 0$  tel que  $P(0) = 0$  et  $P'(0) = 1$ . On note  $D_r$  le disque complexe ouvert de centre 0 et de rayon  $r$ . Montrer que  $D_{1/n} \subset P(D_1)$ . SUP

*Démonstration.*  $X + X^2Q(X) - z_i = 0$  avec  $|z_i| < \frac{1}{n}$  admet toujours une racine,  $< 1$ .

Vient des relations coefficients-racines. □

**Exercice 26** [ENS 2023 # 29] Pour  $P \in \mathbb{R}[X]$ , on note  $\mathcal{C}_P = \{Q \in \mathbb{R}[X] \mid P \circ Q = Q \circ P\}$ . SUP

On appelle suite commutante toute famille  $(P_n)_{n \in \mathbb{N}}$  telle que  $\forall n, \deg P_n = n$  et  $\forall n, m \in \mathbb{N}, P_n \circ P_m = P_m \circ P_n$ .

1. Soient  $\alpha \in \mathbb{R}$  et  $n \in \mathbb{N}$ . Montrer que  $\mathcal{C}(X^2 + \alpha)$  contient au plus un polynôme.
2. Expliciter une famille commutante telle que  $P_2 = X^2$ .
3. Montrer que, pour  $n \in \mathbb{N}$ , il existe  $T_n \in \mathbb{R}[X]$  tel que  $\forall x \in \mathbb{R}, \cosh(nx) = T_n(\cosh x)$ .
4. Montrer que  $(T_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite commutante.

5. Montrer que les polynômes de degré 1 sont inversibles pour  $\circ$ .
6. Montrer que, pour  $P$  de degré 2, il existe  $\alpha \in \mathbb{R}$  et  $U \in \mathbb{R}[X]$  de degré 1 unitaire tel que  $P = U \circ (X^2 + \alpha) \circ U^{-1}$ .
7. Soit  $(P_n)_{n \in \mathbb{N}}$  une famille commutante. Montrer que, ou bien il existe  $U$  de degré 1 tel que  $P_n = U \circ X^n \circ U^{-1}$ , ou bien il existe  $U \in \mathbb{R}[X]$  de degré 1 tel que  $P_n = U \circ T_n \circ U^{-1}$ .

**Exercice 27** [ENS 2023 # 31] • CNS sur  $n$  pour que  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  soit un corps.

- On suppose cette condition satisfaite. Combien y a-t-il de polynômes de degré  $d \in \mathbb{N}$  fixé dans  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ ?
- Soit  $p$  premier. Montrer qu'il existe des polynômes irréductibles de degré 2 et 3 dans  $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ .

*Démonstration.* •

- Compter les multiples. □

**Exercice 28** [ENS 2023 # 32] Soit  $n \in \mathbb{N}^*$ ,  $\mathbb{K}$  un corps, et  $V$  un sous-espace vectoriel de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  dont tous les éléments sont de rang  $\leq 1$ . Montrer que  $V$  est de dimension  $\leq n$ . Étudier le cas d'égalité.

**Exercice 29** [ENS 2023 # 33] Quelle est la dimension maximale d'un sous-espace vectoriel  $V$  de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  tel que pour tout  $(X, Y) \in V^2$ , on ait  $\text{Tr}(XY) = 0$ .

*Démonstration.* !!

On a  $X \perp X^T$ , donc la dimension de  $X$  est  $\leq \frac{n^2}{2}$ .

Réciproquement. □

**Exercice 30** [ENS 2023 # 35] Soient  $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  de même rang telles que  $A^2B = A$ . Montrer que  $B^2A = B$ . SUP

*Démonstration.* En passant à la transposée, on veut montrer que  $(B'A' - I_n)A' = O_n \Rightarrow (A'B' - I_n)B' = O_n$ .

Mais la première relation donne que si  $X \in \text{Im } A'$ , alors  $B'A'X = X$ . Donc  $\text{Im } B' = \text{Im } A'$ , et leurs induits sont inverses l'un de l'autre. □

**Exercice 31** [ENS 2023 # 38] Soient  $n \geq 1$  et  $E$  une partie de  $\mathcal{P}([1, n])$ . SUP

1. On suppose que  $E$  est stable par différence symétrique. Que dire de  $C = \{1_A\}$  comme partie de l'espace vectoriel  $(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z})^n$ ?
2. On ne fait plus l'hypothèse précédente, mais on suppose que  $A \cap B$  est de cardinal pair pour tous  $A, B \in E$ . Montrer que  $|E| \leq 2^{\lfloor n/2 \rfloor}$ .

*Démonstration.* 1. C'est un sous-espace vectoriel.

2. D'une part les cardinaux des éléments sont pairs. D'autre part les cardinaux des réunions aussi.

On vérifie que si  $A, B, C \in E$ , alors  $(A \Delta B) \cap C$  est pair. Donc on peut supposer que  $E$  est stable par  $\Delta$ .

Chaque  $A \in E$  donne un élément du dual  $\tilde{A} : B \mapsto A \cap B$ , ce qui limite la dimension de  $E$ . □

**Exercice 32** [ENS 2023 # 39] Soient  $(a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{R}^n$  telle que  $|a_i| \geq 2$ , pour tout  $i \in [1, n]$ .

1. Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  telle que  $\forall i, a_{ii} = a_i, a_{ij} = 1$  si  $|i - j| = 1$  et  $a_{ij} = 0$  sinon. Montrer que  $A$  est inversible et que son déterminant a le même signe que  $\prod a_k$ .
2. Montrer que la conclusion tient encore si l'on suppose  $|a_{ij}| \leq 1$  si  $|i - j| = 1$  au lieu de  $a_{ij} = 1$ .

*Démonstration.* !! □

**Exercice 33** [ENS 2023 # 40] On considère  $\varphi : (\mathbb{R}^4)^2 \rightarrow \mathcal{M}_4(\mathbb{R})$  qui à  $(u, v)$  associe la matrice dont le coefficient en  $(i, j)$  vaut

$$\begin{vmatrix} u_i & v_i \\ u_j & v_j \end{vmatrix}.$$

1. Que peut-on dire si  $\varphi(u, v) = \varphi(u', v') \neq 0$ ?
2. Que dire de la réciproque?
3. Montrer que  $A$  s'écrit comme  $\varphi(u, v)$  avec  $(u, v)$  libre si et seulement si  $A \in \mathcal{A}_4(\mathbb{R})$ ,  $\det(A) = 0$  et  $A \neq 0$ .
4. Décrire l'image et le noyau d'une telle matrice.

*Démonstration.* □

**Exercice 34** [ENS 2023 # 41] Soient  $a, b, m, p$  des entiers naturels tels que  $a^2 + b^2 - pm = -1$ . On pose  $A = \begin{pmatrix} p & a + ib \\ a - ib & m \end{pmatrix}$ .

Montrer qu'il existe  $B \in \text{GL}_2(\mathbb{Q}(i))$  telle que  $A = B^*B$  où  $B^* = \bar{B}^T$ . Même question avec  $B$  dans  $\text{GL}_2(\mathbb{Z}[i])$ .

*Démonstration.* On a une matrice hermitienne, de déterminant 1. Donc diagonalisable?! □

**Exercice 35** [ENS 2023 # 42] Soient  $n \in \mathbb{N}^*, \varphi_1, \dots, \varphi_n$  des formes linéaires non nulles sur  $\mathbb{R}^2$ . Pour  $g \in \text{SL}_2(\mathbb{R})$ , soit  $f_g : (x_1, \dots, x_n) \in (\mathbb{R}^2)^n \mapsto \varphi_1(g(x_1)) \times \dots \times \varphi_n(g(x_n))$ , application de  $(\mathbb{R}^2)^n$  dans  $\mathbb{R}$ . Montrer l'équivalence entre les propositions suivantes :

- il existe une suite  $(g_k)_{k \geq 1}$  d'éléments de  $\text{SL}_2(\mathbb{R})$  telle que, pour tous vecteurs  $x_1, \dots, x_n$  de  $\mathbb{R}^2$ ,  $f_{g_k}(x_1, \dots, x_n) \xrightarrow[k \rightarrow +\infty]{} 0$ ,
- il existe une droite vectorielle  $L$  telle que  $|\{i, L \subset \text{Ker}(\varphi_i)\}| > \frac{n}{2}$ .

*Démonstration.* Si il existe une droite  $L$ , en prenant  $g_k = \begin{pmatrix} k & 0 \\ 0 & k^{-1} \end{pmatrix}$  selon  $L$  et n'importe quel supplémentaire, ça devrait être bon. Réciproquement, !! □

**Exercice 36** [ENS 2023 # 43] Soit  $G$  l'ensemble des matrices de  $GL_2(\mathbb{Z})$  de la forme  $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ , où  $ad - bc = 1$  et  $a \equiv d \equiv 1 - c \equiv 1 \pmod{3}$ . Montrer que  $G$  est le sous-groupe de  $GL_2(\mathbb{Z})$  engendré par les matrices  $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  et  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$

*Démonstration.* Facile ? Attention : faux pour 2. □

**Exercice 37** [ENS 2023 # 45] Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  et  $C_A: X \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}) \mapsto AX - XA$ . Montrer que si la matrice  $A$  est diagonalisable, alors  $C_A$  l'est aussi.

*Démonstration.* Calculer les puissances de  $C_A$ . □

**Exercice 38** [ENS 2023 # 46] Soient  $A$  et  $B$  deux matrices de  $GL_2(\mathbb{R})$ . On suppose que  $ABA^{-1}B^{-1}$  commute avec  $A$  et  $B$ . Montrer que  $BA = \pm AB$ .

*Démonstration.*  $\Leftarrow$  Ok.

Si  $ABA^{-1}B^{-1}$  commute avec un Vect de dimension 2. Si  $AB = \lambda BA$ , c'est bon. Sinon, alors le commutant de  $ABA^{-1}B^{-1}$  est  $\text{Vect}(I_n, C)$ , donc  $B = \lambda A + \mu I_n$ , puis faire de la réduction. □

**Exercice 39** [ENS 2023 # 47] Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  et  $\lambda_1, \dots, \lambda_r$  les valeurs propres distinctes de  $A$  et  $\alpha_1, \dots, \alpha_r$  leurs multiplicités. On note  $P_k = (X - \lambda_k)^{\alpha_k}$  et  $F_k = \text{Ker } P_k(A)$ .

1. Montrer que  $\mathbb{C}^n = \bigoplus_{i=1}^r F_i$ .
2. Montrer que  $P_k$  est le polynôme caractéristique de l'endomorphisme induit par  $A$  sur  $F_k$ .
3. Montrer que  $A$  se décompose en  $D + N$ , avec  $D$  diagonalisable,  $N$  nilpotente et  $ND = DN$ .

*Démonstration.* Easy. □

**Exercice 40** [ENS 2023 # 48] Soient  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  et  $m$  la multiplicité de 0 dans  $\chi_A$ . On suppose que  $m \geq 1$ . Montrer l'équivalence entre

- $\text{Ker } A = \text{Ker } A^2$ .
- il existe  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  telle que  $M^m = A$ .
- pour tout  $k \geq 1$ , il existe  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  telle que  $M^k = A$ .

*Démonstration.*  $(iii) \Rightarrow (ii)$

$(iii) \Rightarrow (i)$  est simple, via les noyaux itérés.

$(i) \Rightarrow (iii)$  : Décomposition des noyaux, on est ramené au cas  $A$  inversible. !! □

**Exercice 41** [ENS 2023 # 49] Soit  $M \in GL_n(\mathbb{Z})$  dont toutes les valeurs propres sont de module  $\leq 1$ . Montrer qu'il existe  $k \geq 1$  tel que  $M^k - I_n$  soit nilpotente.

*Démonstration.* Il s'agit exactement de montrer que les valeurs propres de  $M$  sont des racines de l'unité.

Les  $\text{Tr } M^k$  prennent un nombre fini de valeurs, et par co-approximations, on peut tendre vers 1, donc c'est gagné. □

**Exercice 42** [ENS 2023 # 51] Soit  $n \geq 1$ . Pour  $\sigma \in \mathcal{S}_n$ , on note  $P_\sigma = (\delta_{i, \sigma(j)})_{i,j}$  la matrice de permutation associée. On note  $\mathcal{A}$  l'ensemble des fonctions polynomiales  $f: \mathcal{M}_n(\mathbb{C}) \rightarrow \mathbb{C}$  telles que  $\forall A, P \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}) \times GL_n(\mathbb{C}), f(PAP^{-1}) = f(A)$ . On note  $\mathcal{B}$  l'ensemble des fonctions polynomiales  $f: \mathcal{D}_n(\mathbb{C}) \rightarrow \mathbb{C}$  telles que  $f(P_\sigma D P_\sigma^{-1}) = f(D)$ . Expliciter un isomorphisme d'algèbres de  $\mathcal{A}$  sur  $\mathcal{B}$ .

*Démonstration.*  $\mathcal{B}$  est l'ensemble des polynômes symétriques. On a une application  $\mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ .

Elle est injective : si l'on coïncide sur les matrices diagonales, on coïncide sur les diagonalisables, donc par densité, sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ .

Elle est surjective : Si  $f$  est donné sur les  $\mathcal{D}_n$ , on montre que  $f$  est entièrement déterminée par  $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ . Par ailleurs,  $f$  est polynomiale en les  $\sigma_i$  (il faut travailler...).

Puis on peut définir  $f$  sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ , en prenant l'image des coefficients du polynôme caractéristique. □

**Exercice 43** DÉCOMPOSITION DE JORDAN [ENS 2023 # 52] Soient  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel non nul de dimension finie,  $f \in \mathcal{L}(E)$  nilpotent d'indice  $m, x \in E$  tel que  $f^{m-1}(x) \neq 0$ .

1. Montrer que la famille  $(f^k(x))_{0 \leq k \leq m-1}$  est libre. On note  $V$  le sous-espace de  $E$  engendré par cette famille.
2. Soit  $\varphi \in E^*$  telle que  $\varphi(f^{m-1}(x)) \neq 0, W$  le sous-espace de  $E^*$  engendré par  $(\varphi \circ f^i)_{0 \leq i \leq m-1}, W^\perp$  l'ensemble des  $y \in E$  tels que  $\forall \psi \in W^\perp, \psi(y) = 0$ . Montrer que  $W^\perp$  est un supplémentaire de  $V$  dans  $E$  stable par  $f$ .
3. Montrer qu'il existe une base de  $E$  dans laquelle la matrice de  $f$  soit diagonale par blocs, les blocs diagonaux étant de la forme  $J_k$  avec  $k \in \mathbb{N}^*,$  où  $J_k \in \mathcal{M}_k(\mathbb{K})$  est une matrice dont tous les coefficients sont nuls en dehors de ceux de la sur-diagonale qui sont égaux à 1.

*Démonstration.* □

**Exercice 44** [ENS 2023 # 53] Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -ev de dimension  $n \geq 1$ . Un élément  $u \in \mathcal{L}(E)$  est dit cyclique s'il existe  $x \in E$  tel que  $(u^k(x))_{0 \leq k \leq n-1}$  soit une base de  $E$ .

1. Quels sont les endomorphismes de  $E$  diagonalisables et cycliques ?
2. Montrer que si  $u$  est cyclique, le commutant de  $u$  est égale à  $\mathbb{K}[u]$ .
3. Montrer que si  $u \in \mathcal{L}(E)$ , il existe  $r \in \mathbb{N}^*$  et des sous-espaces  $E_1, \dots, E_r$  de  $E$  stables par  $u$  tels que  $E = \bigoplus_{i=1}^r E_i$  et que, pour tout  $i$ ,  $u_{E_i}$  soit cyclique.

*Démonstration.* Ok. □

**Exercice 45** [ENS 2023 # 54] Soient  $r \in \mathbb{N}^*, d_1, \dots, d_r$  des entiers supérieurs ou égaux à 2 tels que  $d_1 | d_2 | \dots | d_r$ . Déterminer le plus petit  $n \in \mathbb{N}^*$  tel que  $\text{GL}_n(\mathbb{C})$  contienne un sous-groupe isomorphe à  $\mathbb{Z}/d_1\mathbb{Z} \times \dots \times \mathbb{Z}/d_r\mathbb{Z}$ .

*Démonstration.*  $n = r$  convient. Réciproquement, si  $G$  contient un tel groupe, on peut codiagonaliser. □

**Exercice 46** [ENS 2023 # 55] Le groupe  $GL_2(\mathbb{Q})$  contient-il un élément d'ordre 5 ?

*Démonstration.* Montrer qu'une racine 5-ème de l'unité n'a pas de polynôme annulateur sur  $\mathbb{Q}$  de degré 2, c'est-à-dire que  $1 + \dots + X^4$  est irréductible. □

**Exercice 47** [ENS 2023 # 56] On note  $H$  l'ensemble des matrices de  $\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$  de trace nulle.

1. Montrer que  $\forall M \in H, e^M \in SL_2(\mathbb{R})$ .
2. Montrer que  $\forall M \in H, \text{Tr } e^M \geq -2$ .
3. A-t-on  $\exp(H) = SL_2(\mathbb{R})$  ?
4. Montrer que toute matrice de  $SL_2(\mathbb{R})$  est produit d'une matrice de  $SO_2(\mathbb{R})$  et d'une matrice triangulaire supérieure à coefficients diagonaux  $> 0$ .
5. En déduire que toute matrice de  $SL_2(\mathbb{R})$  est produit de deux exponentielles de matrices de  $H$ .

*Démonstration.* 1. □

2. C'est  $\frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2}$
3. Non, cf question précédente.
4. Partir d'une matrice de  $SL_2$ , et faire le produit.
5. Antisymétrique + triangulaire.

**Exercice 48** [ENS 2023 # 57] Soient  $E$  un espace vectoriel réel de dimension finie,  $h_1$  et  $h_2$  deux éléments de  $\mathcal{L}(E)$ . On suppose qu'il existe une norme sur  $E$  pour laquelle  $h_1$  et  $h_2$  sont des isométries et que  $[h_1, h_2] = h_1 h_2 h_1^{-1} h_2^{-1}$  commute avec  $h_1$  et  $h_2$ . Montrer que l'espace des vecteurs de  $E$  fixes par  $h_1$  et  $h_2$  admet un supplémentaire dans  $E$  stable par  $h_1$  et  $h_2$ .

*Démonstration.* On peut supposer que l'ensemble  $F$  des points fixes est de dimension 1. Donc est le noyau d'une forme linéaire  $\varphi$ .

Notons  $C$  le commutateur. On a  $C h_2 = h_1 h_2 h_1^{-1}$ .

Si  $h_1$  et  $h_2$  commutent.

Si  $h_1 = h_2$  !! □

**Exercice 49** [ENS 2023 # 58] Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  et  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  ses valeurs propres.

1. Montrer que  $\sum |\lambda_i|^2 \leq \sum_{i,j} |a_{ij}|^2$ .
2. Montrer que  $|\det A| \leq n^{n/2} \sup |a_{ij}|$ .

*Démonstration.* 1. !! □

2. IAG probablement.

**Exercice 50** [ENS 2023 # 59] Soient  $(E, \langle \rangle)$  un espace euclidien,  $m \in \mathbb{N}^*, u_1, \dots, u_m, v_1, \dots, v_m$  des vecteurs de  $E$  tels que, pour tout  $(i, j) \in \llbracket 1, m \rrbracket^2, \langle u_i, v_j \rangle = \delta_{i,j}$ . On note  $p$  le projecteur orthogonal de  $E$  sur  $\text{Vect}(u_1, \dots, u_m)$ . Montrer que  $\forall x \in E, \sum_{i=1}^m \langle u_i, x \rangle \langle x, p(v_i) \rangle = \|p(x)\|^2$ .

*Démonstration.* Easy, on a  $\langle x, p(v_i) \rangle = \langle p(x), v_i \rangle = \langle u_i, x \rangle$ . □

**Exercice 51** [ENS 2023 # 60] On munit  $\mathbb{R}[X]$  du produit scalaire  $(P, Q) \mapsto \langle P, Q \rangle = \int_0^{+\infty} P(t)Q(t)e^{-t} dt$ . On pose  $F = \text{Vect}(X, X^2, \dots, X^n)$  et on note  $Q$  la projection orthogonale de 1 sur  $F$ .

On écrit  $Q = -\sum_{k=1}^n a_k X^k$  et  $P = 1 + \sum_{k=1}^n a_k (X+1) \dots (X+k)$ .

- Déterminer  $\langle Q - 1, X^k \rangle$  pour  $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$  et montrer que  $P(k) = 0$  pour  $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$ .
- Calculer  $\inf_{(a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{R}^n} \int_0^{+\infty} (1 + a_1 x + \dots + a_n x^n)^2 e^{-x} dx$ .

*Démonstration.* 1. Cela vaut 0. Découle des relations intégrales.

2. Cela vaut  $\langle 1 - Q, 1 - Q \rangle = \langle 1 - Q, 1 \rangle = \int (1 + \sum a_i x^i) e^{-x} dx$ . C'est une fonction des  $a_i$ , et la question 1 permet de conclure, peut-être. □

**Exercice 52** [ENS 2023 # 61] Soient  $(E, \langle \rangle)$  un espace euclidien,  $m \in \mathbb{N}^*$  et  $u, u_1, \dots, u_m$  des vecteurs de  $E$ . Montrer que  $u \in \mathbb{R}^+ u_1 + \dots + \mathbb{R}^+ u_m$  si et seulement si pour tout  $x \in E, \{x \in E; \forall i \in \llbracket 1, m \rrbracket, \langle u_i, x \rangle \leq 0\} \subset \{x \in E; \langle u, x \rangle \leq 0\}$ .

*Démonstration.*  $\Rightarrow$  : Easy.

$\Leftarrow$  : Si les vecteurs  $u_i$  sont libres, on peut prendre un élément  $x$  orthogonal à tous sauf 1.

Sinon, si  $u_m$  est combinaison linéaire des précédents, avec un coefficient  $< 0$ .!!

□

**Exercice 53** [ENS 2023 # 62] Montrer que, si  $M \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$ ,  $M$  s'écrit d'une unique façon  $QR$  avec  $Q \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$  et  $R \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  triangulaire supérieure à termes diagonaux dans  $\mathbb{R}^{+*}$ .

*Démonstration.* C'est GS.

□

**Exercice 54** [ENS 2023 # 63] [Rennes sur dossier] Soit  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  une matrice antisymétrique et inversible.

- Que peut-on dire de l'entier  $n$ ?
- En considérant  $M^2$ , montrer que  $M$  admet un plan stable puis qu'il existe une matrice orthogonale  $O \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$  telle que  $O^T M O$  soit une matrice diagonale par blocs de la forme  $\text{diag}(R_{a_1}, \dots, R_{a_k})$ , avec  $R_a = \begin{pmatrix} 0 & -a \\ a & 0 \end{pmatrix}$ .
- Qu'en est-il si  $M$  n'est plus supposée inversible?

*Démonstration.* 1. pair.

2.  $M^2$  est symétrique donc diagonalisable. Alors si  $X$  est valeur propre,  $X, MX$  est stable.

3. On rajoute le noyau.

□

**Exercice 55** [ENS 2023 # 64] Soit  $n \geq 1$ . Déterminer les matrices  $A$  dans  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  telles que  $A + A^k = A^T$  pour tout entier  $k \geq n$ .

*Démonstration.* On a  $A$  et  $A^T$  cotrigonalisable, donc  $\lambda \mapsto \lambda + \lambda^k$  est une bijection sur les valeurs propres. La seule possibilité est que  $A$  soit nilpotente, donc symétrique.

□

**Exercice 56** [ENS 2023 # 65] Soient  $A \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$  et  $M$  une matrice de réflexion dans  $\mathcal{O}_{n+1}(\mathbb{R})$ . On pose  $A' = M \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & A \end{pmatrix}$ . Calculer  $\chi_{A'}(1)$  en fonction de la première colonne de  $M$  et de  $\chi_A$ .

*Démonstration.*  $\chi_{A'}(1) = \det(I_{n+1} - M \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & A \end{pmatrix})$ .!!

□

**Exercice 57** [ENS 2023 # 66] Soit  $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$  ayant  $n$  valeurs propres distinctes. Soit  $v \in \mathbb{R}^n$ . On suppose que  $A$  et  $A + vv^T$  n'ont pas de valeur propre commune. Sous réserve d'existence, on pose  $F(x) = 1 + v^T(A - xI_n)^{-1}v$  pour  $x$  réel.

- Montrer que les zéros de  $F$  sont les valeurs propres de  $A + vv^T$ .
- On note  $\lambda_1 < \dots < \lambda_n$  les valeurs propres de  $A$ . Montrer que chaque intervalle  $]\lambda_1, \lambda_2[ \dots ]\lambda_{n-1}, \lambda_n[ , ]\lambda_n, +\infty[$  contient exactement une valeur propre de  $A + vv^T$ .

*Démonstration.* !!

□

**Exercice 58** [ENS 2023 # 67] Soient  $n \in \mathbb{N}$  impair,  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  telle que, pour toute  $A \in \mathcal{A}_n(\mathbb{R})$ ,  $A + M$  soit non inversible. Montrer que  $M \in \mathcal{A}_n(\mathbb{R})$ .

*Démonstration.* Par récurrence. On considère une matrice  $A = \begin{pmatrix} 0 & h & 0 \\ -h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A' \end{pmatrix}$ , avec  $h$  petit et  $A'$  fixé. Le terme en  $h^2$  est  $h^2 \det(M' + A')$ .

□

**Exercice 59** [ENS 2023 # 68] Soient  $A, B$  deux matrices de  $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$  qui n'ont pas -1 pour valeur propre et telles que  $AB$  n'ait pas 1 pour valeur propre. Montrer que  $(A - I_n)(BA - I_n)^{-1}(B - I_n)$  est antisymétrique.

*Démonstration.* Classique

□

**Exercice 60** [ENS 2023 # 69] Soit  $n \in \mathbb{N}^*$ . On pose  $J = \begin{pmatrix} 0_n & -I_n \\ I_n & 0_n \end{pmatrix}$ .

- Déterminer les valeurs propres de  $J$  et leur multiplicité.
- Soit  $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ . Montrer qu'il existe une matrice  $B \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$  telle que  $B^2 = A$ .
- Que peut-on dire de la matrice  $BJB$ ?
- Lorsque  $A$  est diagonale, calculer les valeurs propres de  $JA$ .
- Montrer plus généralement que toute valeur propre d'une matrice antisymétrique réelle est imaginaire pure.

**Exercice 61** [ENS 2023 # 70] Soit  $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ . On note  $\lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_n$  les valeurs propres de  $A$  non nécessairement distinctes. Montrer que  $\forall k \in \llbracket 1, n \rrbracket, \sum_{i=1}^k \lambda_i \leq \sum_{i=1}^k a_{i,i} \leq \sum_{i=1}^k \lambda_{n+1-i}$ .

*Démonstration.* !!

□

**Exercice 62** [ENS 2023 # 71] 1. Soient  $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$  et  $B \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$  Montrer que  $AB$  est diagonalisable à valeurs propres positives ou nulles.

2. Soient  $A, B \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ . On pose  $f_{A,B} : X \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R}) \mapsto \text{Tr}(AX) + \text{Tr}(BX^{-1})$ . Montrer que  $f_{A,B}$  admet un minimum  $\mu_{A,B}$  atteint en une unique matrice  $M_{A,B}$ . Expliciter  $\mu_{A,B}$  et  $M_{A,B}$ .

*Démonstration.*

□

**Exercice 63** [ENS 2023 # 72] Soit  $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ . On définit  $p(A)$  comme la dimension maximale d'un sous-espace  $V$  sur lequel  $\forall x \in V \setminus \{0\}, \langle Ax, x \rangle > 0$ . On définit de même  $q(A)$  avec la condition  $\langle Ax, x \rangle < 0$ .

- Montrer que  $p(A) + q(A) = \text{rg } A$ .
- Montrer que, si  $A$  est inversible, alors  $p$  et  $q$  sont constantes sur un voisinage de  $A$  dans  $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ .
- Soit  $B \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ , on suppose que  $f : t \mapsto \det(A + tB)$  n'a que des racines simples sur  $\mathbb{R}$ . Montrer que  $f$  admet au moins  $|p(B) - q(B)|$  racines dans  $\mathbb{R}$ .

**Exercice 64** [ENS 2023 # 73] On note  $\lambda_1(M) \leq \dots \leq \lambda_n(M)$  le spectre ordonné d'une matrice  $S$  de  $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ .

- Soient  $A$  et  $B$  dans  $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$  telles que  $A + B \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ . Si  $1 \leq i, j \leq n$  et  $i + j \geq n + 1$ , que dire du signe de  $\lambda_i(A) + \lambda_j(B)$ ?

Soient  $a \leq b$  deux réels, et  $(O_i)_{i \in I}$  une famille d'ouverts de  $\mathbb{R}$  telle que  $[a, b] \subset \bigcup_{i \in I} O_i$ . On note  $X$  l'ensemble des  $x \in [a, b]$  tels qu'il existe une partie finie  $J \subset I$  vérifiant  $[a, x] \subset \bigcup_{j \in J} O_j$ . Montrer que  $X = [a, b]$ .

**Exercice 65** [ENS 2023 # 74] Pour  $M \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ , on note  $\lambda_1(M) \leq \dots \leq \lambda_n(M)$  le spectre ordonné de  $M$ .

1. On considère  $A, B \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$  telles que  $A + B \in \mathcal{S}_n^{--}(\mathbb{R})$ . Montrer que, si  $i + j < n + 2$  alors  $\lambda_i(A) + \lambda_j(B) < 0$ .
2. Généraliser à  $A_1, \dots, A_d \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$  telles que  $A_1 + \dots + A_d \in \mathcal{S}_n^{--}(\mathbb{R})$ . telle que  $B = P^T A P$ .

*Démonstration.* □

**Exercice 66** [ENS 2023 # 75] On note  $\|\cdot\|$  la norme d'opérateur sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  associée à la norme euclidienne. Soit  $S \in \mathcal{S}_n$ . On suppose que  $E = \{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mid S = M^T M - M M^T\}$  est non vide. On note  $\gamma(S) = \inf_{M \in E} \|M\|^2$ . Montrer que  $\|S\| \leq \gamma(S) \leq 2\|S\|$ .

**Exercice 67** [ENS 2023 # 76] 1. Soient  $A, B \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ . Montrer qu'il existe  $P \in GL_n(\mathbb{R})$  telle que  $B = P^T A P$ .

2. Soit  $f$  une fonction de  $\mathbb{R}^{++}$  dans  $\mathbb{R}$ . Proposer une définition naturelle de  $f(A)$  si  $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ .
3. Pour  $A$  et  $B$  dans  $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ , on pose  $d(A, B) = \left\| \ln \left( \sqrt{A^{-1}} B \sqrt{A^{-1}} \right) \right\|$ . Justifier la définition, et montrer que  $d$  est une distance sur  $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ .
4. Soient  $P \in GL_n(\mathbb{R})$ ,  $A, B \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ . Montrer que  $d(P^T A P, P^T B P) = d(A, B)$ .

*Démonstration.* □

**Exercice 68** [ENS 2023 # 77] Soit  $n \in \mathbb{N}^*$ .

1. Montrer que  $(X, Y) \mapsto \text{Tr } X^T Y$  est un produit scalaire sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ . On note  $\|\cdot\|$  la norme associée.
2. Si  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ , soit  $L(M) : X \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mapsto M X$ . Montrer que  $L$  est un morphisme d'algèbre injectif.
3. Soit  $\|\cdot\|_2$  la norme sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  subordonnée à la norme euclidienne de  $\mathbb{R}^n$ , et  $\|\cdot\|$  la norme sur  $\mathcal{L}(\mathcal{M}_n(\mathbb{R}))$  subordonnée à  $\|\cdot\|_2$ . Si  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ , montrer que  $\|L(M)\| \leq \|M\|_2$ .
4. Montrer que  $\|M^T\|_2 = \|M\|_2$  pour tout  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ .

**Exercice 69** [ENS 2023 # 78] On note  $\|\cdot\|$  la norme d'opérateur sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  associée à la norme  $X \mapsto \sqrt{X^T X}$ .

1. Soient  $A, B$  dans  $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ . Montrer que  $\|e^{iA} - e^{iB}\| \leq \|A - B\|$ .
2. Démontrer le même résultat sous l'hypothèse que  $A$  et  $B$  sont deux matrices de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  telles que  $\bar{A}^T = A$  et  $\bar{B}^T = B$ .

*Démonstration.* □

## 2) Analyse

**Exercice 70** [ENS 2023 # 79] Soit  $p > 1$ . On pose, pour  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $\|x\| = (\sum_{i=1}^n |x_i|^p)^{1/p}$ .

1. Montrer qu'il s'agit bien d'une norme.
2. Montrer l'inégalité de Hölder.
3. Dans  $\mathbb{R}^2$ , dessiner la boule unité de la norme  $p$  pour plusieurs valeurs de  $p$ .

**Exercice 71** [ENS 2023 # 80] Soient  $a \leq b$  deux réels, et  $(O_i)_{i \in I}$  une famille d'ouverts de  $\mathbb{R}$  telle que  $[a, b] \subset \bigcup_i O_i$ . On note  $X$  l'ensemble des  $x \in [a, b]$  tels qu'il existe une partie finie  $J \subset I$  telle que  $[a, x] \subset \bigcup_{j \in J} O_j$ . Montrer que  $X = [a, b]$ .

**Exercice 72** [ENS 2023 # 81] Soient  $K$  un compact convexe non vide d'un espace norme  $E$ ,  $f$  un endomorphisme continu de  $E$  tel que  $f(K) \subset K$ . Montrer que  $f$  admet un point fixe dans  $K$ .

**Exercice 73** [ENS 2023 # 82] Peut-on écrire  $]0, 1[$  comme réunion dénombrable disjointe de segments d'intérieurs non vides?

*Démonstration.* Non. Par l'absurde, on fait de la dichotomie, entre des segments, dont la distance tend vers 0, alors la limite n'appartient à aucun segment. □

**Exercice 74** [ENS 2023 # 83] Pour tout réel  $x$  dans  $[0, 1[$ , on note  $0, x_1 x_2 x_3 \dots$  le développement décimal propre de  $x$ . On pose, pour tout  $n \in \mathbb{N}^*$ ,  $S_n(x) = \sum_{i=1}^n x_i$ . Soit  $a$  un réel tel que  $0 < a < 9$ . On définit  $P_n = \{x \in [0, 1[; S_n(x) \leq na\}$  et  $P = \bigcap_{n \in \mathbb{N}^*} P_n$ . Montrer que  $P$  est compact, non vide, d'intérieur vide et sans point isolé.

*Démonstration.*  $P$  est borné et fermé, car  $S_n$  est continue inférieurement. Clairement non vide et d'intérieur vide. Si  $x \in P$ , en retirant 1 à un chiffre de  $x$  arbitrairement grand, on reste dans  $P$ . Possible sauf si  $x$  est décimal, auquel cas on peut ajouter 1. □

**Exercice 75** [ENS 2023 # 84] Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ , ou  $\mathbb{K} = \mathbb{R}$  ou  $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ . Montrer que la classe de similitude de  $A$  est fermée si et seulement si  $A$  est diagonalisable sur  $\mathbb{C}$ .

**Exercice 76** [ENS 2023 # 85] • On note  $D$  le disque unite du plan euclidien  $\mathbb{R}^2$ . Démontrer qu'il existe une suite  $(C - i \in \mathbb{N}$  de parties de  $D$  telle que :

- ▷ pour tout  $i \in \mathbb{N}$ , l'ensemble  $C_i$  soit un carre de  $\mathbb{R}^2$  dont les cotes sont paralleles aux axes ;
- ▷ les  $C_i$  soient d'interieurs deux a deux disjoints ;
- ▷  $\sum_{i \in \mathbb{N}} \text{Aire}(C_i) = \pi$ .

• On note  $C = [-1, 1]^2$ . Démontrer qu'il existe une suite  $(D - i \in \mathbb{N}$  de parties de  $C$  telle que :

- ▷ pour tout  $i \in \mathbb{N}$ , l'ensemble  $D_i$  soit un disque ferme de  $\mathbb{R}^2$  ;
- ▷ les  $D_i$  soient d'interieurs deux a deux disjoints ;
- ▷  $\sum_{i \in \mathbb{N}} \text{Aire}(D_i) = 4$ .

**Exercice 77** [ENS 2023 2023 # 86] Soit  $d \geq 1$ . On note  $\mathcal{P}$  l'ensemble des polynômes unitaires de degré  $d$  de  $\mathbb{R}[X]$ .

1. On pose  $A = \{(P, x) \in \mathcal{P} \times \mathbb{R}; P(x) = 0\}$  et  $P'(x) \neq 0\}$ . Déterminer les composantes connexes par arcs de  $A$  dans  $\mathbb{R}_d[X] \times \mathbb{R}$ .
2. On pose  $B = \{P \in \mathcal{P}; \forall x \in \mathbb{R}, P(x) \neq 0 \text{ ou } P'(x) \neq 0\}$ . Déterminer les composantes connexes par arcs de  $B$  dans  $\mathbb{R}_d[X]$ .

*Démonstration.* 1. Par translation, on peut passer de  $(P, x)$  à  $(\tilde{P}, 0)$ . Alors  $P = X^n + Q + \alpha X$ , avec  $\alpha \neq 0$ . On peut ramener  $Q$  à 0, et  $\alpha$  à  $\pm 1$ . Deux composantes connexes, selon le signe de  $\alpha = P'(x)$ .

2.  $B$  est l'ensemble des polynômes unitaires à racines simples. Le nombre de racines simples est un invariant, et réciproquement, ces morceaux sont clairement connexes par arcs.  $\square$

**Exercice 78** [ENS 2023 # 87] Soient  $(M_k)_{k \geq 1}$  une suite de matrices de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  semblables les unes aux autres,  $\|\cdot\|$  une norme sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ . On suppose que  $\|M_k\| \rightarrow +\infty$ . Montrer qu'il existe une matrice  $N \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  nilpotente et une extractrice  $\varphi: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  telles que  $\frac{M_{\varphi(k)}}{\|M_{\varphi(k)}\|} \rightarrow N$ .

*Démonstration.* On peut extraire  $\frac{M_{\varphi(k)}}{\|M_{\varphi(k)}\|}$  convergent, vers  $\Pi$ .

Si  $\Pi$  a une valeur propre complexe  $X$ , comme  $\left\| \frac{M_{\varphi(k)}}{\|M_{\varphi(k)}\|} - \Pi \right\| \leq \varepsilon$ , on a une valeur propre complexe proche de  $\lambda$ , donc  $M_{\varphi(k)}$  a une valeur propre qui tend vers  $+\infty$ .  $\square$

**Exercice 79** [ENS 2023 # 88] Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  dont toutes les valeurs propres sont de module  $< 1$ . Montrer qu'il existe une norme  $\|\cdot\|$  sur  $\mathbb{C}^n$  telle que, pour la norme d'opérateur associée, on ait  $\|A\| < 1$ .

*Démonstration.* Trigonaliser, puis conjuguer par une matrice diagonale pour n'avoir que des petits coefficients hors de la diagonale.  $\square$

**Exercice 80** [ENS 2023 # 89] Soient  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ , de lignes  $L_1, \dots, L_n$ , et  $\varepsilon \in \mathbb{R}^{+*}$ . On suppose que, pour tout  $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ ,  $\|L_i\|_2 = 1$  et la distance euclidienne canonique de  $L_i$  au sous-espace engendré par les  $L_j$ , pour  $j \neq i$ , est supérieure ou égale à  $\varepsilon$ . Montrer que  $A$  est inversible et que  $\sup \{\|A^{-1}x\|_2; x \in \mathbb{R}^n, \|x\|_1 = 1\} \leq \frac{1}{\varepsilon}$ .

*Démonstration.*  $A$  est inversible car aucune ligne n'est combinaison linéaire des autres.

Si  $x = E_i$ , on considère les colonnes de  $A^{-1}$ , notées  $C_i$ . On  $\langle C_i, L_i \rangle = 1$  et  $C_i$  orthogonal aux autres lignes, ce qui donne  $\|C_i\|_2 \leq \frac{1}{\varepsilon}$ , peut-être.

Ensuite, utiliser une convexité?  $\square$

**Exercice 81** [ENS 2023 # 90] On note  $\mathcal{B}(\mathbb{R})$  l'espace vectoriel des fonctions bornées de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}$ , muni de la norme  $\|\cdot\|_\infty$ . On fixe  $g \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$  non nulle a support compact, et on note  $W(g)$  l'espace vectoriel engendré par les fonctions  $x \mapsto g(x - n)$ ,  $n$  décrivant  $\mathbb{Z}$ . Montrer que l'ensemble des réels  $t$  tels que  $\{x \mapsto f(x - t), f \in \overline{W(g)}\} = \overline{W(g)}$  est un sous-groupe discret de  $\mathbb{R}$ .

**Exercice 82** [ENS 2023 # 91] Soient  $(a_n)$  et  $(b_n)$  deux suites réelles de limite 1 et  $(u_n)$  une suite réelle strictement positive telle que, pour tout  $n$ ,  $u_{n+2} = a_{n+1}u_{n+1} + b_{n+1}u_n$ . On pose, pour  $n \in \mathbb{N}$ ,  $v_n = \frac{u_{n+1}}{u_n}$  et  $w_n = \frac{\ln(u_n)}{n}$ . Montrer que les suites  $(v_n)$  et  $(w_n)$  convergent.

*Démonstration.* Soit  $m$ . On peut écrire  $u_{a+n} = G_n u_a + G_{n+1} u_{a-1}$  et  $u_{a+n+1} = G_{n+1} u_a + G_{n+2} u_{a-1}$ , où  $G_n \xrightarrow{a \rightarrow +\infty} F_n$ , ce qui devrait impliquer ce que l'on veut.

$w_n$  s'obtient à partir de  $v_n$  par Césaro.  $\square$

**Exercice 83** [ENS 2023 2023 # 92] 1. Si  $n \geq 2$  est un entier, montrer que  $\sum_{k=2}^n \lfloor \log_k(n) \rfloor = \sum_{j=2}^n \lfloor \sqrt[j]{n} \rfloor$ .

2. Donner un équivalent lorsque  $n$  tend vers  $+\infty$  de  $\sum_{k=2}^n \lfloor \log_k(n) \rfloor$ , puis un développement asymptotique à deux termes.

*Démonstration.* 1. Le premier compte les puissances de  $k$  inférieures à  $n$ , dont  $k^1$ .

Le second compte les puissances  $j$ -èmes inférieures à  $n$ .

2. En coupant la somme en  $k = \sqrt{n}$ , on a du  $\sqrt{n} \ln n + (n - \sqrt{n})n$ , d'où un équivalent à  $n$ .

En suite, on prend l'autre expression, on retire  $n$ . Le premier terme est  $\sqrt{n}$ . Les termes non nuls correspondent à  $\sqrt[j]{n} \geq 2 \Leftrightarrow n \geq 2^j$ , donc les autres termes sont au plus en  $\sqrt[3]{n} \ln n$ , d'où le DSA  $n + \sqrt{n} + o_{+\infty}(\sqrt{n})$ .  $\square$

**Exercice 84** [ENS 2023 # 93] Soient  $\alpha > 0$  et  $(a - n \in \mathbb{N}$  une suite strictement décroissante a valeurs dans  $]0, 1[$ . Soit  $(u - n \in \mathbb{N}$  une suite définie par  $u_0 > 0$  et  $\forall n \in \mathbb{N}, u_{n+1} = u_n(u_n^\alpha + a_n)$ . Montrer qu'il existe un unique  $u_0 > 0$  tel que la suite  $(u - n \in \mathbb{N}$  converge vers un réel strictement positif.

**Exercice 85** [ENS 2023 # 94] Soit  $(u_n)$  une suite définie par :  $\forall n \in \mathbb{N}^*, u_n = \sin(\ln n)$ . On note  $V$  l'ensemble des valeurs d'adhérence de  $(u_n)$ .

- Montrer que, pour tous  $x$  et  $y \in \mathbb{R}$ ,  $\sin x - \sin y = 2 \sin \frac{x-y}{2} \cos \frac{x+y}{2}$ .
- Montrer que  $u_{n+1} - u_n \rightarrow 0$ .
- Montrer que  $V$  est un intervalle inclus dans  $[-1, 1]$ , puis que  $V = [-1, 1]$ .

**Exercice 86** [ENS 2023 # 95] Si  $A$  est une partie de  $\mathbb{N}^*$ , on dit que  $A$  admet une densité si la suite  $\left(\frac{|A \cap [1, n]|}{n}\right)_{n \geq 1}$  admet une limite. Cette limite est alors notée  $d(A)$ .

- Si  $m \in \mathbb{N}^*$ , quelle est la densité de l'ensemble des multiples de  $m$  dans  $\mathbb{N}^*$  ?
- Soient  $A$  et  $B$  deux parties disjointes de  $\mathbb{N}^*$  admettant une densité. Montrer que  $A \cup B$  admet une densité que l'on précisera.
- Donner un exemple de partie de  $\mathbb{N}^*$  n'admettant pas de densité.

**Exercice 87** [ENS 2023 # 96] On considère une suite  $a \in \{2, 3\}^{\mathbb{N}^*}$  telle que  $a_1 = 2$  et, pour tout  $n \geq 1$ , le nombre de 3 apparaissant dans la suite  $a$  entre la  $n$ -ième occurrence de 2 et la  $(n+1)$ -ième occurrence de 2 soit égal à  $a_n$ .

Étudier la convergence de la suite de terme général  $\frac{1}{n} |\{k \in [1, n], a_k = 3\}|$ .

**Exercice 88** [ENS 2023 # 97] On considère une suite  $a \in \{2, 3\}^{\mathbb{N}^*}$  telle que  $a_1 = 2$  et, pour tout  $n \geq 1$ , le nombre de 3 apparaissant dans la suite  $a$  entre la  $n$ -ième occurrence de 2 et la  $(n+1)$ -ième occurrence de 2 soit égal à  $a_n$ . Montrer qu'il existe un unique irrationnel  $\alpha$  tel que les indices  $n \geq 1$  tels que  $a_n = 2$  soient exactement les entiers de la forme  $\lfloor m\alpha \rfloor + 1$  pour un  $m \in \mathbb{N}$ .

*Démonstration.* □

**Exercice 89** [ENS 2023 # 98] Une suite réelle  $(x_n)$  est dite équirépartie modulo 1 si elle vérifie, pour tout entier  $k \in \mathbb{Z}^*$ ,  $\lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{2\pi i k x_n} = 0$ .

1. Soit  $\alpha \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ . Montrer que la suite  $(n\alpha)$  est équirépartie modulo 1.
2. Soit  $(x_n) \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}^*}$ . On suppose que pour tout  $h \in \mathbb{N}^*$ , la suite  $(x_{n+h} - x_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$  est équirépartie ; on veut montrer que  $(x_n)$  est équirépartie modulo 1.
  - a) Soit  $(a_n)$  une suite de complexes de module  $\leq 1$ . Montrer, pour tous  $N, H \in \mathbb{N}^*$  :  $\left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_n \right| \leq \left| \frac{1}{H} \sum_{h=0}^{H-1} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_{n+h} \right| + \frac{2H}{N}$ .
  - b) Montrer que  $\left| \frac{1}{H} \sum_{h=0}^{H-1} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_{n+h} \right| \leq \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \sum_{h=0}^{H-1} \frac{a_{n+h}}{H} \right|^2}$ .
  - c) Conclure.
3. Soit  $P \in \mathbb{R}[X]$  non constant et de coefficient dominant irrationnel. Montrer que  $(P(n))_{n \geq 1}$  est équirépartie modulo 1.
4. Soit  $(x_n)_{n \geq 1}$  une suite réelle équirépartie modulo 1, et  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$  une fonction continue 1-périodique. Montrer que  $\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f(x_k) \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \int_0^1 f$ .
5. On reprend les hypothèses de la question 3. Montrer que la distance de  $P(\mathbb{Z})$  à  $\mathbb{Z}$  est nulle.

*Démonstration.* 1. □

- 2.
- 3.
- 4.
5. ??

**Exercice 90** [ENS 2023 # 99] Soit  $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction continue. Pour  $n \in \mathbb{N}$  avec  $n \geq 2$ , on note  $A_n$  la matrice

$$\begin{pmatrix} 0 & a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_1 & 0 & a_2 & \ddots & \vdots \\ 0 & a_2 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & a_{n-1} \\ 0 & \cdots & 0 & a_{n-1} & 0 \end{pmatrix} \text{ ou, pour tout } k \in [1, n-1], a_k = f\left(\frac{k}{n}\right).$$

Soit  $q \in \mathbb{N}^*$ . Déterminer la limite de  $(\text{tr}(A_n^q))_{n \geq 2}$ .

**Exercice 91** [ENS 2023 # 100] Montrer la convergence et calculer  $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{k} \left\lfloor \frac{\ln(k)}{\ln(2)} \right\rfloor$ .

*Démonstration.* Écrit quelque part... □

**Exercice 92** [ENS 2023 # 101] On note  $\ell^2(\mathbb{R})$  l'ensemble des suites réelles de carré sommable indexées par  $\mathbb{N}$ . On se donne une suite presque nulle  $v \in \mathbb{R}^{(\mathbb{N})}$  ainsi qu'une suite  $(u_k)_k$  d'éléments de  $\ell^2(\mathbb{R})$  (l'élément  $u_k$  est donc noté  $(u_{k,i})_{i \in \mathbb{N}}$ ). On suppose que, pour tout entier  $p \geq 2$ , la suite de terme général  $w_k = \sum_{n=0}^{+\infty} (u_{k,n})^p$  converge vers  $\sum_{n=0}^{+\infty} (v_n)^p$ . Montrer que  $\inf_{\sigma \in \mathfrak{S}(\mathbb{N})} \sum_{n=0}^{+\infty} (u_{k,\sigma(n)} - v_n)^2 \xrightarrow[k \rightarrow +\infty]{} 0$ .

*Démonstration.* Écrit quelque part... □

On peut supposer que les  $(v_n)$  sont décroissants, par réordonnement.

**Exercice 93** [ENS 2023 # 102] Soit  $f$  la fonction de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}$  nulle sur  $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$  et telle que  $f\left(\frac{p}{q}\right) = \frac{1}{q}$  si  $p \in \mathbb{Z}$  et  $q \in \mathbb{N}^*$  sont premiers entre eux. Quels sont les points de continuité de  $f$  ?

*Démonstration.* Facile. □

**Exercice 94** [ENS 2023 # 103] Soient  $I$  un intervalle ouvert,  $f: I \rightarrow \mathbb{R}$  dérivable et  $[a, b] \subset I$  avec  $a < b$ . On suppose que  $f'(a) = f'(b)$ . Montrer qu'il existe  $c \in ]a, b[$  tel que la tangente au graphe de  $f$  en  $c$  passe par le point  $(a, f(a))$ .

*Démonstration.* On peut supposer  $f'(a) = f'(b) = 0$ . À relier. □

**Exercice 95** [ENS 2023 # 104] Construire une fonction continue de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}$  qui ne soit dérivable en aucun point.

**Exercice 96** [ENS 2023 # 105] Déterminer les applications  $f$  de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}$  telles que, pour tout entier  $n \geq 2$ ,  $f^n$  (puissance) soit polynomiale.

*Démonstration.*  $f^2$  et  $f^3$  polynomiales, donc  $f$  est une fraction rationnelle,  $f \in \mathbb{Q}(x)$  et  $f^2 \in \mathbb{Q}[X]$  impliquent  $f \in \mathbb{Q}[X]$ . □

**Exercice 97** [ENS 2023 # 106] Soit  $p > 1$  un réel. Montrer qu'il existe une constante  $k_p > 0$  telle que, pour tout  $(x, y) \in \mathbb{R}^2$  tel que  $|x|^p + |y|^p = 2$ , on ait  $(x - y)^2 \leq k_p(4 - (x + y)^2)$ .

**Exercice 98** [ENS 2023 # 107] Soit  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ . On note  $f^*(s) = \sup_{x \in \mathbb{R}} (sx - f(x))$  et  $f^*(x) = \sup_{s \in \mathbb{R}} (sx - f^*(s))$ . Montrer que  $f^*(x) = \sup_{a \text{ affine } \leq f} a(x)$ .

**Exercice 99** [ENS 2023 # 108] Soient  $I$  un ensemble fini et  $(P - i \in I \text{ une famille de polynômes réels stable par dérivation. On définit une fonction signe par } \text{sign}(x) = \frac{x}{|x|} \text{ si } x \neq 0 \text{ et } \text{sign}(0) = 0.$

Pour  $\varepsilon \in \{-1, 1, 0\}^I$ , soient  $A_\varepsilon = \{t \in \mathbb{R}; \forall i \in I, \text{sign}(P_i(t)) = \varepsilon(i)\}$  et  $B_\varepsilon = \{t \in \mathbb{R}; \forall i \in I, \text{sign}(P_i(t)) \in \{\varepsilon(i), 0\}\}$ .

- Montrer que  $A_\varepsilon$  est soit vide, soit réduit à un point, soit un intervalle ouvert.
- Si  $A_\varepsilon$  est non vide, montrer que  $B_\varepsilon$  est l'adhérence de  $A_\varepsilon$ . Si  $A_\varepsilon$  est vide, montrer que  $B_\varepsilon$  est soit vide soit un singleton.

**Exercice 100** [ENS 2023 # 109] Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$  et  $f: I \rightarrow \mathbb{R}$  de classe  $\mathcal{C}^n$ .

- Soient  $x_0, \dots, x_n$  des points de  $I$ . On note  $V(x_0, \dots, x_n)$  le déterminant de Vandermonde associé à  $(x_0, \dots, x_n)$ . Montrer qu'il existe  $\tau \in I$  tel que

$$\begin{vmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \cdots & x_0^{n-1} & f(x_0) \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{n-1} & f(x_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^{n-1} & f(x_n) \end{vmatrix} = \frac{f^{(n)}(\tau)}{n!} V(x_0, x_1, \dots, x_n)$$

- On suppose que  $n = 2$ , que  $I$  est un segment et que  $f$  est strictement convexe. On note  $\Gamma_f = \{(x, f(x)); x \in I\} \subset \mathbb{R}^2$  le graphe de  $f$ . Montrer qu'il existe une constante  $C$ , dépendant uniquement de  $I$  et  $f$ , telle que le nombre de points de  $\Gamma_f \cap \frac{1}{N} \mathbb{Z}^2$  soit majoré par  $C N^{2/3}$  pour tout entier  $N \geq 1$ .

**Exercice 101** [ENS 2023 # 110] Pour  $n \in \mathbb{N}$ , on pose  $w_n = \int_0^{\pi/2} \cos^n(x) dx$ .

- Montrer que  $(w_n)_{n \geq 0}$  est décroissante.
- Établir une relation de récurrence entre  $w_{n+2}$  et  $w_n$ .
- Sans utiliser la formule de Stirling, déterminer un équivalent simple de  $w_n$ .
- Déterminer le rayon de convergence de la série entière  $\sum w_n x^n$ .

**Exercice 102** THÉORÈME DE ROUCHÉ [ENS 2023 # 111] Soit  $P \in \mathbb{C}[X]$  ne s'annulant pas sur  $\mathbb{U}$ .

1. Montrer que le nombre de racines de  $P$  de module strictement inférieur à 1 comptées avec multiplicité n'est autre que  $\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{it} P'(e^{it})}{P(e^{it})} dt$ .
2. Soit  $Q \in \mathbb{C}[X]$  ne s'annulant pas sur  $\mathbb{U}$  et tel que  $\forall z \in \mathbb{U}, |P(z) - Q(z)| < |Q(z)|$ . Montrer que  $P$  et  $Q$  ont même nombre de racines de module strictement inférieurs à 1 comptées avec multiplicité.

*Démonstration.* □

**Exercice 103** [ENS 2023 # 112] Pour  $n \in \mathbb{N}$ , on note  $A_n = \int_0^{\pi/2} \cos^{2n}(x) dx$  et  $B_n = \int_0^{\pi/2} x^2 \cos^{2n}(x) dx$ . On admet que, pour  $n \in \mathbb{N}^*$ ,  $2nA_n = (2n-1)A_{n-1}$ .

- Montrer que  $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2} = \frac{2B_0}{A_0} - \frac{2B_n}{A_n}$  pour tout  $n \in \mathbb{N}^*$ .
- En déduire que  $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2} = \frac{\pi^2}{6}$  puis que  $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2} = \frac{\pi^2}{6} + O\left(\frac{1}{n}\right)$ .

**Exercice 104** [ENS 2023 # 113] Soit  $f: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction continue et presque périodique c'est-à-dire telle que, pour tout  $\epsilon > 0$ , il existe  $T > 0$  tel que :  $\forall x \in \mathbb{R}^+, \forall n \in \mathbb{N}, |f(x+nT) - f(x)| \leq \epsilon$ . Soit  $f: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$  continue et presque périodique.

1. Montrer que  $f$  est uniformément continue sur  $\mathbb{R}^+$ .
2. Montrer que  $t \mapsto \frac{1}{t} \int_0^t f$  possède une limite quand  $t \rightarrow +\infty$ .

*Démonstration.* 1. Easy.

2. !! □

**Exercice 105** [ENS 2023 # 114] Soit  $f$  une fonction continue par morceaux et croissante de  $[0, 1]$  dans  $\mathbb{R}$ . Montrer que  $\int_0^1 f(x)e^{i\lambda x} dx = o\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ .

**Exercice 106** [ENS 2023 # 115] Soient  $f_1, \dots, f_n, g_1, \dots, g_n$  des fonctions de  $\mathcal{C}^0([0, 1], \mathbb{R})$ . Soit  $A$  la matrice de terme général  $A_{i,j} = \int_0^1 f_i(x)g_j(x) dx$ .

On pose  $B(x_1, \dots, x_n) = \det(f_i(x_j))$  et  $C(x_1, \dots, x_n) = \det(g_i(x_j))$ . Montrer que  $\int_{[0,1]^n} B(x_1, \dots, x_n) C(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n = n! \det(A)$ .

**Exercice 107** [ENS 2023 # 116 - LA FONCTION  $f$ ] • Soit  $f$  une fonction de classe  $\mathcal{C}^1$  de  $\mathbb{R}^+$  dans  $\mathbb{R}$  admettant une limite en  $+\infty$  et telle que  $f'$  est uniformément continue. Est-ce que  $f'$  a une limite en  $+\infty$  ?

**Exercice 108** [ENS 2023 # 117] [Rennes sur dossier] Soient  $d, N \in \mathbb{N}$  tels que  $N > d$ . Soient  $(P - n \in \mathbb{N})$  une suite de polynômes à coefficients réels de degré au plus  $d$  et  $x_1, \dots, x_N$  des réels distincts. On suppose que pour tout  $j \in \{1, \dots, N\}$ , la suite  $(P_n(x_j))_{n \in \mathbb{N}}$  est bornée. Montrer que l'on peut extraire de  $(P - n \in \mathbb{N})$  une suite  $(Q - n \in \mathbb{N})$  qui converge uniformément sur  $[0, 1]$  vers un polynôme de degré au plus  $d$ .

**Exercice 109** [ENS 2023 # 118] Montrer que la suite de fonctions de terme général  $f_n : x \mapsto (\sin x)^n \cos(x)$  converge uniformément sur  $[0, \frac{\pi}{2}]$ .

**Exercice 110** [ENS 2023 # 119] On note  $I$  (resp.  $S$ ) l'ensemble des fonctions  $f : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  telles que, pour tout  $a \in \mathbb{R}$ , l'ensemble  $\{x \in [0, 1], f(x) \leq a\}$  est fermé (resp. de même avec l'inégalité dans l'autre sens).

- Montrer que  $S \cap I$  est l'ensemble  $\mathcal{C}$  des fonctions continues de  $[0, 1]$  dans  $[0, 1]$ .
- Soit  $f : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ . On pose  $f_n : x \mapsto \inf(\{1\} \cup \{f(y) + n|x - y|, y \in [0, 1]\})$  pour  $n \in \mathbb{N}$ . Montrer que  $f_n$  est continue pour tout  $n$ , que la suite  $(f_n)$  est croissante et que  $f \in I$  si et seulement si la suite  $(f_n)$  converge simplement vers  $f$ .

**Exercice 111** [ENS 2023 # 120] Soit  $\Lambda : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$  telle que  $\Lambda(n) = \ln(p)$  si  $n = p^k$  avec  $p$  premier et  $k \in \mathbb{N}^*$ , et  $\Lambda(n) = 0$  sinon. On note  $\mathcal{P}$  l'ensemble des nombres premiers.

1. Montrer que, pour tout  $n \in \mathbb{N}^*$ ,  $\sum_{d|n} \Lambda(d) = \ln(n)$ .
2. Montrer que, pour tout  $s > 1$ ,  $\left(\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{\Lambda(n)}{n^s}\right) \left(\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{n^s}\right) = \sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{\ln(n)}{n^s}$ .
3. Montrer que, pour tout  $s > 1$ ,  $\sum_{p \in \mathcal{P}} \frac{\ln(p)}{p^s} \underset{s \rightarrow 1^+}{=} \frac{1}{s-1} + O(1)$ .
4. Montrer que, pour tout  $s > 1$ ,  $\sum_{p \in \mathcal{P}} \frac{1}{p^s} \underset{s \rightarrow 1^+}{=} \ln\left(\frac{1}{s-1}\right) + O(1)$ . Qu'en déduire ?

*Démonstration.* □

**Exercice 112** [ENS 2023 # 121] Soit  $q \geq 2$  entier. On se donne un caractère non trivial  $\chi$  sur le groupe des inversibles  $(\mathbb{Z}/q\mathbb{Z})^\times$ , c'est-à-dire un morphisme de groupes non constant  $\chi : ((\mathbb{Z}/q\mathbb{Z})^\times, \times) \rightarrow (\mathbb{C}^\times, \times)$ . Pour  $m \in \mathbb{Z}$ , on pose alors  $\tilde{\chi}(m) = 0$  si  $q$  n'est pas premier avec  $m$ , et  $\tilde{\chi}(m) = \chi(\overline{m})$  sinon (ou  $\overline{m}$  désigne la classe de  $m$  modulo  $q$ ).

- Montrer que la série  $\sum_{n \geq 1} \frac{\tilde{\chi}(m)}{m^s}$  converge si et seulement si  $s > 0$ . - Montrer que la fonction  $s \mapsto \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{\tilde{\chi}(m)}{m^s}$  est de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $\mathbb{R}^{+*}$ .

**Exercice 113** [ENS 2023 # 122] Soient  $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$  de classe  $\mathcal{C}^1$ , décroissante de limite nulle en  $+\infty$  et  $g : x \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n f(nx)$ . Quelle est la limite de  $g$  en  $0^+$  ?

*Démonstration.* C'est  $\sum f(2nx) - f((2n+1)x) = \sum \int_{2nx}^{(2n+1)x} f'(t) dt$ . Cela tend vers  $\frac{1}{2}f(0)$ , en découpant sur un segment, et en utilisant l'uniforme continuité de  $f'$ . □

**Exercice 114** [ENS 2023 # 123] Pour tout polynôme trigonométrique  $P : \theta \mapsto \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k(P) e^{ik\theta}$  (somme à support fini) et pour tout  $d \in \mathbb{R}$ , on pose  $\|P\|_{h^d}^2 = \sum_{k \in \mathbb{Z}} |c_k(P)|^2 (1 + |k|)^{2d}$ .

On admet que  $\|\cdot\|_{h^d}$  est une norme sur l'espace vectoriel  $\mathcal{T}$  des polynômes trigonométriques pour tout  $d \in \mathbb{R}$ . Soit  $E$  l'espace des fonctions continues par morceaux et  $2\pi$ -périodiques de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{C}$ . On définit le produit de convolution de deux fonctions  $f, g \in E$  par  $f \star g : \varphi \mapsto \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta)g(\varphi - \theta)d\theta$ . Enfin, on pose, pour  $f \in E$ ,  $\|f\|_2^2 = \int_{-\pi}^{\pi} |f(\theta)|^2 d\theta$ .

- Montrer qu'il existe  $d \in \mathbb{R}$  et  $c = c(d) \in \mathbb{R}^+$  tels que, pour tous  $f, g \in \mathcal{T}$ ,

$$\|f \star g\|_2 \leq c(d) \|f\|_{h^d} \|g\|_2.$$

- Déterminer tous les réels  $d$  vérifiant la condition de la question précédente.
- Soit  $f$  de classe  $\mathcal{C}^\infty$  et  $2\pi$ -périodique. On pose, pour  $k \in \mathbb{Z}$ ,  $c_k(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) e^{-ik\theta} d\theta$  et, pour tout  $d \in \mathbb{R}$ ,  $\|f\|_{h^d}^2 = \sum_{k \in \mathbb{Z}} |c_k(f)|^2 (1 + |k|)^{2d}$ . Déterminer les  $d \in \mathbb{R}$  tels que  $\|f\|_{h^d} < +\infty$ .
- Soient  $f, g$  de classe  $\mathcal{C}^\infty$  et  $2\pi$ -périodiques et  $d \in \mathbb{R}$ . Calculer  $\|f \star g\|_{h^d}$ .

**Exercice 115** [ENS 2023 # 124] Soient  $p \geq 2$  et  $q \geq 2$  deux entiers tels que  $p \wedge q = 1$ . Pour tout  $z \in \mathbb{C}$  tel que  $|z| < 1$ , on pose  $f(z) = \frac{1-z^{pq}}{(1-z^p)(1-z^q)}$ . Ecrire  $f(z)$  sous la forme  $\sum_{n=0}^{+\infty} c_n z^n$  et trouver le plus grand  $n \geq 0$  tel que  $c_n = 0$ .

**Exercice 116** [ENS 2023 # 125] Soient  $R \in \mathbb{R}^{+*}$ ,  $f$  et  $g$  deux fonctions développables en série entière sur  $] -R, R[$  telles que  $\forall x \in ] -R, R[, \int_0^x f(t)g(x-t) dt = 0$ . Montrer que l'une au moins des deux fonctions  $f$  et  $g$  est identiquement nulle sur  $] -R, R[$ .

*Démonstration.* □

**Exercice 117** [ENS 2023 # 126] Soient  $f : z \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} z^n$  et  $g : z \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} z^{2^n}$ .

- Déterminer les rayons de convergence de  $f$  et  $g$ .
- Trouver les complexes  $z \in \mathcal{S}(0, 1)$  tels que  $f(z)$  converge.
- Montrer que  $f$  admet un prolongement  $\bar{f}$  sur  $\mathbb{C} \setminus \{1\}$ , développable en série entière en tout point de  $\mathbb{C} \setminus \{1\}$ .
- Montrer que  $|g(r)| \rightarrow +\infty$  quand  $r \rightarrow 1$  avec  $r \in \mathbb{R}$ . - Montrer que, si  $z \in \mathcal{B}(0, 1)$ , alors  $g(z^2) = g(z) - z$ .
- Soient  $n \in \mathbb{N}$  et  $\alpha \in \mathbb{U}_{2^n}$ . Montrer que  $|g(r\alpha)| \rightarrow +\infty$  quand  $r \rightarrow 1$  avec  $r \in \mathbb{R}$ .
- Soit  $h : z \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{z^{2^n+1}}{2^{n+1}}$ . Montrer que  $h$  est continue sur  $\bar{\mathcal{B}}(0, 1)$ .
- Montrer que, pour tout  $z_0 \in \mathcal{S}(0, 1)$ ,  $\varepsilon > 0$  et  $\tilde{h}$ , prolongement de  $h$  sur  $\bar{\mathcal{B}}(0, 1) \cup \mathcal{B}(z_0, \varepsilon)$ , la fonction  $\tilde{h}$  n'est pas développable en série entière en  $z_0$ .

**Exercice 118** [ENS 2023 # 127] Soit  $\alpha = (\alpha_i)_{i \geq 1}$  une suite de  $\mathbb{Z}$  nulle à partir d'un certain rang. Pour  $n \geq 1$ , on pose  $u_n = \prod_{i \in \mathbb{N}^*} ((in)!)^{\alpha_i}$ .

- Déterminer, selon la valeur de  $\alpha$ , le rayon de convergence  $R$  de la série entière  $\sum_{n \geq 1} u_n z^n$ .

Dans la suite, on note  $f$  la somme de cette série entière.

- Expliciter  $f$  si  $\alpha = (-\delta_{i,1})_{i \geq 1}$ .
- Pour une somme  $g$  de série entière sur un intervalle  $] -a, a[$  [non trivial, on pose  $\Delta(g) : z \mapsto zg'(z)$ . Expliciter  $P(\Delta)(g)$  lorsque  $g : z \mapsto z^k$  avec  $k \in \mathbb{N}$  et  $P \in \mathbb{R}[X]$ .
- Soit  $v \in \mathbb{C}^{\mathbb{N}^*}$  une suite complexe, et  $P \in \mathbb{R}[X]$  sans racine dans  $\mathbb{N}^*$  tels que, pour tout  $n \geq 1$ ,  $v_{n+1} = \frac{v_n}{P(n+1)}$ . Montrer que  $\sum_{n \geq 1} v_n z^n$  a un rayon de convergence non nul et donner une méthode simple pour trouver une équation différentielle linéaire non triviale à coefficients polynomiaux dont sa somme est solution.
- Résoudre le même problème qu'en (d) lorsqu'il existe  $P$  et  $Q$  dans  $\mathbb{R}[X]$  sans racine dans  $\mathbb{N}^*$  telles que  $v_{n+1} = \frac{Q(n+1)}{P(n+1)} v_n$  pour tout  $n \geq 1$ , et en supposant cette fois-ci que  $\deg(Q) \leq \deg(P)$ .
- Justifier que le cadre de la question - s'applique bien à la suite  $(u_n)_{n \geq 1}$  lorsque  $R > 0$ .

**Exercice 119** [ENS 2023 # 128] Pour  $n \in \mathbb{N}$ , on pose  $u_n = \frac{n! (30n)!}{(15n)! (10n)! (6n)!}$ .

- Montrer que, pour  $n \in \mathbb{N}$ ,  $u_n$  est un entier.
- Déterminer le rayon de convergence de la série entière  $\sum u_n x^n$ .
- Trouver une équation différentielle vérifiée par la somme de la série entière précédente.

**Exercice 120** [ENS 2023 # 129] Existe-t-il une partie  $A$  de  $\mathbb{N}$  telle que  $\sum_{n \in A} \frac{x^n}{n!} \underset{x \rightarrow +\infty}{\sim} e^{\sqrt{x}}$  ?

*Démonstration.* Cf un précédent □

**Exercice 121** [ENS 2023 # 130] • Soit  $f : z \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n$  la somme d'une série entière de rayon  $R > 0$ . Montrer que, pour tout  $0 < r < R$  et pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,  $a_n r^n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(re^{i\theta}) e^{-in\theta} d\theta$ .

- ▷ Soit  $f$  une fonction développable en série entière de rayon de convergence égal à 1. On suppose que  $f$  est prolongeable par continuité sur le disque fermé  $D_f(0, 1)$ . Expliquer pourquoi la formule de Cauchy ci-dessus reste vraie pour  $r = 1$ . - Soit  $f : x \in ]-1, 1[ \mapsto \frac{1}{\sqrt{1-x}} e^{-\frac{1-x}{1+x}}$ . Montrer que  $f$  est développable en série entière au voisinage de 0.
- ▷ On admet que le rayon de convergence du développement de  $f$  en 0 vaut 1. Montrer que les coefficients du développement en série entière en 0 de  $f$  sont bornés par  $M > 0$ . Exprimer  $M$  en fonction de  $f$ .

**Exercice 122** [ENS 2023 # 131] Calculer  $\int_0^{+\infty} \frac{\sin x}{x} dx$  à l'aide de la transformation de Laplace.

**Exercice 123** [ENS 2023 # 132] Soit  $(a, b) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^-$  tel que  $\forall x \in [0, 1], 1 + ax + bx^2 \geq 0$ .

1. Si  $a \in \mathbb{R}^+$ , montrer que  $n \int_0^1 (1 + ax + bx^2)^n dx \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ .
2. Si  $a \in \mathbb{R}^*$ , montrer que  $n \int_0^1 (1 + ax + bx^2)^n dx \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\frac{1}{a}$ .

*Démonstration.* □

**Exercice 124** [ENS 2023 # 133] Soit, pour  $x \in \mathbb{R}^+$ ,  $f(x) = \int_0^\pi \frac{dt}{\sqrt{e^{2x} \cos^2(t) + e^{-2x} \sin^2(t)}}$ . Montrer qu'il existe  $(a, b) \in (\mathbb{R}^+)^2$  tel que  $\forall x \in \mathbb{R}^+, f(x) \leq (ax + b)e^{-x}$ .

*Démonstration.* □

**Exercice 125** [ENS 2023 # 134] Pour  $x$  réel, on pose  $J(x) = \int_0^\pi \cos(x \sin t) dt$ .

- Calculer  $J(0)$ .
- Montrer que  $J$  est de classe  $\mathcal{C}^\infty$ .
- En estimant  $\int_{\frac{\pi}{2}-\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}+\varepsilon} \cos(x \sin t) dt$  pour un  $\varepsilon$  à choisir convenablement en fonction de  $x$ , établir que  $J(x) = O(x^{-1/2})$  quand  $x \rightarrow +\infty$ .

**Exercice 126** [ENS 2023 # 135] Soient  $f$  et  $g$  deux fonctions de classe  $\mathcal{C}^\infty$  de  $\mathbb{R}^+$  dans  $\mathbb{R}$ . On pose  $f \star g : x \in \mathbb{R}_+ \mapsto \int_0^x f(t) g(x-t) dt$ . Montrer que  $f \star g$  est dérivable et donner une expression de sa dérivée.

**Exercice 127** [ENS 2023 # 136] Soit  $f : ]0, 1[ \rightarrow \mathbb{R}$  continue. Pour  $n \geq 1$  et  $s < t$  dans  $]0, 1[$ , on pose

$$a_n(f, s, t) = \frac{2}{t-s} \int_s^t f(u) \cos\left(\frac{2n\pi}{t-s}(u-s)\right) du.$$

- On suppose  $f$  strictement convexe. Montrer que  $a_1(f, s, t) > 0$  pour tous  $s < t$  dans  $]0, 1[$ .
- On suppose  $f$  strictement convexe. Montrer que  $a_n(f, s, t) > 0$  pour tous  $s < t$  dans  $]0, 1[$  et tout  $n \in \mathbb{N}^*$ .
- Réciproquement, on suppose  $f$  de classe  $C^2$  et  $a_1(f, s, t) > 0$  pour tous  $s < t$  dans  $]0, 1[$ . Montrer que  $f$  est strictement convexe.

**Exercice 128** [ENS 2023 # 137] Soit  $\mathcal{S}$  l'ensemble des solutions de l'équation différentielle sur  $\mathbb{R}$ :  $\sum_{k=0}^n y^{(k)} = 0$ .

À quelle condition sur  $n$  tout élément de  $\mathcal{S}$  possède-t-il une limite en  $+\infty$ ?

*Démonstration.* Si et seulement si toutes les valeurs propres ont une partie réelle  $< 0$  (puisque 0 n'est pas racine). □

**Exercice 129** [ENS 2023 # 138] Soit  $I$  un (vrai) intervalle de  $\mathbb{R}$ . Si  $r \in \mathbb{N}^*$  et  $f_1, \dots, f_r \in C^{r-1}(I, \mathbb{R})$ , on pose  $W_r(f_1, \dots, f_r) = \det \left( \left( f_j^{(i-1)} \right)_{1 \leq i, j \leq r} \right)$ . Soient  $r \in \mathbb{N}^*$ ,  $f_1, \dots, f_r \in C^{r-1}(I, \mathbb{R})$ .

1. Soit  $g \in C^{r-1}(I, \mathbb{R})$ . Montrer que  $W_r(gf_1, \dots, gf_r) = g^r W_r(f_1, \dots, f_r)$ .
2. On suppose que, pour tout  $k \in \llbracket 1, r \rrbracket$ ,  $W_k(f_1, \dots, f_k)$  ne s'annule pas. Montrer que, pour tout  $(a_1, \dots, a_r) \in \mathbb{R}^r$  non nul, la fonction  $a_1 f_1 + \dots + a_r f_r$  s'annule au plus  $(r-1)$  fois sur  $I$ .
3. On suppose que  $W_r(f_1, \dots, f_r)$  est identiquement nul sur  $I$  et que  $W_{r-1}(f_1, \dots, f_{r-1})$  ne s'annule pas. Montrer que  $(f_1, \dots, f_r)$  est liée.

*Démonstration.* □

**Exercice 130** [ENS 2023 # 139] On considère l'équation différentielle  $(D_\lambda): y'' + (\lambda - r)y = 0$  avec  $\lambda \in \mathbb{R}$ ,  $r \in C^\infty(I, \mathbb{R})$ , ou  $I$  un intervalle contenant  $[0, 1]$ . On considère  $E_\lambda$  l'espace des solutions  $y$  de  $(D_\lambda)$  telles que  $y(0) = 0, y(1) = 0$ .

1. Quelles sont les dimensions possibles de  $E_\lambda$ ?
2. On note  $y_\lambda$  la solution du problème de Cauchy  $(D_\lambda)$ ,  $y_\lambda(0) = 0, y'_\lambda(0) = 1$ . Caractériser le cas où  $\dim(E_\lambda) = 1$ .
3. Montrer que, à  $r$  fixé, les  $E_\lambda$  sont orthogonaux pour le produit scalaire  $\langle f, g \rangle = \int_0^1 fg$ .
4. On note  $N_\lambda$  le nombre de zéros de  $y_\lambda$  sur  $[0, 1]$ . Pourquoi est-il fini?
5. Calculer  $N_\lambda$  dans le cas  $r = 0, \lambda > 0$ .
6. Dans le cas général, étudier le comportement de  $N_\lambda$ .

*Démonstration.* 1.  $0, 1$  : c'est l'intersection de deux formes linéaires.

- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.

□

**Exercice 131** [ENS 2023 # 140] Soient  $I$  un intervalle non trivial de  $\mathbb{R}$ , et  $a, b$  deux fonctions continues de  $I$  dans  $\mathbb{R}$ . On considère l'équation différentielle  $(E): x'' + a(t)x' + b(t)x = 0$ .

- Soit  $x$  une solution non nulle de  $(E)$ . Montrer que les zéros de  $x$  sont isolés.
- On suppose  $a$  de classe  $C^1$ . Montrer qu'il existe  $z$  de classe  $C^2$  de  $I$  dans  $\mathbb{R}$ , et  $q: I \rightarrow \mathbb{R}$  continue telles que  $x \mapsto [t \mapsto x(t) e^{z(t)}]$  définisse une bijection de l'ensemble des solutions de  $(E)$  sur celui des solutions de  $y'' + q(t)y = 0$ .
- Soient  $q_1, q_2$  deux fonctions continues de  $I$  dans  $\mathbb{R}$  telles que  $q_1 \leq q_2$ . On considère l'équation différentielle  $(E_i): y'' + q_i(t)y = 0$  pour  $i \in \{1, 2\}$ . Soient  $y_1, y_2$  des solutions respectives de  $(E_1)$  et  $(E_2)$  sur  $I$ . Soient  $\alpha < \beta$  deux zéros consécutifs de  $y_1$ . Montrer que  $y_2$  s'annule dans  $[\alpha, \beta]$ .
- Soient  $q: I \rightarrow \mathbb{R}$  continue, et  $m, M$  deux réels strictement positifs tels que  $m \leq q \leq M$ . Soient  $\alpha < \beta$  deux zéros consécutifs d'une solution non nulle de  $y'' + q(t)y = 0$ . Montrer que  $\frac{\pi}{\sqrt{M}} \leq \beta - \alpha \leq \frac{\pi}{\sqrt{m}}$ .

**Exercice 132** [ENS 2023 # 141] Soient  $A$  une application continue de  $\mathbb{R}^+$  dans  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ ,  $M$  l'unique application dérivable de  $\mathbb{R}^+$  dans  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  telle que  $M(0) = I_n$  et  $\forall t \in \mathbb{R}^+, M'(t) = A(t)M(t)$ . Montrer que  $\forall t \in \mathbb{R}^+, \det(M(t)) = \exp \left( \int_0^t \text{Tr } A \right)$ .

**Exercice 133** [ENS 2023 # 142] Soit  $p: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction continue, non identiquement nulle,  $\pi$ -périodique et telle que  $\int_0^\pi p(t)dt \geq 0$  et  $\int_0^\pi |p(t)|dt \leq \frac{\pi}{4}$ . Montrer que l'équation  $u'' + pu = 0$  n'admet pas de solution  $u$  non nulle sur  $\mathbb{R}$  telle qu'il existe  $\lambda \in \mathbb{R}^*$  tel que  $\forall t \in \mathbb{R}, u(t + \pi) = \lambda u(t)$ .

**Exercice 134** [ENS 2023 # 143] Soit  $A_0 \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  telle que  $\text{Sp}(A_0 + A_0^T) \subset \mathbb{R}^-$ .

On admet l'existence d'une unique fonction  $A: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  telle que  $A(0) = A_0$  et  $\forall t \geq 0, A'(t) = (A(t))^2 - (A(t)^T)^2$ . Montrer que la fonction  $A$  a une limite en  $+\infty$  et expliciter cette limite.

**Exercice 135** [ENS 2023 # 144] Soit  $A \in \mathcal{M}_3(\mathbb{R})$ . Décrire le comportement asymptotique en  $+\infty$  des solutions de l'équation différentielle  $X'(t) = AX(t)$ .

**Exercice 136** [ENS 2023 # 145] On considère l'équation différentielle (1):  $X'(t) = P(t)X(t)$  où  $P$  est une application continue et périodique de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ .

- Résoudre (1) si  $\forall t \in \mathbb{R}, P(t) = \begin{pmatrix} 1 & \cos(t) \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ .

- On revient au cas général. Soit  $T \in \mathbb{R}^{+*}$  une période de  $P$ . On note  $X_1, \dots, X_n$  une base de l'espace des solutions de (1) et, si  $t \in \mathbb{R}$ ,  $M(t) = (X_1(t), \dots, X_n(t))$ . Montrer qu'il existe  $C \in \text{GL}_n(\mathbb{C})$  telle que  $\forall t \in \mathbb{R}$ ,  $M(t+T) = M(t)C$ .
- Avec les notations de la question précédente, montrer qu'il existe  $A \in \text{GL}_n(\mathbb{C})$  tel que l'application  $t \in \mathbb{R} \mapsto M(t)e^{-tA}$  soit  $T$ -periodique.

*Démonstration.* •

- Par inversibilité, il existe  $C$  tel que  $M(T) = M(0)C$ .  
Puis on considère  $Y(t) = M(t)C$ , elle vérifie la même équation différentielle.
- Si et seulement si  $M(t)Ce^{-(t+T)A} = M(t)e^{-tA}$ , c'est-à-dire  $Ce^{-TA} = I_n$ .  
Le caractère inversible de  $A$  implique que  $C$  ne peut pas avoir 1 comme valeur propre, ce qui est faux pour  $P = 0$ .  
Sans cette condition, c'est la surjectivité de l'exponentielle... □

**Exercice 137** [ENS 2023 # 146] • Soit  $f: (x, y) \mapsto (\ln(x^2 + y^2), \arctan(\frac{y}{x}))$ . Donner le domaine de définition  $\Omega$  de  $f$ . Étudier la continuité et la différentiabilité de  $f$ .

- On identifie naturellement  $\mathbb{R}^2$  à  $\mathbb{C}$ . Montrer que, si  $(x, y) \in \Omega$ ,  $df_{(x,y)}$  est  $\mathbb{C}$ -linéaire.

*Démonstration.* •  $\Omega = \{(x, y) \mid x \neq 0\}$ . La continuité et la différentiabilité ne posent pas de problème. □

**Exercice 138** [ENS 2023 # 147, 148] 1. Calculer  $\sup_{a,b,c>1} (1 - \frac{1}{a})^b + (1 - \frac{1}{2b})^c + (1 - \frac{1}{3c})^a$ .

2. Trouver  $\sup_{a,b,c \geq 1} (1 - \frac{1}{a})^b (1 - \frac{1}{2b})^c (1 - \frac{1}{3c})^a$ .

*Démonstration.* • C'est  $\leq e^{-\frac{b}{a}} + e^{\frac{c}{2b}} + e^{\frac{a}{3c}}$ , et cela s'en approche pour  $a, b, c$  très grand. Puis étudier cette quantité, en dérivant.  
• C'est  $\leq e^{-\frac{b}{a} - \frac{c}{2b} - \frac{a}{3c}}$ , et cela s'en approche pour  $a, b, c$  très grand. Puis étudier la quantité dans l'exponentielle. □

**Exercice 139** [ENS 2023 # 149] [Rennes sur dossier] Soient  $q \in \mathbb{R}^+$ ,  $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2; x \geq 0, y \geq 0, x + y = 1\}$ , Déterminer  $\min_{(x,y) \in D} (x^q + y^q)$ .

**Exercice 140** [ENS 2023 # 150] Soient  $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$  et  $b \in \mathbb{R}^n$ .

Déterminer les extrema de  $x \in \mathbb{R}^n \mapsto \frac{1}{2} \langle Ax, x \rangle - \langle b, x \rangle$ .

**Exercice 141** [ENS 2023 # 151] Soient  $f$  une application différentiable convexe de  $\mathbb{R}^n$  dans  $\mathbb{R}$ ,  $L \in \mathbb{R}^{+*}$ .

1. Montrer que  $\forall (x, y) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$ ,  $\langle \nabla f(y) - \nabla f(x), y - x \rangle \geq 0$ .
2. On suppose que l'application  $\nabla f$  est  $L$ -lipschitzienne.

Montrer que  $\forall (x, y) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$ ,  $\langle \nabla f(y) - \nabla f(x), y - x \rangle \geq \frac{1}{L} \|\nabla f(x) - \nabla f(y)\|^2$ .

**Exercice 142** [ENS 2023 # 152] Soit  $p > 1$ . Montrer qu'il existe  $K_p \in \mathbb{R}$  tel que, pour tous  $x, y \in \mathbb{R}$  tels que  $|x|^p + |y|^p = 2$ , on a  $(x - y)^2 \leq K_p(4 - (x + y)^2)$ .

*Démonstration.* Il s'agit de montrer que  $\frac{(x-y)^2}{K_p(4-(x+y)^2)^2}$  est majorée.

On sait que  $\frac{|x|+|y|}{2} \leq \left(\frac{|x|^p+|y|^p}{2}\right)^{1/p} = 2$ , donc le seul problème de définition est en  $(x, y) = (1, 1)$ , où il faut montrer que la fonction admet un prolongement par continuité.

Le dénominateur est  $(x - y)^2 - 2(x - 1)^2 - 2(y - 1)^2 - 4(x - 1) - 4(y - 1)$ . On pourrait poser  $x' = x - 1$ . □

**Exercice 143** [ENS 2023 # 153] Soient  $f$  une application de classe  $C^1$  de  $\mathbb{R}^n$  dans  $\mathbb{R}^m$ ,  $x \in \mathbb{R}^n$  telle que  $df_x$  soit injective. Montrer qu'il existe un voisinage de  $x$  dans  $\mathbb{R}^n$  sur lequel  $f$  est injective.

*Démonstration.* Par l'absurde, on extrait deux suite  $(x_n), (y_n)$  qui tendent vers  $x$ . Alors  $f(x_n) = df_0(x_n) + o(x_n)$ , idem pour  $y_n$ , et en posant  $z_n = x_n - y_n$ , on a  $df(z_n) = o(z_n)$ . Ce qui n'est pas possible car  $\|df(\dots)\|$  est une norme. □

**Exercice 144** [ENS 2023 # 154] On identifie  $\mathbb{R}^2$  à  $\mathbb{C}$ . Soit  $f$  une fonction de  $\mathbb{R}^2$  dans  $\mathbb{R}$ , de classe  $C^2$  et telle que  $\Delta f = 0$ . Montrer que  $f(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(e^{it}) dt$ .

**Exercice 145** [ENS 2023 # 155] On munit  $\mathbb{R}^n$  de la norme euclidienne canonique et on note  $B$  unité fermée de cet espace. Soient  $f$  une application de  $\mathbb{R}^n$  dans  $\mathbb{R}^n$  de classe  $C^1$  et telle que, pour tout  $(u, v) \in B^2$ ,  $\| -f(0) + v - df_u(v) \| \leq \frac{1}{2}$ . Montrer que  $f$  s'annule exactement une fois sur  $B$ . □

*Démonstration.*

### 3) Géométrie

**Exercice 146** [ENS 2023 # 156] • Montrer que, pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , il existe un unique  $T_n \in \mathbb{Z}[X]$  tel que

$\forall \theta \in \mathbb{R}$ ,  $T_n(2 \cos(\theta)) = 2 \cos(n\theta)$ .

- Si  $n \in \mathbb{N}^*$ , quel est le terme de plus haut degré de  $T_n$ ? En déduire les  $r \in \mathbb{Q}$  tels que  $\cos(\pi r) \in \mathbb{Q}$ .
- Déterminer les triangles du plan euclidien dont les cotes ont des longueurs rationnelles et les angles sont des multiples rationnels de  $\pi$ .

**Exercice 147** [ENS 2023 # 157] Soit  $G$  un groupe d'isométries affines de  $\mathbb{R}^2$  tel que, pour tout point  $x$ , il existe  $g \in G$  tel que  $g(x) \neq x$ . Montrer que  $G$  contient une translation autre que l'identité de  $\mathbb{R}^2$ .

*Démonstration.* Faux pour  $G = O_2$ . □

**Exercice 148** [ENS 2023 # 158] Soit  $S$  le groupe (pour la composition) des applications de  $\mathbb{C}$  dans  $\mathbb{C}$  de la forme  $z \mapsto az + b$  avec  $a \in \mathbb{U}$  et  $b \in \mathbb{C}$ . Soit  $G$  un sous-groupe de  $S$  vérifiant les conditions suivantes :

- si  $g \in G$ ,  $g(0)$  est nul ou de module supérieur ou égal à 1 ;
- l'ensemble des  $b \in \mathbb{C}$  tels que  $z \mapsto z + b$  appartienne à  $G$  contient deux éléments  $\mathbb{R}$  linéairement indépendants.

Montrer que l'ensemble  $\{a \in \mathbb{U} \mid \exists b \in \mathbb{C}, z \mapsto az + b \in G\}$  est fini.

*Démonstration.* Sinon, il existe une suite  $(a_n)$  qui s'accumule. On peut supposer qu'elle s'accumule sur 1, puis on peut borner les  $(b_n)$ , puis extraire une suite convergente, donc elle est constante à partir d'un certain rang. Donc on a une infinité de  $z \mapsto a_n z$ , ce qui est impossible. □

**Exercice 149** [ENS 2023 # 159] Soit  $L$  la courbe du plan complexe d'équation  $|z|^2 = \cos(2 \arg(z))$ .

- Trouver une équation cartésienne réelle définissant  $L$ .
- En déduire une paramétrisation de  $L \cap (\mathbb{R}^+)^2$  sous la forme  $\{(x(r), y(r)), r \in [0, 1]\}$ . - Montrer que la longueur de la courbe  $L$  entre le point  $(0, 0)$  et le point  $(x(r), y(r))$  s'écrit :  $A(r) = \int_0^r \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} dt$ .
- Montrer que  $A$  définit une bijection de  $[-1, 1]$  dans un intervalle de la forme  $[-w, w]$  ou  $w > 0$ .
- On définit  $B = A^{-1}$ . Montrer que  $B$  vérifie une équation différentielle du second ordre.

**Exercice 150** [ENS 2023 # 160] Soit  $(e_1, e_2)$  une famille libre de vecteurs de  $\mathbb{R}^2$ . On pose  $L =_1 +_2$  et on note  $\text{Vol}(L) = |\det(e_1, e_2)|$ .

- Soit  $A$  un disque fermé de  $\mathbb{R}^2$ , d'aire strictement supérieure à  $\text{Vol}(L)$ . Montrer qu'il existe deux éléments distincts  $x$  et  $y$  de  $A$  tels que  $x - y \in L$ .
- Soit  $\varepsilon > 0$ . Montrer qu'il existe dans  $L \setminus \{0\}$  un élément  $\ell$  tel que  $\|\ell\| \leq \frac{2+\varepsilon}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\text{Vol}(L)}$ .
- Soit  $p$  un nombre premier congru à 1 modulo 4.
- Montrer qu'il existe  $\omega \in \mathbb{Z}$  tel que  $p$  divise  $1 + \omega^2$ .
- Montrer qu'il existe  $(a, b) \in \mathbb{Z}^2$  tel que  $p = a^2 + b^2$ .

**Exercice 151** [ENS 2023 # 161] • On note  $D$  le disque unité du plan euclidien  $\mathbb{R}^2$ . Démontrer qu'il existe une suite  $(C - i \in \mathbb{N})$  de parties de  $D$  telle que :

- ▷ pour tout  $i \in \mathbb{N}$ , l'ensemble  $C_i$  soit un carré de  $\mathbb{R}^2$  dont les cotés sont parallèles aux axes ;
- ▷ les  $C_i$  soient d'intérieurs disjoints ;
- ▷  $\sum_{i \in \mathbb{N}} \text{Aire}(C_i) = \pi$ .
- ▷ On note  $C = [-1, 1]^2$ . Démontrer qu'il existe une suite  $(D - i \in \mathbb{N})$  de parties de  $C$  telle que :
- ▷ pour tout  $i \in \mathbb{N}$ , l'ensemble  $D_i$  soit un disque fermé de  $\mathbb{R}^2$  ;
- ▷ les  $D_i$  soient d'intérieurs disjoints ;
- ▷  $\sum_{i \in \mathbb{N}} \text{Aire}(D_i) = 4$ .

#### 4) Probabilités

**Exercice 152** [ENS 2023 # 162] On note  $\mathcal{A}$  l'ensemble des parties de  $A$  de  $\mathbb{N}$  telles que  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{|A \cap [1, n]|}{n}$  existe. Est-ce que  $\mathcal{A}$  est une tribu ?

*Démonstration.* Non vide, stable par complémentaire, et stable par union dénombrable. On n'est pas stable par union dénombrable : toute partie est réunion dénombrable de singleton. □

**Exercice 153** [ENS 2023 # 163] On pose, pour toute permutation  $\sigma \in S_n$ ,  $d(\sigma) = \sum_{k=1}^n |\sigma(k) - k|$  et on note, pour  $p \in \mathbb{N}$ ,  $q_{n,p} = |\{\sigma \in S_n, d(\sigma) = p\}|$ . Montrer que, si  $p \geq 2n$ , alors  $q_{n,p}$  est pair.

*Démonstration.* On procède par récurrence. Si  $\sigma \neq \sigma^{-1}$ , ils vont par paires. De même, par hypothèse de récurrence, si  $\sigma$  a au moins un point fixe, le cardinal est pair.

Reste les éléments vérifiant  $\sigma = \sigma^{-1}$ , sans point fixes, qui sont produits de transpositions. Par ailleurs, la condition  $p \geq 2n$ , implique que les transpositions ont des croisements.

On peut alors transformer  $(i_1 i_2)(j_1 j_2)$  en  $(i_1 j_2)(j_1 i_2)$ , qui préserve la quantité donnée (faire le dessin), et faire la transformation réciproque. □

**Exercice 154** [ENS 2023 # 164] Un dérangement est une permutation  $\sigma \in S_n$  sans point fixe. On note  $D_n$  le sous-ensemble de  $S_n$  formé des dérangements.

- Soit  $X$  une variable aléatoire suivant la loi uniforme sur  $D_n$ . Calculer la probabilité que  $X$  soit une permutation paire.  
Indications.
  - ▷ On donne la formule d'inversion de Pascal : si  $(a_n)$  et  $(b_n)$  sont deux suites telles que  $\forall n \in \mathbb{N}, a_n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} b_k$ , alors  $\forall n \in \mathbb{N}, b_n = \sum_{k=0}^n (-1)^{n-k} \binom{n}{k} a_k$ .
  - ▷ On pourra calculer la différence du nombre d'éléments pairs et impairs de  $D_n$ .
- Soit  $Y$  une variable aléatoire suivant la loi uniforme sur  $S_n$ . Calculer la probabilité de  $(Y \in D_n)$  sachant que  $Y$  est paire.

*Démonstration.* • La différence du nombre d'éléments pairs et impairs est le déterminant de la matrice avec des 1 et des 0 sur la diagonale. □

**Exercice 155** [ENS 2023 # 165] Soient  $m \geq 1$  et  $r \geq 1$  deux entiers. On munit l'ensemble des morphismes de groupes de  $(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^r$  dans  $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$  de la loi uniforme. Donner une expression simple de la probabilité de l'événement «le morphisme  $\varphi$  est surjectif».

*Démonstration.* Le faire pour  $m = p$ , puis lemme Chinois. □

**Exercice 156** [ENS 2023 # 166] Deux joueurs  $A$  et  $B$  lancent une pièce truquée donnant pile avec une probabilité égale à  $5/9$ . Les règles de gain sont les suivantes : pile rapporte 5 euros et face 4 euros. Pour  $n \in \mathbb{N}^*$ , chacun des joueurs effectue  $9n$  lancers indépendants ; on note  $A_n$  (resp.  $B_n$ ) la variable aléatoire donnant le gain du joueur  $A$  (resp.  $B$ ).

- Trouver un équivalent, lorsque  $n$  tend vers  $+\infty$ , de  $\mathbf{P}(A_n = B_n)$ .
- Montrer que  $\mathbf{P}(A_n \geq B_n) \geq \frac{1}{2}$ .
- Vers quoi tend  $\mathbf{P}(A_n < B_n)$  ?

*Démonstration.* • On a  $P(A_n = B_n) = P(A_n = 9n - B_n) = P(A_n + B_n = 9n)$ , et la somme est une loi binomiale.

- C'est clair.
- Découle des questions précédentes. □

**Exercice 157** [ENS 2023 # 167, 177] On joue à pile ou face avec une pièce pipée qui donne pile avec probabilité  $p < \frac{1}{2}$ . On lance la pièce  $2n$  fois et on compte le nombre de «Piles». Déterminer l'entier  $n$  qui maximise la probabilité d'avoir compté au moins  $n + 1$  «Piles».

*Démonstration.* On a  $P(S_{2n} = n + k)P(S_{2n} = n - k)$ , puis on montre que  $P(S_{2n} \geq n + 1) + \frac{1}{2}P(S_{2n} = n)$  est décroissante. Mais on connaît  $P(S_{2n} = n)$ , et il suffit de voir quand elle devient plus petite que les premières valeurs de  $P(S_{2n} \geq n + 1)$ . □

**Exercice 158** [ENS 2023 # 168] Soit  $X$  une variable aléatoire à valeurs dans  $\mathbb{N}$  telle que  $\mathbf{E}(X) = 1$ ,  $\mathbf{E}(X^2) = 2$  et  $\mathbf{E}(X^3) = 5$ . Quelle est la valeur minimale de  $\mathbf{P}(X = 0)$  ?

*Démonstration.* On a  $E(X)E(X^3) \geq E(X^2)^2$ . En notant  $e = P(X = 1)$ , on a  $E(X1_{X>1})E(X^31_{X>1}) \geq E(X^21_{X>1})^2$ , donc  $(1 - e)(5 - e)(2 - e)^2$ , qui donne  $e \geq \frac{1}{2}$ .

Comme  $E(X) = 1$ , on doit avoir  $P(X = 0) \geq \frac{1}{4}$ , mais le cas d'égalité ne donne pas les bonnes valeurs : mais  $E(X) = 1$ ,  $E(X^2) = \frac{3}{2}$  et  $E(X^3) = \frac{5}{2}$ .

Si on suppose que  $e = \frac{1}{2}$ , on peut prendre  $Y$  qui vaut 3 avec probabilité  $\frac{1}{6}$  et 0 avec probabilité  $\frac{1}{3}$ .

!! Manque : on ne peut pas faire mieux... □

**Exercice 159** [ENS 2023 # 169] Soient  $n \in \mathbb{N}$  un entier impair  $\geq 3$ ,  $(X_m)_{m \geq 0}$  une suite de variables aléatoires à valeurs dans  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  telle que  $X_0 = 0$ , et pour  $m \in \mathbb{N}$ ,  $\mathbf{P}(X_{m+1} = k + 1 \mid X_m = k) = \mathbf{P}(X_{m+1} = k - 1 \mid X_m = k) = \frac{1}{2}$ . Montrer que  $(X_m)_{m \geq 0}$  converge en loi vers la loi uniforme sur  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ .

*Démonstration.* On regarde la loi de  $X_m + m$ , dont la série génératrice est  $G_m = \left(\frac{1+X^2}{2}\right)^m$ . Puis on regarde  $P(S_m = 0[n])$ , c'est

$$\sum_{\omega \in \mathbb{U}_n} G_m(\omega) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \left(\frac{1+e^{\frac{4ik\pi}{n}}}{2}\right)^m = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \cos^{2m} \frac{2k\pi}{n}$$

Pour les autres valeurs que 0 modulo  $n$ , il faut prendre  $X^k G_m(X)$ , cela marche pareil. □

**Exercice 160** [ENS 2023 # 170] Pour  $\sigma \in \mathcal{S}_n$  on note  $I(\sigma)$  le nombre d'inversions de  $\sigma$  c'est-à-dire le nombre de couples  $(i, j)$  avec  $i < j$  et  $\sigma(i) > \sigma(j)$ .

- Montrer que  $P_n = \sum_{\sigma \in \mathcal{S}_n} X^{I(\sigma)} = \prod_{k=1}^{n-1} (1 + X + \dots + X^k)$ .
- On pose  $f(n) = |\{\sigma \in \mathcal{S}_n, (n+1) \text{ divise } I(\sigma)\}|$ . Exprimer  $f(n)$  à l'aide de  $P_n$ .
- Montrer qu'il existe une infinité de nombres premiers  $p$  tels que  $f(p-1) < \frac{(p-1)!}{p}$  et de même une infinité de nombres premiers  $p$  tels que  $f(p-1) > \frac{(p-1)!}{p}$ .

**Exercice 161** [ENS 2023 # 171] Soient  $p$  un nombre premier,  $n \in \mathbb{N}^*$ ,  $P$  une variable aléatoire suivant la loi uniforme sur l'ensemble des polynômes unitaires de degré  $n$  de  $\mathbb{F}_p[X]$ ,  $N$  le nombre de racines de  $P$  dans  $\mathbb{F}_p$  (sans tenir compte des multiplicités). Calculer  $\mathbf{E}(N)$  et  $\mathbf{V}(N)$ .

**Exercice 162** [ENS 2023 # 172] Dans tout l'exercice, les variables aléatoires considérées sont supposées réelles, discrètes et à loi de support fini. Pour deux telles variables  $X$  et  $Y$ , on note  $X \leq_c Y$  pour signifier que  $\mathbf{E}(f(X)) \leq \mathbf{E}(f(Y))$  pour toute fonction convexe  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ .

1. Soient  $X$  une variable aléatoire vérifiant les conditions de l'exercice et  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  convexe. Montrer que  $f(\mathbf{E}(X)) \leq \mathbf{E}(f(X))$ .
2. Donner un exemple de couple  $(X, Y)$  pour lequel  $X \leq_c Y$  mais  $X \neq Y$ .
3. Montrer que si  $X \leq_c Y$  alors  $\mathbf{E}(X) = \mathbf{E}(Y)$  et  $\mathbf{V}(X) \leq \mathbf{V}(Y)$ .
4. Montrer que  $X \leq_c Y$  si et seulement si  $\mathbf{E}(X) = \mathbf{E}(Y)$  et

$$\forall a \in \mathbb{R}, \int_a^{+\infty} \mathbf{P}(X \geq x) dx \leq \int_a^{+\infty} \mathbf{P}(Y \geq x) dx.$$

Démonstration.

□

**Exercice 163** [ENS 2023 # 173] On fixe  $N \in \mathbb{N}^*$ . On choisit de façon équiprobable  $u_1 \in \llbracket 1, N \rrbracket$ , puis  $u_2 \in \llbracket 1, u_1 - 1 \rrbracket$ , et ainsi de suite jusqu'à arriver à  $u_\ell = 1$  avec nécessairement  $\ell \leq N$ . On note  $E_N = \{u_j, 1 \leq j \leq \ell\}$ .

1. Calculer  $\mathbf{P}(k \in E_N)$  pour  $1 \leq k \leq N$ .
2. Calculer  $\mathbf{P}(2 \in E_N \mid 3 \notin E_N)$ .
3. Calculer  $\mathbf{E}(|E_N|)$  et  $\mathbf{V}(|E_N|)$ .

*Démonstration.* 1.  $P(k \in E_{k+1}) = \frac{1}{k}$ , puis  $P(k \in E_n) = \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-1}(P(k \in E_{n-1}) + \dots + P(k \in E_{k+1}))$ . On trouve  $P(k \in E_N) = \frac{1}{k}$ .

2. On a  $P(2 \in E_N \mid 3 \in E_N) = \frac{1}{2}$ .
3. Semble facile.

□

**Exercice 164** [ENS 2023 # 174] Dans tout l'énoncé, on fixe un entier  $p \geq 1$ .

- Développer  $(x_1 + \dots + x_N)^p$  pour toute liste  $(x_1, \dots, x_N)$  de nombres réels.
- Soient  $X_1, \dots, X_n$  des variables aléatoires i.i.d. suivant la loi uniforme sur  $\{-1, 1\}$ . Soit  $(a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{R}^n$ . On pose  $X = \sum_{i=1}^n a_i X_i$ . Montrer que  $\mathbf{E}(X^{2p}) \leq (2p)^p (\mathbf{E}(X^2))^p$ .
- Montrer que  $\mathbf{E}(X^{2p}) \leq p^p (\mathbf{E}(X^2))^p$ .
- Soit  $(a - k \geq 1)$  une suite réelle telle que  $\sum_{k=1}^{+\infty} a_k^2 = 1$ . Soient  $x \in \mathbb{R}$  et  $Y_x = \sum_{k=1}^n a_k \cos(kx) X_k$ .

Montrer que  $\omega \mapsto \int_0^{2\pi} Y_x(\omega)^{2p} dx$  prend au moins une valeur inférieure ou égale à  $2\pi p^p$ .

**Exercice 165** [ENS 2023 # 175] suivant la loi uniforme sur  $\{1, -1\}$ . Soient  $X_1, \dots, X_n$  des variables aléatoires i.i.d. suivant la loi de Rademacher, et  $a_1, \dots, a_n$  des réels. On pose  $Y = \sum_{k=1}^n a_k X_k$ .

- Montrer que  $\mathbf{E}(|Y|)^2 \leq \mathbf{E}(Y^2)$ .
- Montrer que  $\mathbf{E}(Y^2) = \sum_{k=1}^n a_k^2$ .
- Montrer que si  $\sum_{k=1}^n a_k^2 = 1$  alors  $\mathbf{E}(Y^2) \leq e \mathbf{E}(|Y|)^2$ .
- Montrer que  $\mathbf{E}(Y^2) \leq e \mathbf{E}(|Y|)^2$  en toute généralité.

**Exercice 166** [ENS 2023 # 176] Une variable aléatoire discrète réelle  $X$  est dite décomposable s'il existe deux variables aléatoires discrètes réelles non presque sûrement constantes et indépendantes  $X_1$  et  $X_2$  telles que  $X \sim X_1 + X_2$ . - Une variable aléatoire de Bernoulli est-elle décomposable? Une variable aléatoire binomiale est-elle décomposable?

- Montrer que le polynôme  $T^4 + 2T + 1$  ne peut se factoriser comme produit de deux polynômes de degré 2 à coefficients dans  $\mathbb{R}^+$ . En déduire une variable aléatoire réelle discrète décomposable  $X$  telle que  $X^2$  ne soit pas décomposable.
- Soient  $n \in \mathbb{N}^*$  et  $X$  une variable aléatoire suivant la loi uniforme que  $\llbracket 0, n-1 \rrbracket$ . Donner une condition nécessaire et suffisante sur  $n$  pour que  $X$  soit décomposable.

**Exercice 167** [ENS 2023 # 178] On fixe  $n \in \mathbb{N}^*$  et on pose  $X = \llbracket 1, n \rrbracket$ . Soient  $A$  et  $B$  des variables aléatoires indépendantes uniformément distribuées sur l'ensemble  $\mathcal{P}(X)$  des parties de  $X$ .

- Déterminer la loi, l'espérance et la variance de la variable aléatoire  $|A|$  (cardinal de  $A$ ).
- Montrer que, pour tout  $\varepsilon > 0$ ,  $\mathbf{P}(|A| \geq (\frac{1}{2} + \varepsilon)n) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ .
- Pour  $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ , on note  $\mathbf{1}_{\{i\}}$  la fonction indicatrice du singleton  $\{i\}$ . Déterminer la loi de  $\mathbf{1}_{\{i\}}(A)$ .
- Calculer  $\mathbf{P}(A \subset B)$ . Commenter.

**Exercice 168** [ENS 2023 # 179] Soient  $n \in \mathbb{N}^*$  et  $p \in [0, 1]$ . On considère un échiquier  $n \times n$ . On colorie chaque case en rouge (resp. en bleu) avec probabilité  $p$  (resp.  $1 - p$ ). On note  $Q(p)$  la probabilité pour qu'il existe un chemin joignant le bord gauche au bord droit constitué uniquement de cases rouges (les déplacements ne se font pas en diagonale)? Que dire de la fonction  $Q$ ?

**Exercice 169** [ENS 2023 # 180] Soit  $(X_n)_{n \geq 1}$  une suite de variables aléatoires indépendantes de loi de Rademacher. On pose  $S_n = X_1 + \dots + X_n$  pour  $n \geq 1$ .

- Calculer l'espérance du nombre  $R$  de retour en zéro de la suite  $(S_n)_{n \geq 1}$ .
- Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$  distinct de  $\mathbb{R}$ . Montrer que la probabilité qu'il existe  $n \geq 1$  tel que  $S_n \notin I$  est égale à 1.
- Montrer que l'événement  $(R = +\infty)$  est presque sûr.

*Démonstration.* • Passer par la probabilité de premier retour en 0, il faut tout refaire...

□

**Exercice 170** [ENS 2023 # 181] Soient  $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbf{P})$  un espace probabilisé et  $(m - k \in \mathbb{N})$  une suite de réels positifs de somme 1. On considère un arbre aléatoire sur cet espace tel que chaque nœud ait un nombre aléatoire  $X$  de successeurs avec, pour tout  $k \in \mathbb{N}$ ,  $\mathbf{P}(X = k) = m_k$ . Ces variables aléatoires correspondant au nombre de successeurs sont mutuellement indépendantes. On note  $X_1$  la variable aléatoire comptant le nombre de successeurs de la racine. Caractériser le fait que la longueur de l'arbre soit presque sûrement finie.

**Exercice 171** [ENS 2023 # 182] On construit itérativement et aléatoirement un arbre aléatoire sur l'ensemble de sommets  $\llbracket 1, n \rrbracket$  (graphe orienté) selon le procédé suivant : à l'étape  $k$ , on choisit aléatoirement un point dans  $\llbracket 1, k \rrbracket$  (avec probabilité uniforme) et on rajoute une arête orientée de ce point vers  $k + 1$ . Ces choix s'effectuent de manière indépendante les uns des autres.

- On note  $X_n$  la variable aléatoire donnant le nombre d'arêtes partant du point 1. Déterminer l'espérance et la variance de  $X_n$ .

- On suppose  $n \geq 2$ . On note  $S_n$  la variable aléatoire donnant le nombre de descendants (directs ou non) du sommet 2. Déterminer la loi de  $S_n$ .
- Calculer l'espérance du nombre de feuilles de l'arbre.

**Exercice 172** [ENS 2023 # 183] Soient  $E$  un ensemble fini,  $V : E \rightarrow \mathcal{P}(E)$  une fonction de  $E$  vers les parties de  $E$  et  $f : E \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction. Un point  $a \in E$  est un minimum local si  $f(a) \leq f(b)$  pour tout  $b \in V(a)$ . Soit  $M$  un entier tel que  $M \geq \sqrt{|E|}$ . Soient  $b_1, \dots, b_M$  des variables aléatoires indépendantes et uniformément distribuées dans  $E$ . Soit  $k$  tel que  $f(b_k) = \min_{1 \leq i \leq M} f(b_i)$ . Soit  $(u_n)_{n \geq 0}$  une suite de  $E$  telle que  $u_0 = b_k$  et, pour tout  $n \geq 0$  :

- si  $u_n$  est un minimum local, alors  $u_{n+1} = u_n$  ;
- sinon  $u_{n+1} \in V(u_n)$  et  $f(u_{n+1}) < f(u_n)$ .

Montrer que  $u_M$  est un minimum local avec probabilité au moins  $1/2$ .

*Démonstration.* La donnée est celle d'un graphe. Étant donné l'algorithme, on peut retirer des arêtes, de sorte que les voisins de  $a$  vérifient  $f(b) < f(a)$ . Auquel cas il n'y a plus de cycles.

Alors on choisit aléatoirement  $\sqrt{n}$  sommets du graphe, et parmi ceux-ci le sommet de valeur minimale. On veut montrer que la plus longue chaîne décroissante à partir de celui-ci est de longueur  $\leq \sqrt{n}$  avec probabilité  $\geq \frac{1}{2}$ .

On peut attribuer à chaque sommet sa valeur par  $f$ , et on peut supposer que c'est injectif.

Puis on peut ajouter des arêtes, vers ceux qui sont  $< s$ . Puis on peut retirer les arêtes, sauf celle juste en dessous. On est ramené à traiter le cas du graphe  $n \rightarrow n-1 \rightarrow \dots \rightarrow 1$ .  $\square$

**Exercice 173** [ENS 2023 # 184] Une variable aléatoire réelle  $X$  est infiniment divisible si  $X$  admet un moment d'ordre 2, et si, pour tout  $n \geq 2$ , il existe  $(X_{i,n})_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket}$  i.i.d. et admettant des moments d'ordre 2 telles que  $X \sim \sum_{i=1}^n X_{i,n}$ . Montrer que si  $X$  est bornée et infiniment divisible, alors  $X$  est presque sûrement constante.

**Exercice 174** [ENS 2023 # 185] On se donne une suite  $(X_i)_{i \geq 1}$  de variables aléatoires indépendantes. On suppose que pour tout  $i \geq 1$ , il existe  $a_i \in ]0, 2]$  et  $p_i \in [0, 1]$  tels que  $X_i$  soit à valeurs dans  $\{0, a_i, -a_i\}$  et  $\mathbf{P}(X_i = a_i) = \mathbf{P}(X_i = -a_i) = \frac{p_i}{2}$ .

- Quelle relation doivent vérifier  $a_i$  et  $p_i$  pour que  $\mathbf{V}(X_i) = 1$  ? Dans toute la suite, on suppose cette relation vérifiée et on pose  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$ .
- Calculer la variance de  $n^{-1/2} S_n$ .
- Montrer que  $\mathbf{E}(\cos(n^{-1/2} t S_n)) = \prod_{i=1}^n \mathbf{E}(\cos(n^{-1/2} t X_i))$ .
- En déduire que  $\mathbf{E}(\cos(n^{-1/2} t S_n)) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} e^{-t^2/2}$ .

**Exercice 175** [ENS 2023 # 186] On fixe un entier  $n \geq 1$ . On considère la relation d'ordre partielle  $\preceq$  sur  $\mathbb{R}^n$  définie par  $x \preceq y \Leftrightarrow \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, x_i \leq y_i$ . Une fonction  $f : \{0, 1\}^n \rightarrow \mathbb{R}$  est dite croissante lorsque  $f(x) \leq f(y)$  quels que soient  $x, y$  dans  $\{0, 1\}^n$  tels que  $x \preceq y$ .

- Donner un exemple de fonction croissante non constante de  $\{0, 1\}^n$  dans  $\mathbb{R}$ .
- Dans la suite, on se donne une liste  $(X_1, \dots, X_n)$  de variables aléatoires i.i.d. suivant  $\mathcal{B}(1/2)$ . Soit  $f : \{0, 1\}^n \rightarrow \mathbb{R}$  croissante. On suppose  $n \geq 2$ .

Montrer que  $\mathbf{E}(f(X_1, \dots, X_n)) = \frac{1}{2} (\mathbf{E}(f(X_1, \dots, X_{n-1}, 0)) + \mathbf{E}(f(X_1, \dots, X_{n-1}, 1)))$ . - Soit  $f : \{0, 1\}^n \rightarrow \mathbb{R}$  et  $g : \{0, 1\}^n \rightarrow \mathbb{R}$  croissantes.

Montrer que  $\mathbf{E}((fg)(X_1, \dots, X_n)) \geq \mathbf{E}(f(X_1, \dots, X_n)) \mathbf{E}(g(X_1, \dots, X_n))$ .

**Exercice 176** [ENS 2023 # 187] Soit  $n \in \mathbb{N}^*$ . On munit  $S_n$  de la distribution uniforme de probabilité. On note  $A_i = \{\sigma \in S_n, \sigma(i) = i\}$  et  $N$  la variable aléatoire donnant le nombre de points fixes d'une permutation.

- Soit  $I \subset \llbracket 1, n \rrbracket$ . Calculer  $\mathbf{P}\left(\bigcap_{i \in I} A_i\right)$ .
- Exprimer  $N$  avec des indicatrices. Calculer  $\mathbf{E}(N)$  et  $\mathbf{V}(N)$ .
- Soient  $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$  et  $F \subset \llbracket 1, n \rrbracket$ . Calculer  $\sum_{I \subset \llbracket 1, n \rrbracket, |I|=k} \prod_{i \in I} \mathbf{1}_F(i)$ .
- Soit  $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$ . Calculer  $\mathbf{E}(N(N-1) \cdots (N-k+1))$ .
- Soient  $X \sim \mathcal{P}(1)$  et  $k \in \mathbb{N}$ . Calculer  $\mathbf{E}(X(X-1) \cdots (X-k+1))$ .
- Calculer  $\mathbf{P}(N=0)$ .

**Exercice 177** [ENS 2023 # 188] On considère une suite i.i.d.  $(X_n)_{n \geq 1}$  de variables aléatoires suivant toutes la loi uniforme sur  $\{1, 2\}$ . On définit  $(S_n)_{n \geq 0}$  par  $S_0 = 0$  et  $\forall n \in \mathbb{N}, S_{n+1} = S_n + X_{n+1}$ .

a) i) Déterminer l'espérance et la variance de  $S_n$ .

- Soit  $\varepsilon > 0$ . Montrer que  $\mathbf{P}(|S_n - 3n/2| \geq \varepsilon n)$  tend vers 0 quand  $n$  tend vers  $+\infty$ .
- Soit  $\varepsilon > 0$ . Montrer que  $\mathbf{P}(|S_n - 3n/2| \geq \varepsilon n^{2/3})$  tend vers 0 quand  $n$  tend vers  $+\infty$ .
- On considère la variable aléatoire  $T_n : \omega \mapsto \min\{k \in \mathbb{N}, S_k(\omega) \geq n\}$ . Déterminer l'ensemble des valeurs prises par  $T_n$ .
- Soit  $k \geq 2$ . Montrer que  $\mathbf{P}(T_n = k) = \frac{1}{2} \mathbf{P}(T_{n-1} = k-1) + \frac{1}{2} \mathbf{P}(T_{n-2} = k-1)$ .
- Calculer l'espérance de  $T_n$ .

**Exercice 178** [ENS 2023 # 189] Soient  $d \in \mathbb{N}^*$  et  $n \geq 3$ . On pose  $G = (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^d$  et  $S = \{\pm e_i, 1 \leq i \leq d\}$ , où  $e_i$  désigne l'élément de  $G$  dont toutes les coordonnées sont nulles sauf la  $i$ -ème, égale à  $\bar{1}$ . Soient enfin  $f: G \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction quelconque et  $X$  une variable aléatoire uniformément distribuée sur  $G$ .

Montrer que  $\mathbf{E}(|f(X) - \mathbf{E}(f(X))|) \leq \frac{nd}{2} \max_{s \in S} \mathbf{E}(|f(X) - f(X+s)|)$ .

*Démonstration.* C'est simple : On peut passer d'une somme à une autre en au plus  $\frac{nd}{2}$  pas. □

## II) X

**XENS**

### 1) Algèbre

**Exercice 179** [X MP 2023 # 275] On note  $p(n)$  le nombre de partitions de  $n$  pour  $n \in \mathbb{N}^*$ . Montrer que  $p(n) \leq 2^{n-1}$ .

**Exercice 180** [X MP 2023 # 276] Soient  $e_r > \dots > e_2 > e_1 \geq 0$  des entiers,  $n = \sum_{k=1}^r 2^{e_k}$  et  $X = \{s \in \mathbb{N}; 2^s \mid n!\}$ .

- Montrer que  $\max X = n - r$ .
- Montrer que le nombre d'entiers  $k$  tels que  $\binom{n}{k}$  est impair est  $2^r$ .

**Exercice 181** [X MP 2023 # 277] ★

- Montrer que l'équation  $a^2 - 2b^2 = 1$  admet une infinité de solutions  $(a, b) \in \mathbb{N}^2$ .

Déterminer l'ensemble des solutions.

- Que dire de l'ensemble des solutions de  $a^2 - 2b^2 = -1$  ?

**Exercice 182** [X MP 2023 # 278] Si  $G$  est un groupe, les éléments d'ordre fini forment-ils un sous-groupe ?

**Exercice 183** [X MP 2023 # 279] • Trouver deux groupes  $G_1$  et  $G_2$  non isomorphes de cardinal  $2023 = 7 \cdot 17^2$ .

- ▷ Soit  $p$  premier. Montrer qu'un groupe de cardinal  $p^2$  est isomorphe à  $\mathbb{Z}/p^2\mathbb{Z}$  ou à  $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^2$ .
- ▷ Soient  $G, H$  deux groupes finis et  $\psi: G \rightarrow H$  un morphisme surjectif.

Montrer que  $|G| = |H| \times |\text{Ker } \psi|$ .

- On suppose que  $G$  est un groupe de cardinal 2023, que  $H = \mathbb{Z}/7\mathbb{Z}$  et que  $\varphi: G \rightarrow H$  est un morphisme surjectif. Montrer que  $G$  est isomorphe à  $\mathbb{Z}/7\mathbb{Z} \times \text{Ker } \varphi$ .
- Montrer que tout groupe de cardinal 2023 est isomorphe à  $G_1$  ou  $G_2$ .

**Exercice 184** [X MP 2023 # 280] Soit  $G$  un groupe fini de neutre 1. Soit  $\varphi$  un automorphisme de  $G$  sans point fixe c'est-à-dire tel que :  $\forall x \in G, \varphi(x) = x \Rightarrow x = 1$ . On note  $n$  l'ordre de  $\varphi$ ; c'est le plus petit entier  $n \in \mathbb{N}^*$  tel que  $\varphi^n = \text{id}$ .

- Montrer que  $\forall x \in G, x \varphi(x) \varphi^2(x) \dots \varphi^{n-1}(x) = 1$ .
- Si  $n = 2$ , que peut-on dire du groupe  $G$ ? Donner un exemple.
- Si  $n = 3$ , montrer que, pour tout  $x \in G, x$  et  $\varphi(x)$  commutent.

**Exercice 185** [X MP 2023 # 281] Soient  $G$  un groupe et  $T$  l'ensemble des éléments de  $G$  d'ordre fini.

- En général,  $T$  est-il un sous-groupe de  $G$  ?
- Soit  $S$  une partie finie de  $G$  stable par conjugaison munie d'une relation d'ordre totale  $\leq$ . Montrer que, pour tous  $s_1, \dots, s_r \in S$ , il existe  $s'_1, \dots, s'_r \in S$  tels que  $s'_1 \leq s'_2 \leq \dots \leq s'_r$  et  $s_1 s_2 \dots s_r = s'_1 s'_2 \dots s'_r$ .
- Avec la question précédente, montrer que, si  $T$  est fini, alors  $T$  est un sous-groupe de  $G$ .

**Exercice 186** [X MP 2023 # 282] • Soit  $s: \mathbb{R}^* \rightarrow \mathbb{R}^*, t \mapsto t^{-1}$ . Déterminer le groupe engendré par  $s$ .

- ▷ On définit les applications  $s_1: (t, u) \in \mathbb{R}^* \times \mathbb{R}^* \mapsto (t^{-1}, tu) \in \mathbb{R}^* \times \mathbb{R}^*$  et

Montrer que le sous-groupe qu'elles engendrent est isomorphe à  $\mathcal{S}_3$ .

- Retrouver le résultat de la question précédente en considérant le quotient  $A$  de  $(\mathbb{R}^*)^3$  par la relation de colinéarité, la bijection  $f: A \rightarrow (\mathbb{R}^*)^2$  qui associe à la classe de  $(x_1, x_2, x_3)$  le couple  $(x_1/x_2, x_2/x_3)$ , et enfin les permutations de  $A$  induites par  $(x_1, x_2, x_3) \mapsto (x_2, x_1, x_3)$  et  $(x_1, x_2, x_3) \mapsto (x_1, x_3, x_2)$ .
- Soit  $n \geq 3$ . Déterminer le groupe engendré par les bijections  $(s-1 \leq i \leq n)$  de  $(\mathbb{R}^*)^n$  définies par  $s_i(t_1, \dots, t_n) = (t_1, \dots, t_{i-2}, t_{i-1} \times t_i, t_i^{-1}, t_i \times t_{i+1}, t_{i+2}, \dots, t_n)$  si  $1 < i < n$ ,  $s_1(t_1, \dots, t_n) = (t_1^{-1}, t_1 \times t_2, t_3, \dots, t_n)$  et  $s_n(t_1, \dots, t_n) = (t_1, \dots, t_{n-2}, t_{n-1} \times t_n, t_n^{-1})$ .

Ind. Considérer  $f: (\mathbb{R}^*)^{n+1} \rightarrow (\mathbb{R}^*)^n$  définie par  $f(t_1, \dots, t_{n+1}) = \left(\frac{t_2}{t_1}, \dots, \frac{t_{n+1}}{t_n}\right)$  et chercher des bijections simples  $s'_i$  de  $(\mathbb{R}^*)^{n+1}$  telles que  $s_i \circ f = f \circ s'_i$ .

**Exercice 187** [X MP 2023 # 283] Soit  $G$  un groupe fini d'ordre  $n$ . On note, pour tout diviseur positif  $d$  de  $n$ ,  $n_d(G)$  le nombre d'éléments de  $G$  d'ordre  $d$ .

- Montrer que  $n = \sum_{d \mid n} n_d(G)$ .
- Calculer les  $n_d(G)$  lorsque  $G$  est cyclique.
- Montrer que, si pour tout diviseur positif  $d$  de  $n$ ,  $|\{x \in G, x^d = 1\}| \leq d$ , alors  $G$  est cyclique. - Soient  $\mathbb{K}$  un corps et  $G$  un sous-groupe fini de  $\mathbb{K}^*$ . Montrer que  $G$  est cyclique.

**Exercice 188** [X MP 2023 # 284] On pose  $\mathbb{Q}[i] = \{a + ib; a, b \in \mathbb{Q}\}$ .

- Montrer que  $\mathbb{Q}[i]$  est un sous-corps de  $\mathbb{C}$ .
- Déterminer les éléments de  $\mathbb{Q}[i] \setminus \{0\}$  qui sont d'ordre fini.

**Exercice 189** [X MP 2023 # 285] • Soient  $\mathbb{K}$  un corps,  $(a, b) \in \mathbb{K}^2$ ,  $P = X^2 - aX - b$ . On considère la  $\mathbb{K}$ -algèbre  $A$  admettant une base sur  $\mathbb{K}$  de la forme  $(1, x)$  avec  $x^2 = ax + b$ . A quelle condition cette algèbre est-elle un corps ?

▷ On suppose que  $\mathbb{K} = \mathbb{F}_p$  ou  $p$  est un nombre premier. Combien de  $\mathbb{F}_p$ -algèbres non isomorphes peut-on obtenir ainsi ?

**Exercice 190** [X MP 2023 # 286] Soit  $p$  un nombre premier. On suppose que, pour toute  $\mathbb{F}_p$ -algèbre  $A$ , il existe un endomorphisme  $u_A$  de  $A$  de sorte que, pour tout couple  $(A, B)$  de  $\mathbb{F}_p$ -algèbres et tout morphisme  $\tau$  de  $\mathbb{F}_p$ -algèbres de  $A$  dans  $B$ , on ait  $\tau \circ u_A = u_B \circ \tau$ . Que dire des  $u_A$  ?

*Démonstration.* Pour tout isomorphisme  $\tau: A \rightarrow A$ ,  $u_A$  commute avec  $\tau$ . □

**Exercice 191** [X MP 2023 # 287] Soit, pour  $n \in \mathbb{N}^*$ ,  $P_n = 1 + X + \dots + X^{n-1}$ .

Montrer que  $\sum_{k=1}^n \binom{n}{k} P_k = 2^{n-1} P_n \left( \frac{X+1}{2} \right)$ .

**Exercice 192** [X MP 2023 # 288] • Montrer que pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , il existe un unique polynôme  $S_n \in \mathbb{Q}[X]$  tel que  $\forall N \in \mathbb{N}$ ,  $S_n(N) = \sum_{k=0}^{N-1} k^n$ . Dans la suite, on note  $b_n$  le coefficient de  $S_n$  devant  $X$ .

▷ Donner une relation de récurrence exprimant  $b_n$  en fonction de  $b_0, \dots, b_{n-1}$ .

▷ Pour  $n \geq 1$ , donner une relation entre  $S_n''$  et  $S_{n-1}'$ .

▷ En déduire une expression explicite des coefficients de  $S_n$  en fonction de  $b_0, \dots, b_n$ .

**Exercice 193** [X MP 2023 # 289] Soit  $n \in \mathbb{N}^*$ . Soit  $q \in \mathbb{C}$  tel que  $0 < |q| < 1$ .

On pose  $F: z \in \mathbb{C}^* \mapsto \prod_{k=1}^n (1 + q^{2k-1}z)(1 + q^{2k-1}z^{-1})$ .

• Montrer qu'il existe une unique liste  $(c_0, \dots, c_n) \in \mathbb{C}^{n+1}$  telle que

$\forall z \in \mathbb{C}^*, F(z) = \sum_{k=0}^n c_k (z^k + z^{-k})$ .

• Donner une relation de récurrence entre  $c_k$  et  $c_{k+1}$ , et en déduire une expression de  $c_k$  à l'aide d'un produit. Ind. Exprimer  $F(q^2z)$  en fonction de  $F(z)$ .

**Exercice 194** [X MP 2023 # 290] Soit  $p$  un nombre premier. Trouver tous les entiers  $n \in \mathbb{N}$  tels que  $(X + Y)^n$  soit congru à  $X^n + Y^n$  modulo  $p$ .

**Exercice 195** [X MP 2023 # 291] Soit  $f \in \mathbb{C}[X]$  tel que  $f(0) \neq 0$ . Soit  $(k, n) \in (\mathbb{N}^*)^2$ . Montrer qu'il existe  $P \in \mathbb{C}[X]$  tel que  $X^n$  divise  $P^k - f$ .

**Exercice 196** [X MP 2023 # 292] Soit  $p$  un nombre premier. Pour deux polynômes  $P, Q$  dans  $\mathbb{Z}[X, Y]$ , on note  $P \equiv Q [p]$  pour signifier que  $P - Q$  a tous ses coefficients (devant les  $X^k Y^l$ ) divisibles par  $p$ . On adopte une définition similaire pour les polynômes à une indéterminée.

• Exhiber un polynôme  $P \in \mathbb{Z}[T]$  tel que  $P(XY) \equiv P(X)P(Y) [p]$ ,  $P \not\equiv T [p]$  et  $P \not\equiv 0 [p]$ .

• Exhiber un polynôme  $P \in \mathbb{Z}[T]$  tel que  $P(XY) \equiv P(X)P(Y) [p]$ ,  $P(X + Y) \equiv P(X) + P(Y) [p]$ ,  $P \not\equiv T [p]$  et  $P \not\equiv 0 [p]$ .

• Déterminer tous les polynômes  $P \in \mathbb{Z}[T]$  tels que  $P(XY) \equiv P(X)P(Y) [p]$  et  $P(X + Y) \equiv P(X) + P(Y) [p]$ .

**Exercice 197** [X MP 2023 # 293] Soient  $\alpha_1, \dots, \alpha_r$  des complexes deux à deux distincts. Soient  $n_1, \dots, n_r$  dans  $\mathbb{N}^*$  et  $H_1, \dots, H_r$  dans  $\mathbb{C}[X]$ . Montrer qu'il existe un  $H \in \mathbb{C}[X]$  tel que  $(X - \alpha_i)^{n_i}$  divise  $H - H_i$  pour tout  $i \in \llbracket 1, r \rrbracket$ .

**Exercice 198** [X MP 2023 # 294] • Soient  $N_1, \dots, N_r$  des entiers premiers entre eux deux à deux, et  $f_1, \dots, f_r$  des entiers. Montrer qu'il existe un entier  $F$  tel que  $F \equiv f_i [N_i]$  pour tout  $i \in \llbracket 1, r \rrbracket$ .

▷ Soient  $N_1, \dots, N_r$  des éléments de  $\mathbb{C}[X]$  premiers entre eux deux à deux, et  $f_1, \dots, f_r$  des éléments de  $\mathbb{C}[X]$ . Montrer qu'il existe  $F \in \mathbb{C}[X]$  tel que  $N_i$  divise  $F - f_i$  pour tout  $i \in \llbracket 1, r \rrbracket$ .

▷ Soient  $f, g$  deux éléments de  $\mathbb{C}[X]$  premiers entre eux, et  $n \in \mathbb{N}^*$ . Montrer qu'il existe  $h \in \mathbb{C}[X]$  tel que  $g$  divise  $h^n - f$ .

**Exercice 199** [X MP 2023 # 295] Soit  $n \in \mathbb{N}$ . Le polynôme  $X^{n+1} - nX^n + 1$  est-il irréductible dans  $\mathbb{Z}[X]$  ?

**Exercice 200** [X MP 2023 # 296] Soit  $P \in \mathbb{Z}[X]$  un polynôme unitaire dont les racines complexes ont un module inférieur ou égal à 1. Montrer que les racines de  $P$  sont des racines de l'unité.

**Exercice 201** [X MP 2023 # 297] Soit  $P \in \mathbb{Z}[X]$  possédant  $n$  racines distinctes  $x_1, \dots, x_n$ . On écrit  $P^2 + 1 = Q_1 \dots Q_r$  ou les  $Q_i$  sont dans  $\mathbb{Z}[X]$ . On pose  $R = \sum_{i=1}^r Q_i^2 - r$ .

• Montrer que les  $x_k$  sont racines au moins doubles de  $R$ .

• En déduire qu'il existe  $i \in \{1, \dots, r\}$  tel que  $\deg(Q_i) \geq 2 \lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor$ .

**Exercice 202** [X MP 2023 # 298] On se propose de donner une preuve du théorème de d'Alembert-Gauss.

• Montrer qu'il suffit de montrer le théorème pour les polynômes à coefficients réels. Dans la suite, on écrira le degré d'un polynôme non constant de  $\mathbb{R}[X]$  sous la forme  $2^n q$ , où  $n \in \mathbb{N}$  et  $q \in \mathbb{N}$  est impair. La preuve se fait par récurrence sur  $n$ .

• Montrer le théorème dans le cas où  $n = 0$ .

Dans la suite, on suppose le résultat vrai jusqu'au rang  $n$ , où  $n \geq 1$  est fixe.

• Soit  $P \in \mathbb{R}[X]$  de degré  $2^n q$ , où  $n \geq 1$ . On admet l'existence d'une extension  $\mathbb{K}$  de  $\mathbb{C}$  sur laquelle  $P$  est scindée, et on note  $x_1, \dots, x_d$  ses racines dans  $\mathbb{K}$ , distinctes ou non. Ayant fixé  $c \in \mathbb{R}$ , on pose  $y_{ij}(c) = x_i + x_j + cx_i x_j$  pour  $1 \leq i < j \leq d$ .

• Montrer que le polynôme  $Q_c = \prod_{i < j} (X - y_{ij}(c))$  est à coefficients réels. - Montrer que l'un des  $y_{ij}(c)$  est élément de  $\mathbb{C}$ .

• Montrer finalement que l'un des  $x_i$  est élément de  $\mathbb{C}$ .

**Exercice 203** [X MP 2023 # 299] Soient  $F \in \mathbb{C}(X)$  et  $q \in \mathbb{C}^*$ .

- On suppose que  $q$  n'est pas une racine de l'unité. Montrer qu'il existe au plus deux fractions rationnelles  $G \in \mathbb{C}(X)$  telles que  $F = 1 + G(qX) G(q^{-1}X) F(q^{-2}X)$ , et que s'il y en a deux alors elles sont opposées l'une de l'autre.
- Montrer que le resultat precedent peut tomber en défaut si l'on ne suppose plus que  $q$  n'est pas une racine de l'unité.

**Exercice 204** [X MP 2023 # 300] Soit  $G$  un groupe,  $\mathcal{M}$  l'ensemble des morphismes de groupes de  $G$  dans  $\mathbb{C}^*$ . Montrer que  $\mathcal{M}$  est une partie libre du  $\mathbb{C}$ -espace vectoriel  $\mathbb{C}^G$ .

**Exercice 205** [X MP 2023 # 301] On note  $C$  l'ensemble des matrices de  $\text{GL}_2(\mathbb{R})$  dont les coefficients sont non nuls. Pour  $M = (m_{i,j})_{1 \leq i,j \leq 2} \in C$ , on pose  $J(M) = \left( \frac{1}{m_{i,j}} \right)_{1 \leq i,j \leq 2}$ . Soit  $\varphi : C \rightarrow C$  qui à  $M$  associe  $J(M^{-1})$ . Montrer que  $\varphi$  est bien définie et trouver à quelle condition sur  $M \in C$  la suite  $(\varphi^n(M))_{n \geq 1}$  est stationnaire, ou bien periodique à partir d'un certain rang.

**Exercice 206** [X MP 2023 # 302] Soit  $R \in \mathcal{M}_n(\mathbb{Z})$  non nulle et  $M = I_n + 3R$ . Montrer que, pour tout  $k \in \mathbb{N}^*$ ,  $M^k \neq I_n$ .

**Exercice 207** [X 2023 # 303] Soient  $E$  un  $\mathbb{R}$ -espace vectoriel de dimension finie,  $p, u \in \mathcal{L}(E)$ . On suppose que  $p$  est un projecteur et que  $pu + up = u$ . Montrer que  $\text{tr}(u) = 0$ .

*Démonstration.* On a  $u(\text{Ker } p) \subset \text{Im } p$  et  $u(\text{Im } p) \subset \text{Ker } p$ . □

**Exercice 208** [X MP 2023 # 304] Pour  $(A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})^2$ , on pose  $\varphi_{A,B} : M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mapsto AMB$ .

Soit  $T = \{\varphi_{A,B}, (A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})^2\}$ .

- L'ensemble  $T$  est-il un  $\mathbb{R}$ -espace vectoriel?
- Montrer que l'espace vectoriel engendré par  $T$  est  $\mathcal{L}(\mathcal{M}_n(\mathbb{R}))$ .

**Exercice 209** [X MP 2023 # 305] Pour une matrice de projecteur  $P \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ , on pose  $R_P = \det(I_n + (X - 1)P)$ .

- Calculer  $R_P$  en fonction de  $P$ .
- Soient  $P, Q$  des matrices de projecteur dans  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  telles que  $PQ = QP = 0$ . Montrer que  $R_P R_Q = R_{P+Q}$ .
- Soit  $\varphi$  un automorphisme de la  $\mathbb{K}$ -algèbre  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ .
- Montrer que  $\varphi(E_{i,i})$  est un projecteur de rang 1, pour tout  $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ .
- Que dire du rang de  $\varphi(E_{i,j})$ , pour  $i, j$  dans  $\llbracket 1, n \rrbracket$ ?
- Montrer que  $\mathbb{K}^n = \bigoplus_{i=1}^n \text{Im } \varphi(E_{i,1})$ .

**Exercice 210** [X MP 2023 # 306] Soient  $E$  un  $\mathbb{C}$ -espace vectoriel de dimension finie  $n \geq 1$  et  $V$  un sous-espace vectoriel de  $\mathcal{L}(E)$ . On suppose qu'il existe une application  $q : V \rightarrow \mathbb{C}$  telle que  $u^2 = q(u) \text{id}$  pour tout  $u \in V$ .

- Montrer que, pour tous  $u, v \in V$ , il existe  $B(u, v) \in \mathbb{C}$  tel que  $uv + vu = 2B(u, v) \text{id}_E$ .
- Montrer que  $B$  est une forme bilinéaire. - Soient  $d \geq 1$  et  $u_1, \dots, u_d \in V$  tels que  $B(u_i, u_j) = -\delta_{ij}$  pour tous  $i, j \in \llbracket 1, d \rrbracket$ . Montrer que  $(u_1, \dots, u_d)$  est libre.
- Soient  $d \geq 2$  et  $u_1, \dots, u_d \in V$  tels que  $B(u_i, u_j) = -\delta_{ij}$  pour tous  $i, j \in \llbracket 1, d \rrbracket$ . Montrer que les  $u_i$  sont de trace nulle, et que  $\dim E$  est paire.

**Exercice 211** [X MP 2023 # 307] Soit  $n \in \mathbb{N}$  avec  $n \geq 2$ . Soit  $\varphi \in \mathcal{L}(\mathcal{M}_n(\mathbb{C}))$ . On suppose que  $\varphi(I_n)$  est inversible et que  $\forall A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}), \varphi(AB) = \varphi(A) \varphi(B)$ . Montrer qu'il existe  $P \in \text{GL}_n(\mathbb{C})$  tel que :  $\forall A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}), \varphi(A) = PAP^{-1}$ .

**Exercice 212** [X MP 2023 # 308] • Caractériser les endomorphismes  $\varphi$  de  $\mathbb{C}(X)$  vérifiant  $(*) : \forall F_1, F_2 \in \mathbb{C}(X), \varphi(F_1 F_2) = \varphi(F_1) \varphi(F_2)$ .

- Déterminer les automorphismes de  $\mathbb{C}(X)$  vérifiant  $(*)$ .

**Exercice 213** [X MP 2023 # 309] Soit  $M = (m_{i,j})_{1 \leq i,j \leq n} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  telle que :  $\forall i, j, m_{i,j} \geq 0$  et  $\sum_{j=1}^n m_{i,j} = 1$ .

- Montrer que 1 est valeur propre de  $M$  et que tout valeur propre de  $M$  est de module  $\leq 1$ .
- On note  $\mu = \min_{1 \leq i \leq n} m_{i,i}$ . Montrer que le spectre de  $M$  est inclus dans le disque de centre  $\mu$  et de rayon  $1 - \mu$ .
- On suppose que  $\mu > 0$  et que 1 est valeur propre de multiplicité 1 dans  $\chi_M$ . Montrer que  $(M^p)_{p \geq 1}$  converge vers une matrice de rang 1 dont toutes les lignes sont égales.
- On se donne trois réels strictement positifs  $p, q, r$  tels que  $p + q + r = 1$ . On considère la matrice  $B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  définie par  $b_{i,i} = r, b_{i,i+1} = q$  si  $i > 2, b_{1,2} = p + q, b_{i+1,i} = p$  si  $i < n - 1, b_{n,n-1} = p + q$ , et tous les autres coefficients sont nuls. Montrer que 1 est valeur propre simple de  $B$ , et expliciter la limite de  $(B^k)_{k \geq 0}$ .

**Exercice 214** [X MP 2023 # 310] Soient  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie,  $f \in \mathcal{L}(E)$  cyclique,  $F$  un sous-espace de  $E$  stable par  $f$ . Montrer que l'induit par  $f$  sur  $F$  est cyclique.

**Exercice 215** [X MP 2023 # 311] Soient  $E$  un  $\mathbb{C}$ -espace vectoriel de dimension finie,  $a, b \in \mathcal{L}(E)$ . On suppose qu'il existe  $f \in \mathcal{L}(\mathbb{C}, E)$  et  $v \in \mathcal{L}(E, \mathbb{C})$  telles que  $ab - ba = fv$ .

- Que peut-on dire de  $\det(ab - ba)$ ?
- Montrer que  $a$  et  $b$  sont cotrigonalisables.
- À quelle condition sur  $u \in \mathcal{L}(E)$  existe-t-il  $w \in \mathcal{L}(E)$  tel que  $uw - wv$  soit de rang 1?

*Démonstration.* •  $fv$  est un endomorphisme de rang 1, on note son image  $\text{Vect}(t)$ .

- Si  $\text{Ker } b$  non stable par  $a$ , alors il existe  $x$  tel que  $-b(a(x)) \in \text{Vect } t$ , donc  $t \in \text{Im } b$ . Alors  $\text{Im } b$  est stable par  $a$ . En appliquant ça à des  $b - \lambda I_n$  répétitivement, on trouve un vecteur propre commun.
- Si  $u$  a deux valeurs propres distinctes, en diagonalisant  $u$  par blocs et en prenant une matrice  $v$  avec un unique 1 à l'intersection, on obtient une matrice de rang 1.

Si  $u$  a une unique valeur propre, on peut supposer  $u$  nilpotente. Alors, si  $u$  est non nulle, on peut prendre  $v$  de rang 1, qui envoie un élément de l'image de  $u$  sur un élément du noyau de  $u$ , et on obtient  $uv - vu$  de rang 1.  $\square$

**Exercice 216** [X MP 2023 # 312] Soient  $E$  un  $\mathbb{C}$ -espace vectoriel de dimension finie et  $f \in \mathcal{L}(E)$  tel que, pour tout vecteur  $x \in E$ , l'ensemble  $\{f^n(x), n \in \mathbb{N}\}$  est fini.

- Montrer que, si  $f \in \text{GL}(E)$ , il existe  $k \in \mathbb{N}^*$  tel que  $f^k = \text{Id}$ .
- On revient au cas général. Montrer l'existence de  $k \in \mathbb{N}^*$  et  $p \in \mathbb{N}$  tels que  $f^{p+k} = f^p$ .

*Démonstration.* • Les valeurs propres sont des  $\cup_k$ , et si elle n'était pas diagonalisable...  $\square$

**Exercice 217** [X MP 2023 # 313] Pour  $\sigma \in \mathcal{S}_n$ , on note  $P_\sigma \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  la matrice de permutation associée à  $\sigma$ . Montrer que, si  $\sigma$  et  $\sigma'$  sont dans  $\mathcal{S}_n$ ,  $\sigma$  et  $\sigma'$  sont conjuguées dans  $\mathcal{S}_n$  si et seulement si  $P_\sigma$  et  $P_{\sigma'}$  sont semblables.

**Exercice 218** [X 2023 # 314] Soient  $p$  et  $q$  deux projecteurs orthogonaux dans un espace euclidien  $E$ .

1. Montrer que  $p \circ q \circ p$  est diagonalisable.
2. Montrer que  $E = \text{Im } p + \text{Ker } q + (\text{Im } q \cap \text{Ker } p)$ .
3. Montrer que  $p \circ q$  est diagonalisable.
4. Montrer que le spectre de  $p \circ q$  est inclus dans  $[0, 1]$ .

*Démonstration.*  $\square$

**Exercice 219** [X MP 2023 # 315] Soit  $n \in \mathbb{N}^*$ . On pose  $L_n = D^n((X^2 - 1)^n)$ , où  $D$  désigne l'opérateur de dérivation des polynômes.

- Déterminer le degré de  $L_n$ . Montrer que  $\int_{-1}^1 L_n(t) P(t) dt = 0$  pour tout  $P \in \mathbb{R}_{n-1}[X]$ . - Montrer que  $L_n$  est scindée à racines réelles simples  $x_1 < \dots < x_n$  avec  $x_1 > -1$  et  $x_n < 1$ . - Montrer qu'il existe des réels  $a_1, \dots, a_n$  tels que

$$\forall P \in \mathbb{R}_{2n-1}[X], \int_{-1}^1 P(t) dt = \sum_{k=1}^n a_k P(x_k).$$

**Exercice 220** [X 2023 # 316] Soit  $\alpha \in \mathbb{R}^{+*}$ . On note  $S^2 = \{x \in \mathbb{R}^3, \|x\| = 1\}$  où  $\|\cdot\|$  désigne la norme euclidienne canonique. Montrer l'équivalence entre les propositions suivantes.

- $\alpha = 2$ .
- $\forall n \geq 1, \forall (a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n) \in (S^2)^{3n}, \exists p \in S^2$  tel que

$$\sum_{i=1}^n \|p - a_i\|^\alpha = \sum_{i=1}^n \|p - b_i\|^\alpha = \sum_{i=1}^n \|p - c_i\|^\alpha$$

*Démonstration.*  $\square$

**Exercice 221** [X MP 2023 # 317] Existe-t-il  $A \in \text{SO}_2(\mathbb{Q})$  telle qu'il n'existe pas  $B \in \text{SO}_2(\mathbb{Q})$  vérifiant  $B^2 = A$ ?

**Exercice 222** [X MP 2023 # 318] Soient  $E$  un espace vectoriel euclidien,  $f \in \mathcal{S}(E)$ ,  $\Phi : \begin{matrix} E & \rightarrow & \mathbb{R} \\ v & \mapsto & \|f(v)\|^2 - \langle f(v), v \rangle^2 \end{matrix}$ . Donner une condition nécessaire et suffisante pour que  $\Phi$  admette un extremum.

**Exercice 223** [X MP 2023 # 319] On considère dans  $\mathcal{M}_{2n}(\mathbb{R})$  les matrices  $J = \begin{pmatrix} 0 & -I_n \\ I_n & 0 \end{pmatrix}$  et  $I = \begin{pmatrix} I_n & 0 \\ 0 & I_n \end{pmatrix}$ .

- Soit  $K \in \mathcal{M}_{2n}(\mathbb{R})$  tel que  $K^2 = -I$ . Montrer que  $K^T J \in \mathcal{S}_{2n}(\mathbb{R})$  si et seulement si  $J = K^T J K$ .
- On note  $\mathcal{C}$  l'ensemble des  $K \in \mathcal{M}_{2n}(\mathbb{R})$  telles que  $K^2 = -I$  et  $K^T J \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ . Soit  $K \in \mathcal{C}$ . Montrer que  $K + J$  est inversible et que  $(K + J)^{-1}(K - J)$  est symétrique.
- Soit  $K \in \mathcal{C}$ . On pose  $S = (K + J)^{-1}(K - J)$ . Montrer que  $SJ + JS = 0$ .

**Exercice 224** [X MP 2023 # 320] Montrer que  $\forall (A, B) \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})^2, \det(A + B) \geq \max(\det(A), \det(B))$ .

**Exercice 225** [X MP 2023 # 321] Soient  $A, B \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ .

- Montrer que  $\text{tr}(e^A e^B) > 0$ .
- Montrer que  $\text{tr}(e^{A+B}) \leq \text{tr}(e^A e^B)$ .

**Exercice 226** [X 2023 # 322] Soit  $t_1, \dots, t_n$  des réels.

1. Montrer que la matrice  $A = (t_i t_j)_{1 \leq i, j \leq n}$  est dans  $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ .
2. On suppose  $0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_n$ . Montrer que la matrice  $B = (\min(t_i, t_j))_{1 \leq i, j \leq n}$  est dans  $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ .
3. On suppose  $0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_n \leq 1$ . Montrer que  $M = B - A \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ .

*Démonstration.* 1.  $X^T A X = (\sum t_i x_i)^2$

$$2. \int \left( \sum x_i \mathbb{1}_{t_i} \right)^2$$

3. Il s'agit de montrer que  $\int_0^1 \left( \sum x_i \mathbb{1}_{t_i} \right)^2 \geq (\sum t_i x_i)^2$ , c'est-à-dire  $\int h^2 \geq \left( \int h \right)^2$ , car l'intégrale est sur  $[0, 1]$ .  $\square$

**Exercice 227** [X MP 2023 # 323] On munit  $\mathbb{R}^n$  de son produit scalaire standard et on note  $\|A\| = \sup_{X \in B_f(0,1)} \|AX\|$  pour  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ .

- Montrer que  $\|\cdot\|$  définit une norme sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ .
- Montrer que  $\|A\| = \sup_{(X,Y) \in B_f(0,1)^2} |\langle AX, Y \rangle|$ .

- On prend  $A = \left( \frac{1}{i+j+1} \right)_{0 \leq i, j \leq n}$  dans  $\mathcal{M}_{n+1}(\mathbb{R})$ . Pour  $X = (x_0 \cdots x_n)^T$  et  $Y = (y_0 \cdots y_n)^T$  dans  $\mathbb{R}^{n+1}$ , donner une interprétation de  $\langle AX, Y \rangle$  à l'aide d'une intégrale faisant intervenir  $P : t \in [0, 2\pi] \mapsto \sum_{k=0}^n x_k e^{ikt}$  et  $Q : t \in [0, 2\pi] \mapsto \sum_{k=0}^n y_k e^{ikt}$ .
- En déduire que  $\|A\| \leq 2\pi$ .
- Montrer que l'on a même  $\|A\| \leq \pi$ .

## 2) Analyse

**Exercice 228** [X MP 2023 # 324] Trouver  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  continue sur  $\mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\}$ , discontinue en  $(0, 0)$ , dont la restriction à toute droite passant par  $(0, 0)$  est continue.

**Exercice 229** [X 2023 # 325] Soit  $K \subset \mathbb{R}^2$  un convexe fermé non vide.

1. On suppose  $K$  borné. Montrer que  $K$  s'écrit comme intersection de carrés fermés.
2. On suppose  $K$  non borné et  $K \neq \mathbb{R}^2$ . Donner des exemples de tels convexes. Montrer que si  $K$  contient deux droites, celles-ci sont parallèles.
3. On suppose toujours  $K$  non borné. Montrer que  $K$  contient une demi-droite.

**Démonstration.** 1. Si  $x \notin K$ , on peut trouver une droite séparant  $x$  de  $K$ , donc un carré contenant  $K$  et non  $x$ .

2. Si  $K$  contient deux droites non parallèles,  $K = \mathbb{R}^2$ . La partie au dessus du graphe de  $x \mapsto e^x$ .

3. Fixer  $y \in K$ , et une suite  $(x_n) \in K$  qui tend vers  $\infty$ , et prendre une valeur d'adhérence des segments  $[y, x_n]$ . □

**Exercice 230** [X MP 2023 # 326] Déterminer les endomorphismes continus du groupe  $\mathbb{C}^*$ .

**Exercice 231** [X MP 2023 # 327] Soit  $d \in \mathbb{N}^*$ . On munit  $\mathbb{R}^d$  de la structure euclidienne canonique. On définit une norme sur  $\mathcal{M}_d(\mathbb{R})$  en posant, pour  $M \in \mathcal{M}_d(\mathbb{R})$ ,  $\|M\| = \sup \{ \|Mx\| ; x \in \mathbb{R}^d, \|x\| = 1 \}$ .

- Soient  $A, B \in \mathcal{M}_d(\mathbb{R})$ . Montrer que  $\|AB\| \leq \|A\| \times \|B\|$ .
- Soit  $(u_n)_{n \geq 0}$  une suite réelle. On suppose que la série de terme général  $|u_n - 1|$  converge.

Montrer que la suite de terme général  $\prod_{k=0}^n u_k$  converge.

Soit  $(M_n)_{n \geq 0}$  une suite de matrices de  $\mathcal{M}_d(\mathbb{R})$ . On suppose que la série de terme général  $\|M_n - I_d\|$  converge. On pose, pour  $n \in \mathbb{N}$ ,  $B_n = M_0 \times M_1 \times \cdots \times M_n$ .

- Montrer que la suite  $(B_n)_{n \geq 0}$  converge.
- Soit  $\sigma$  une permutation de  $\mathbb{N}$ . Que peut-on dire de la suite de terme général  $M_{\sigma(0)} \times \cdots \times M_{\sigma(n)}$ ?
- Soit  $E = \left\{ \prod_{k=0}^{+\infty} M_{\sigma(k)}, \sigma \in \mathcal{S}(\mathbb{N}) \right\}$ . Existe-t-il une suite de matrices pour laquelle  $E$  n'est pas fermée?
- Soit  $k \in \mathbb{N}^*$ . Existe-il  $(M_n)_{n \geq 0} \in (\mathcal{M}_d(\mathbb{R}))^{\mathbb{N}}$  telle que  $E$  possède exactement  $k$  composantes connexes?

**Exercice 232** [X MP 2023 # 328] On définit la longueur d'un intervalle borné  $I$  de bornes  $a$  et  $b$  par  $\ell(I) = |b - a|$ . - Soient  $N \in \mathbb{N}^*$ ,  $I_1, \dots, I_N$  des intervalles bornés de  $\mathbb{R}$  tels que  $[0, 1] \subset \bigcup_{i=1}^N I_i$ . Que peut-on dire de  $\sum_{i=1}^N \ell(I_i)$ ?

- Soit  $\delta : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^{+*}$ . Montrer qu'il existe  $p \in \mathbb{N}^*$ ,  $0 \leq x_1 < x_2 < \cdots < x_p = 1$ ,  $t_1, \dots, t_p \in \mathbb{R}$  tels que, pour tout  $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$ ,  $x_{q-1} \leq t_q \leq x_q$  et  $x_q - x_{q-1} \leq \delta(t_q)$ .
- Soit  $(I_n)_{n \geq 1}$  une suite d'intervalles bornés de  $\mathbb{R}$  telle que  $[0, 1] \subset \bigcup_{n=1}^{+\infty} I_n$ . Que peut-on dire de  $\sum_{n=1}^{+\infty} \ell(I_n)$ ?

**Exercice 233** [X MP 2023 # 329] Dans  $\mathbb{R}^2$ , on note  $D$  le disque unité fermé pour la norme infinie,  $C$  la sphère unité pour la norme infinie. On cherche à montrer qu'il n'existe pas de fonction continue  $r : D \rightarrow C$  telle que la restriction de  $r$  à  $C$  soit l'identité.

- On considère une fonction  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ , antisymétrique (i.e.  $f(x, y) = -f(y, x)$ ), et  $A = (a_{i,j})_{i,j \leq n}$  une matrice réelle telle que :

$$f(a_{i,j}, a_{i+1,j}) + f(a_{i+1,j}, a_{i+1,j+1}) + f(a_{i+1,j+1}, a_{i,j+1}) + f(a_{i,j+1}, a_{i,j}) = 0.$$

Montrer que :

$$\sum_{i=0}^{n-1} f(a_{i,1}, a_{i+1,1}) + \sum_{j=0}^{n-1} f(a_{n,j}, a_{n,j+1}) + \sum_{i=0}^{n-1} f(a_{i+1,n}, a_{i,n}) + \sum_{j=0}^{n-1} f(a_{1,j+1}, a_{1,j}) = 0$$

- Soit  $M \in \mathcal{M}_{n+2}(\mathbb{R})$  une matrice de la forme 
$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & \cdots & 1 \\ 1 & & & & 3 \\ \vdots & & M' & & \vdots \\ 1 & & & & 3 \\ 1 & 2 & \cdots & \cdots & 2 \end{pmatrix}$$
 ou  $M' \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$

est à coefficients dans  $\{1, 2, 3\}$ . Montrer qu'au moins un des petits carrés de  $M$  comporte trois valeurs différentes.

- Montrer qu'on dispose d'un  $\eta > 0$  tel que, pour tous  $x, y \in D$  vérifiant  $\|x - y\|_{\infty} \leq \eta$ , on a  $\|r(x) - r(y)\| \leq \frac{1}{10}$ .
- Soit alors  $n \in \mathbb{N}$  tel que  $\frac{2}{n-1} \leq \eta$ . Pour tous  $i, j \in \llbracket 1, n \rrbracket$ , on pose

$$v_{i,j} = \left( 1 - 2 \frac{i-1}{n-1}, 1 - 2 \frac{j-1}{n-1} \right).$$

Montrer que, pour tous  $i, j \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket$ ,  $v_{i,j}, v_{i+1,j}, v_{i+1,j+1}, v_{i,j+1}$  sont contenus dans une boule de rayon  $1/10$ .

- En utilisant une fonction bien choisie de  $C$  dans  $\{1, 2, 3\}$ , aboutir à une contradiction et conclure.
- Utiliser ce résultat pour montrer que toute fonction continue de  $D$  dans  $D$  admet un point fixe.

**Exercice 234** [X 2023 # 330] On dit qu'une famille  $(D_t)_{t \in \mathbb{R}^+}$  de disques fermés de  $\mathbb{R}^2$  vérifie  $(\mathcal{P})$  si

- pour tous  $s, t \in \mathbb{R}^+$  distincts,  $D_s$  et  $D_t$  ont des centres distincts,
- pour tous  $s, t \in \mathbb{R}^+$  tels que  $s < t$ ,  $D_s \subset D_t$ .

1. Existe-t-il une telle famille ?
2. Soit  $A: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^2$  une fonction  $C^1$  et injective. Existe-t-il une famille  $(D_t)_{t \in \mathbb{R}^+}$  vérifiant  $(\mathcal{P})$  telle que, pour tout  $t \in \mathbb{R}^+$ ,  $A(t)$  soit le centre de  $D_t$  ?
3. Le résultat subsiste-t-il si  $A$  est seulement supposée continue ?

*Démonstration.* 1. Cercles de centre  $(x, 0)$ , de rayon  $x$ .

2. Prendre  $D_t$  de rayon la longueur de la courbe de  $A(0)$  à  $A(t)$ .

3. Prendre une fonction non réglée. □

**Exercice 235** [X MP 2023 # 331] Dans tout l'énoncé,  $\mathbb{K}$  désigne  $\mathbb{R}$  ou  $\mathbb{C}$ . On se donne une  $\mathbb{K}$ -algèbre  $A$  de dimension finie, et on identifie  $\mathbb{K}$  à une sous-algèbre de  $A$  via  $\lambda \mapsto \lambda.1_A$ . On suppose donnée sur  $A$  une norme multiplicative  $\| \cdot \|$ , autrement dit une norme vérifiant  $\forall (a, b) \in A^2$ ,  $\|ab\| = \|a\| \|b\|$ . Jusqu'à la question - incluse, on suppose  $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ .

- Soit  $x \in A$ . Montrer qu'il existe un  $z_0 \in \mathbb{C}$  tel que  $\forall z \in \mathbb{C}$ ,  $\|z_0 - x\| \leq \|z - x\|$ .
- On suppose  $\|a\| = 2$  pour  $a = z_0 - x$ . Montrer que  $\|a - e^{\frac{2ikx}{n}}\| \geq 2$  pour tout  $(n, k) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}$ .
- En déduire que  $\|a - 1\| = 2$ .
- En déduire que  $A = \mathbb{C}$ .
- Retrouver le résultat de la question précédente en utilisant des polynômes annulateurs.

Dans la suite, on suppose que  $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ .

- Est-ce que  $A$  est nécessairement égale à  $\mathbb{R}$  ?
- On admet qu'il existe une  $\mathbb{R}$ -algèbre  $\mathbb{H}$  ayant une base de la forme  $(1, i, j, k)$  ou  $i, j, k$  anticommulent deux à deux et  $i^2 = j^2 = k^2 = -1$ . On considère la symétrie  $x \mapsto \bar{x}$  par rapport à  $\mathbb{R}$  parallèlement à  $\text{Vect}_{\mathbb{R}}(i, j, k)$ , et on considère la norme  $N: q \mapsto \sqrt{q\bar{q}}$ . Montrer que  $N$  est bien définie, est effectivement une norme, et qu'elle est multiplicative.
- Montrer que  $A$  est isomorphe, en tant que  $\mathbb{R}$ -algèbre, à  $\mathbb{R}$ ,  $\mathbb{C}$  ou  $\mathbb{H}$ .

**Exercice 236** [X 2023 # 332] Soient  $a, b, c$  des entiers naturels non nuls. Montrer qu'il existe un  $n \in \mathbb{N}^*$  tel que  $\sqrt{n^4 + an^2 + bn + c} \notin \mathbb{N}$ . □

*Démonstration.* Dérivée discrète.

**Exercice 237** [X MP 2023 # 333] Pour  $n \geq 2$ , on note  $\ell_n = \min \left\{ k \in \llbracket 1, n \rrbracket, \prod_{i=1}^k \left(1 - \frac{i}{n}\right) \leq \frac{1}{2} \right\}$ .

- Montrer que  $\ell_n = o(n)$ .
- Donner un équivalent de  $\ell_n$ .

**Exercice 238** [X 2023 # 334] Soient  $(a_n)$  et  $(b_n)$ , deux suites réelles positives telles que la série de terme général  $b_n$  converge, que la série de terme général  $na_n$  diverge et que  $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n = 1$ .

1. Montrer qu'il existe une unique suite  $(u_n)$  telle que,  $\forall n \in \mathbb{N}$ ,  $u_n = b_n + \sum_{k=0}^n u_k a_{n-k}$ .
2. Montrer que  $(u_n)$  est bornée.
3. Montrer que, si  $(u_n)$  converge, alors sa limite est 0.

*Démonstration.* Cf une année précédente. □

**Exercice 239** [X MP 2023 # 335] On considère la suite réelle définie par  $x_0 = 2$  et  $x_{n+1} = x_n + \frac{x_n^2}{n^2}$  pour tout  $n \geq 1$ . Montrer qu'il existe un réel  $C > 1$  tel que  $x_n \sim C^{2^n} n^2$  quand  $n \rightarrow +\infty$ .

**Exercice 240** [X MP 2023 # 336] Soit  $(a_n)_{n \geq 0}$  la suite réelle définie par  $a_0 = 1$ ,  $a_1 = 2$  et  $\forall n \in \mathbb{N}^*$ ,  $a_{n+1} = 2a_n + \frac{a_{n-1}}{n^2}$ . Donner un équivalent de  $a_n$ .

**Exercice 241** [X MP 2023 # 337] Soit  $(a_n)_{n \geq 0}$  définie par  $a_0 = \pi/2$  et  $\forall n \in \mathbb{N}$ ,  $a_{n+1} = \sin(a_n)$ . Nature de la série de terme général  $a_n^2$  ?

**Exercice 242** [X MP 2023 # 338] Soit  $\sum u_n$  une série convergente de réels positifs. Existe-t-il une suite  $(v_n)_{n \geq 0}$  de réels positifs tendant vers  $+\infty$  telle que la série  $\sum u_n v_n$  converge ?

**Exercice 243** [X MP 2023 # 339] Soit  $(x_n)$  une suite réelle. On suppose que  $(x_n y_n)$  est sommable pour toute suite réelle  $(y_n)$  de carré sommable. Montrer que  $(x_n)$  est de carré sommable.

**Exercice 244** [X MP 2023 # 340] Soit  $\sigma$  une permutation de  $\mathbb{N}^*$ . Déterminer la nature de la série  $\sum \frac{\sigma(n)}{n^2}$ .

**Exercice 245** [X MP 2023 # 341] Étudier la convergence de la série de terme général  $\frac{\sin(\ln n)}{n}$ .

**Exercice 246** [X MP 2023 # 342] On pose  $u_n = -2\sqrt{n} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{k}}$  pour tout  $n \geq 1$ .

- Montrer que  $u$  converge vers une limite  $\ell$ .
- Montrer que  $\ell = -(\sqrt{2} + 1) \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{\sqrt{n}}$ .
- Montrer que  $u_n = \ell + \frac{1}{2n^{1/2}} + O\left(\frac{1}{n^{3/2}}\right)$ .

- Montrer que  $\ell = -\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{n}(\sqrt{n}+\sqrt{n-1})^2}$ .
- Étudier les variations de  $u$ .
- Déterminer un développement asymptotique semblable à celui de la question - pour la suite de terme général  $v_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n$ .
- Soit  $\alpha \in ]0, 1[$ . Donner un développement asymptotique à trois termes pour  $w_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^\alpha}$ .

**Exercice 247** [X 2023 # 343] Soit  $f \in \mathcal{C}^0(\mathbb{R}^+, \mathbb{R}^+)$ , strictement croissante et bijective. Montrer que les séries  $\sum \frac{1}{f(n)}$  et  $\sum \frac{f^{-1}(n)}{n^2}$  sont de même nature.

*Démonstration.* La série  $\sum \frac{1}{f(n)}$  a la même nature que  $\int \frac{1}{f}$ . On peut raccorder  $f$  de manière  $\mathcal{C}^1$ , puis on pose  $u = f(t)$  :

$$\int_0^{+\infty} \frac{1}{f(t)} dt = \int_0^{+\infty} \frac{1}{u f'(f^{-1}(u))} du,$$

puis IPP. □

**Exercice 248** [X MP 2023 # 344] • Soit  $m \in \mathbb{N}^*$ . Montrer que  $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{\sqrt{m}}{(m+n)\sqrt{n}} \leq \pi$ .

Ind. : Dans  $\mathbb{R}^2$ , considérer les points  $x_n = (\sqrt{m}, \sqrt{n})$  et l'intersection  $r_n$  du cercle  $C(0, \sqrt{m})$  avec le segment  $[0, x_n]$ .

- Soient  $(a_n)_{n \geq 1}$  et  $(b_n)_{n \geq 1}$  deux suites de carré sommable et à termes positifs. On note  $A = \sum_{n=1}^{+\infty} a_n^2$  et  $B = \sum_{n=1}^{+\infty} b_n^2$ . Montrer que  $\sum_{(m,n) \in (\mathbb{N}^*)^2} \frac{a_m b_n}{m+n} \leq \pi \sqrt{AB}$ .

**Exercice 249** [X MP 2023 # 345] • Trouver les fonctions  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  monotones telles que  $\forall (x, y) \in \mathbb{R}^2, f(xy) = f(x)f(y)$ .

- Trouver les fonctions  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  monotones telles que  $\forall x \neq y \in \mathbb{R}, f\left(\frac{x+y}{x-y}\right) = \frac{f(x)+f(y)}{f(x)-f(y)}$ .

**Exercice 250** [X 2023 # 346] Que dire d'une fonction  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  continue, 1-périodique et  $\sqrt{2}$ -périodique ?

*Démonstration.* Easy. □

**Exercice 251** [X MP 2023 # 347] Trouver les fonctions  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  de classe  $\mathcal{C}^1$  telles que  $|f'| + |f + 1| \leq 1$ .

**Exercice 252** [X MP 2023 # 348] Pour  $x \geq 1$ , on note  $\Theta(x) = \sum_{p \in \mathcal{P}, p \leq x} \ln(p)$ . Montrer que  $\Theta(x) \underset{x \rightarrow +\infty}{=} O(x)$ .

**Exercice 253** [X MP 2023 # 349] Soit  $F$  un fermé de  $\mathbb{R}$ . Montrer qu'il existe une fonction  $f$  de classe  $\mathcal{C}^\infty$  de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}$  telle que  $F = f^{-1}(\{0\})$ .

**Exercice 254** [X MP 2023 # 350] Soit  $(x_n)_{n \geq 0}$  une suite de points de  $[0, 1]^2$ . Donner une condition nécessaire et suffisante pour que, pour toute permutation  $\sigma$  de  $\mathbb{N}$ , il existe une fonction continue  $f: [0, 1] \rightarrow [0, 1]^2$  et une suite strictement croissante  $(t_n)_{n \geq 0}$  d'éléments de  $[0, 1]$  telle que  $f(t_n) = x_{\sigma(n)}$  pour tout  $n \geq 0$ .

**Exercice 255** [X MP 2023 # 351] Calculer  $\int_0^1 \frac{\ln(1+t)}{1+t^2} dt$ .

**Exercice 256** [X MP 2023 # 352] Pour  $n \in \mathbb{N}^*$ , on note  $L_n$  la dérivée  $n$ -ième de  $(X^2 - 1)^n$ .

- Soit  $n \in \mathbb{N}^*$ . Montrer que :  $\forall P \in \mathbb{R}_{n-1}[X], \int_{-1}^1 P L_n = 0$ .
- Montrer que  $L_n$  possède  $n$  racines distinctes  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  dans  $] -1, 1[$ .
- Montrer qu'il existe  $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in \mathbb{R}$  tels que :  $\forall P \in \mathbb{R}_{2n-1}[X], \int_{-1}^1 P = \sum_{i=1}^n \alpha_i P(x_i)$ .

**Exercice 257** [X MP 2023 # 353] Pour  $n \in \mathbb{N}$ , on pose  $I_n = \sum_{k=0}^n (-1)^k \binom{n}{k}^3$ .

- On suppose  $n$  impair. Montrer que  $I_n = 0$ .
- On suppose  $n$  multiple de 4. Montrer que  $I_n > 0$ .
- Montrer, pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , l'égalité  $I_{2n} = (-1)^n \frac{4^{3n-1}}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^{2n}(x) \sin^{2n}(y) \sin^{2n}(x+y) dx dy$ .

**Exercice 258** [X MP 2023 # 354] • Soient  $n \in \mathbb{N}^*$  et  $f: [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}$  continue. Montrer que  $H_n: (a_0, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n) \in \mathbb{R}^{2n+1} \mapsto \int_0^{2\pi} (a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt)) - f(t))^2 dt$  admet un minimum, atteint en un unique point, et donner une expression simple de ce point en fonction de  $f$ .

▷ Déterminer la limite de  $\min H_n$  quand  $n$  tend vers  $+\infty$ .

**Exercice 259** [X MP 2023 # 355] Justifier l'existence et calculer  $\int_0^1 \frac{dt}{2 + \lfloor \frac{1}{t} \rfloor}$ .

**Exercice 260** [X 2023 # 356] Soit  $f: x \in \mathbb{R} \mapsto e^{\frac{x^2}{2}} \int_x^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ .

1. Montrer que  $f(x) < \frac{1}{x}$  pour tout  $x > 0$ .
2. Montrer que  $f(x) > \frac{\sqrt{x^2+4}-x}{2}$  pour tout  $x > 0$ .
3. Donner un développement limité à quatre termes de  $f(x)$  quand  $x \rightarrow +\infty$ .

*Démonstration.* □

**Exercice 261** [X 2023 # 357] Soient  $u, v \in \mathbb{R}$ . Pour  $r \in \mathbb{R}^+ \setminus \{|u|, |v|\}$ , calculer  $I_r(u, v) = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{(u - r e^{i\theta})(v - r e^{i\theta})}$ .

*Démonstration.* □

**Exercice 262** [X MP 2023 # 358] Soit  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$  intégrable, de classe  $C^1$ , telle que  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt = 1$ . On suppose que  $f'$  s'annule en un unique  $M \in \mathbb{R}$ .

- Donner le tableau de variations de  $f$ . Montrer qu'il existe un unique  $m \in \mathbb{R}$  tel que  $\int_{-\infty}^m f(t) dt = \frac{1}{2}$ .
- Montrer que, pour tout  $\ell \in ]0, f(M)[$  il existe un unique couple  $(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2$  tel que  $x_1 < M < x_2$  et  $f(x_1) = f(x_2) = \ell$ .
- Supposons que, pour tout  $\ell \in ]0, f(M)[$ ,  $f'(x_1) + f'(x_2) > 0$ . Montrer que  $m > M$ .

**Exercice 263** [X MP 2023 # 359] • Soient  $a$  et  $b$  deux suites réelles telles que  $b - a$  converge vers 0. Soit  $(f - m \in \mathbb{N})$  une suite de fonctions de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}$ . On suppose que, pour tout  $m \geq 0$ , il existe un entier  $N_m$  tel que  $\forall n \geq N_m$ ,  $a_m \leq f_n \leq b_m$ . Montrer que  $(f_m)$  converge uniformément vers une fonction constante.

- ▷ On note  $H$  l'ensemble des fonctions continues  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  strictement croissantes et telles que  $f(x+1) = f(x) + 1$  pour tout  $x \in \mathbb{R}$ . Montrer que  $H$  forme un groupe pour la composition des fonctions.
- ▷ Soit  $f \in H$ . Montrer que  $\sup\{f(x) - x, x \in \mathbb{R}\} < 1 + \inf\{f(x) - x, x \in \mathbb{R}\}$ .

**Exercice 264** [X MP 2023 # 360] On note  $F$  l'ensemble des fonctions de  $[0, 1]$  dans  $[0, 1]$ ,  $C$  l'ensemble des fonctions continues de  $F$ . On note aussi  $I = \{f \in F; \forall a \in [0, 1], \{x \in [0, 1], f(x) \leq a\} \text{ est ferme}\}$  et  $S = \{f \in F; \forall a \in [0, 1], \{x \in [0, 1], f(x) \geq a\} \text{ est ferme}\}$ .

Pour  $f \in F$  et  $n \in \mathbb{N}$ , soit  $L_n(f): x \in [0, 1] \mapsto \inf_{y \in [0, 1]} (f(y) + n|x - y|) \in [0, 1]$ .

- Montrer que  $C = I \cap S$ . - Montrer que, si  $f \in F$ ,  $L_n(f)$  est une suite croissante d'applications continues.
- Soit  $f \in F$ . Montrer que  $f \in I$  si et seulement s'il existe une suite  $(f_n)_{n \geq 0}$  de fonctions de  $C$  telle que pour tout  $x \in [0, 1]$ ,  $f(x) = \sup_{n \in \mathbb{N}} f_n(x)$ .

**Exercice 265** [X MP 2023 # 361] Soient  $a \in \mathbb{R}^{+*}$  et  $f: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^{+*}$  de classe  $C^1$  telle que  $\frac{f'(x)}{f(x)} \sim \frac{a}{x}$  quand  $x \rightarrow +\infty$ .

- Rappeler le theoreme d'integration des relations de comparaison.
- Donner un équivalent de  $\ln f(x)$  quand  $x \rightarrow +\infty$ .
- Déterminer le domaine de définition de la fonction  $u: x \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} f(n)e^{-nx}$ .
- Déterminer les limites de  $u$  aux bornes de son intervalle de définition.
- Montrer qu'il existe une constante  $C > 0$  telle que  $f(x) \sim \frac{C}{x} f\left(\frac{1}{x}\right)$  quand  $x \rightarrow +\infty$ .

**Exercice 266** [X MP 2023 # 362] Soit  $(a - n \in \mathbb{N})$  une suite réelle telle que  $a_0 > 0$ ,  $a_1 > 0$  et

$$\forall n \in \mathbb{N}, a_{n+2} = \frac{n+4}{n+1} a_{n+1} + \frac{3n+7}{n+2} a_n.$$

- Montrer que le rayon de convergence de la série entière  $\sum a_n x^n$  est strictement positif.
- Déterminer la valeur de ce rayon de convergence.

**Exercice 267** [X MP 2023 # 363] Pour  $x$  réel, on pose  $f(x) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{x^n}{1 - x^n}$  sous réserve de convergence.

- Déterminer le domaine de définition de  $f$ .
- Étudier la continuité puis la dérivabilité de  $f$ .
- Donner un équivalent simple de  $f$  en  $1^-$ .
- Montre que  $f$  est développable en série entière, et préciser le développement associé.

**Exercice 268** [X MP 2023 # 364] • Soient  $U$  un voisinage de 0 dans  $\mathbb{C}$ , et  $f: U \rightarrow \mathbb{C}$  somme d'une série entière. Soit  $k \in \mathbb{N}^*$  tel que  $f(z) = O(z^k)$  quand  $z$  tend vers 0. Montrer que, pour  $r$  voisin de  $0^+$ , il existe au moins  $2k$  nombres complexes  $z$  de module  $r$  tels que  $f(z)$  soit un nombre réel.

- ▷ Soient  $A$  et  $B$  deux polynômes à coefficients réels dont toute combinaison linéaire à coefficients réels est scindée ou nulle. Soient  $x < y$  deux racines de  $A$ . Montre que  $[x, y]$  contient au moins une racine de  $B$ .

**Exercice 269** [X MP 2023 # 365] Soit  $\sum a_n z^n$  une série entière de rayon de convergence égal à 1 et de somme  $f$ .

On suppose qu'il existe  $C > 0$  tel que  $\forall r \in [0, 1[, \int_0^{2\pi} |f'(re^{i\theta})| d\theta \leq C$ .

Montre que  $\int_0^1 |f(t)| dt < +\infty$ .

**Exercice 270** [X 2023 # 366] Soit  $P = a_1 X + \dots + a_d X^d \in \mathbb{Z}[X]$  avec  $a_1$  impair.

1. Montrer l'existence d'une suite réelle  $(b_k)_{k \geq 0}$  telle que  $\forall x \in \mathbb{R}, \exp(P(x)) = \sum_{k=0}^{+\infty} b_k x^k$ .
2. Montrer que les  $b_k$  sont tous non nuls.

*Démonstration.* 1.

2. Quand on dérive successivement  $e^P$ , on trouve une quantité qui vaut toujours 1 modulo 2. □

**Exercice 271** [X MP 2023 # 367] Pour  $x$  et  $q$  dans  $]0, 1[$ , on pose  $(x, q)_n = \prod_{k=0}^{n-1} (1 - q^k x)$ .

- Montrer que la suite de terme général  $(x, q)_n$  converge vers un réel  $(x, q)_\infty > 0$ .
- Déterminer le rayon de convergence de la série entière  $\sum_{n \geq 0} \frac{(x, q)_n}{(q, q)_n} z^n$ . On notera  $f_{x,q}$  sa somme sur le disque ouvert de convergence, et  $D$  son disque ouvert de convergence.
- Etablir l'identité  $f_{x,q}(z) - f_{x,q}(qz) = (1 - x)z f_{x,q,q}(z)$  pour tout  $z \in D$ .
- Etablir l'identité  $f_{x,q}(z) = \frac{1-xz}{1-z} f_{x,q}(qz)$  pour tout  $z \in D$ .

- Démontrer que  $f_{x,q}(z) = \frac{(zx,q)_\infty}{(z,q)_\infty}$  pour tout  $z \in D$ .
- Soit  $\alpha \in \mathbb{R}^{+*}$ . Déterminer, pour tout  $z \in D$ , la limite de  $f_{q^\alpha,q}(z)$  quand  $q$  tend vers  $1^-$ .

**Exercice 272** [X MP 2023 # 368] • Pour  $x \geq 0$  on pose  $f(x) = \text{card} \{(n, m) \in (\mathbb{N}^*)^2, n^2 + m^2 \leq x\}$ . Trouver un équivalent de  $f(x)$  lorsque  $x \rightarrow +\infty$ .

▷ On pose  $g(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} t^{n^2}$ . Trouver un équivalent de  $g$  en  $1^-$  en utilisant  $g^2$ .

**Exercice 273** [X MP 2023 # 369] Soit  $p$  un nombre premier. Pour tout  $F \in \mathbb{F}_p[X]$ , on pose  $|F| = p^{\deg F}$ .

- Soit  $s \in \mathbb{C}$  tel que  $\text{Re } s > 1$ . Montrre que la famille  $(|F|^{-s})$ , indexee par les polynomes  $F \in \mathbb{F}_p[X]$  unitaires, est sommable et calculer sa somme, qu'on notera  $z(s)$ .
- On note  $A$  l'ensemble des polynomes unitaires de  $F \in \mathbb{F}_p[X]$  sans facteur carre, c'est-a-dire tels que :  $\forall D \in \mathbb{F}_p[X], D^2 | F \Rightarrow \deg D = 0$ . Montrre que  $\sum_{F \in A} |F|^{-s} = \frac{z(s)}{z(2s)}$ .
- En déduire, pour tout  $d \in \mathbb{N}$ , la proportion de polynomes sans facteur carre parmi les polynomes unitaires de degre  $d$  de  $\mathbb{F}_p[X]$ .

**Exercice 274** [X MP 2023 # 370] Soit  $f$  continue sur  $[0, 1]$  et  $g : x \mapsto \int_0^1 \frac{f(t)}{1+xt} dt$  pour  $x \geq 0$ . On suppose  $f(0) \neq 0$ .

- Donner un équivalent de  $g$  lorsque  $x \rightarrow +\infty$ .
- On suppose  $f$  de classe  $\mathcal{C}^1$ . Majorer l'écart avec l'équivalent trouve.
- Que peut-on dire de plus si  $f$  est de classe  $\mathcal{C}^2$  ?

**Exercice 275** [X MP 2023 # 371] • Déterminer le domaine de définition de  $f : x \mapsto \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\pi/2} (\cos t)^{2x} dt$ .

▷ Montrre, pour tout réel  $x > 0$ , l'egalite  $f(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{+\infty} \frac{u \exp(-u^2(x+\frac{1}{2}))}{\sqrt{1-e^{-u^2}}} du$ .

**Exercice 276** [X MP 2023 # 372] • Calculer  $\int_0^{+\infty} e^{-t} \sin(xt) dt$  pour tout réel  $x$ . - On pose  $F : x \mapsto \int_0^{+\infty} \frac{\sin(xt)}{t(1+t^2)} dt$ . Montrrer que  $F$  est de classe  $\mathcal{C}^2$  sur  $\mathbb{R}^{+*}$  et que  $\forall x > 0, F''(x) = F(x) - \int_0^{+\infty} \frac{\sin t}{t} dt$

▷ Donner une expression simplifiée de  $F$ .

**Exercice 277** [X MP 2023 # 373] Soit  $f \in \mathcal{C}^0(\mathbb{R}^{+*}, \mathbb{R})$  de carre intégrable. On pose  $S_f : x \in \mathbb{R}^{+*} \mapsto \int_0^{+\infty} \frac{f(y)}{x+y} dy$ .

- Justifier la bonne définition de  $S_f$ .
- Montrrer que  $S_f$  est de carre intégrable.

**Exercice 278** [X MP 2023 # 374] Soient  $\alpha, \beta > 0$ . Pour  $x > 0$ , on pose  $I(x) = \int_0^{+\infty} t^{\beta-1} e^{-t-xt^\alpha} dt$ .

- Déterminer la limite et un équivalent de  $I$  en  $+\infty$ .
- Donner un développement asymptotique de  $I$  a tout ordre.
- Donner une condition necessaire et suffisante pour que ce développement soit la somme partielle d'une série convergente pour tout  $x > 0$ .

**Exercice 279** [X MP 2023 # 375] • Soient  $K$  un segment et  $f : K \rightarrow K$  une fonction continue croissante. Montrrer que  $f$  admet un point fixe.

▷ On considère l'équation différentielle non lineaire  $(E) : x' = \cos(x) + \cos(t)$ . On admet que pour tout  $a \in \mathbb{R}$  il existe une unique solution  $\varphi_a$  de  $(E)$  sur  $\mathbb{R}$  verifiant  $\varphi(0) = a$ , et que, pour tous  $a, b$  réels distincts, les fonctions  $\varphi_a$  et  $\varphi_b$  ne coincident en aucun point. Montrrer que  $(E)$  possède une solution  $2\pi$ -periodique.

**Exercice 280** [X MP 2023 # 376] Soient  $f$  et  $g$  deux fonctions de classe  $\mathcal{C}^1$  de  $\mathbb{R}^+$  dans  $\mathbb{R}^{+*}$ . Soit  $a \in [0, 1]$ .

- Justifier qu'il existe une unique fonction  $x_a : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$  de classe  $\mathcal{C}^1$  telle que  $\forall t \in \mathbb{R}^+, x'(t) = f(t) - (f(t) + g(t))x(t)$  et  $x(0) = a$ .
- On suppose que  $f$  et  $g$  ont une limite finie strictement positive en  $+\infty$ . Montrrer que  $x_a$  tend vers 0 en  $+\infty$ .
- Montrrer que  $f$  et  $g$  peuvent être choisies de telle sorte que  $x_a$  n'ait pas de limite en  $+\infty$ .
- On suppose que l'une des fonctions  $f$  et  $g$  n'est pas intégrable sur  $\mathbb{R}^+$ . Montrrer que  $x_1 - x_0$  tend vers 0 en  $+\infty$ .

**Démonstration.** 1. On peut exprimer la solution, via exp.

2. Utiliser l'expression.

3. Prendre  $f + g$  constante, et  $f$  qui oscille.

4. Expression intégrale. □

**Exercice 281** [X MP 2023 # 377] Soient  $v : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction continue à support compact et  $\omega \in \mathbb{R}^{+*}$ . On considère l'équation différentielle  $y'' + \omega^2 y = v(t)$  dont on note  $\mathcal{S}_E$  l'ensemble des solutions.

- Montrrer que, pour tout  $(a, b) \in \mathbb{R}^2$ , il existe une unique solution  $f_{a,b}^+$  (resp.  $f_{a,b}^-$ ) de  $(E)$  telle que  $f_{a,b}^+(t) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)$  pour tout  $t$  dans un voisinage de  $+\infty$ , (resp.  $f_{a,b}^-(t) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)$  pour tout  $t$  dans un voisinage de  $-\infty$ ).
- Montrrer que  $\mathcal{S}_E = \{f_{a,b}^+, (a, b) \in \mathbb{R}^2\} = \{f_{a,b}^-, (a, b) \in \mathbb{R}^2\}$ .
- On pose  $c(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} v(t) \cos(\omega t) dt$  et  $s(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} v(t) \sin(\omega t) dt$ , et on définit l'application  $S_\omega : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  par :  $f_{a,b}^- = f_{S_\omega(a,b)}^+$  pour tout  $(a, b) \in \mathbb{R}^2$ . Expliciter l'application  $S_\omega$  en fonction de  $c(\omega)$  et  $s(\omega)$ .
- On suppose que  $S_\omega = \text{id}_{\mathbb{R}^2}$  pour tout  $\omega > 0$ . Montrrer que  $v$  est identiquement nulle.

*Démonstration.* 1. Appliquer les conditions aux bords du compact.

2. Pas de difficulté.

3. Méthode de variation de la constante je pense, à écrire. □

**Exercice 282** [X MP 2023 # 378] Soient  $q_1, q_2$  deux fonctions continues de  $\mathbb{R}^+$  dans  $\mathbb{R}$  telles que  $q_1 \leq q_2$ . On considère l'équation différentielle  $(E_i) : y'' + q_i(t)y = 0$  pour  $i \in \{1, 2\}$ .

- Soient  $y_1, y_2$  des solutions respectives de  $(E_1)$  et  $(E_2)$  sur  $I$ . Soient  $\alpha < \beta$  deux zéros de  $y_1$ . Montrer que  $y_2$  s'annule dans  $[\alpha, \beta]$ .
- Soient  $q : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$  continue,  $m, M$  deux réels strictement positifs tels que  $m \leq q \leq M$ . Soient  $\alpha < \beta$  deux zéros consécutifs d'une solution non nulle  $x$  de  $y'' + q(t)y = 0$ .
- Montrer que les zéros de  $x$  forment une suite strictement croissante ( $t_n \in \mathbb{N}$ ).
- Montrer que  $\frac{\pi}{\sqrt{M}} \leq t_{n+1} - t_n \leq \frac{\pi}{\sqrt{m}}$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ .

**Exercice 283** [X MP 2023 # 379] • Soit  $p$  un projecteur d'un espace vectoriel  $E$  de dimension finie, et  $u \in \mathcal{L}(E)$  tel que  $pu + up = u$ . Montrer que  $\text{tr}(u) = 0$ .

- Soit  $E$  un espace euclidien de dimension  $n \geq 1$ . Soit  $r \in \llbracket 0, n \rrbracket$ . On note  $G$  l'ensemble des projecteurs orthogonaux de  $E$  de rang  $r$ . Soit  $p \in G$ . Déterminer l'espace vectoriel tangent à  $G$  en  $p$ .

*Démonstration.* •  $pup = 0$

- $u$  symétrique +  $pu + up = u$  (puisque c'est le noyau de l'application linéaire).

$u$  doit envoyer  $\text{Im } p$  dans  $\text{Ker } p$  et  $\text{Ker } p$  dans  $\text{Im } p$ . □

**Exercice 284** [X MP 2023 # 380] On munit  $\mathbb{R}^2$  de sa structure euclidienne canonique. On considère le carré de coins  $\{0, 1\} \times \{0, 1\}$ . On choisit trois points  $A, B$  et  $C$  sur ce carré.

- Montrer qu'il existe une disposition des points  $A, B$  et  $C$  maximisant l'aire du triangle  $ABC$ .
- Caractériser une telle disposition.

### 3) Géométrie

**Exercice 285** [X MP 2023 # 381] Pour  $n \geq 2$ , on note  $P_n$  le périmètre d'un polygone régulier à  $2^n$  cotés inscrit dans le cercle unité.

- Calculer  $P_n$  et étudier la convergence de la suite ( $P_n - n \geq 2$ ).
- Établir une relation de récurrence entre  $P_n$  et  $P_{n+1}$ .
- Estimer l'erreur  $2\pi - P_n$ .
- Proposer une méthode d'approximation de  $\pi$  par excès.

**Exercice 286** [X MP 2023 # 382] On se donne un triangle direct  $ABC$  du plan complexe. On note respectivement  $a, b, c$  les mesures principales des angles orientés  $(\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AC})$ ,  $(\overrightarrow{BC}, \overrightarrow{BA})$  et  $(\overrightarrow{CA}, \overrightarrow{CB})$ . On note  $P$  l'unique point tel que  $\frac{b}{3}$  soit une mesure de  $(\overrightarrow{BC}, \overrightarrow{BP})$  et  $\frac{c}{3}$  soit une mesure de  $(\overrightarrow{CP}, \overrightarrow{CB})$ ;  $Q$  l'unique point tel que  $\frac{a}{3}$  soit une mesure de  $(\overrightarrow{AQ}, \overrightarrow{AC})$  et  $\frac{c}{3}$  soit une mesure de  $(\overrightarrow{CA}, \overrightarrow{CQ})$ ;  $R$  l'unique point tel que  $\frac{a}{3}$  soit une mesure de  $(\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AR})$  et  $\frac{b}{3}$  soit une mesure de  $(\overrightarrow{BR}, \overrightarrow{BA})$ . L'objectif est de montrer que le triangle  $PQR$  est équilatéral.

- On note  $f, g, h$  les rotations de centres respectifs  $A, B, C$  et d'angles de mesures respectives  $\frac{2a}{3}, \frac{2b}{3}$  et  $\frac{2c}{3}$ . Montrer que  $P$  est l'unique point fixe de  $g \circ h$ .
- Montrer que  $(f^3 \circ g^3 \circ h^3)(z) = z$  pour tout nombre complexe  $z$ .
- On note  $f : z \mapsto a_1z + b_1, g : z \mapsto a_2z + b_2$  et  $h : z \mapsto a_3z + b_3$ . Exprimer  $P, Q, R$  en fonction des  $a_i$  et des  $b_i$ .
- Conclure.

### 4) Probabilités

**Exercice 287** [X MP 2023 # 383] Déterminer le nombre moyen de 2-cycles, de 3-cycles, de  $p$ -cycles, d'une permutation de  $\llbracket 1, n \rrbracket$ .

**Exercice 288** [X MP 2023 # 384] • Montrer que  $\forall x \in \mathbb{R}^{+*}, \frac{e^{-x}}{(1-e^{-x})^2} < \frac{1}{x^2}$ .

- ▷ Soit  $n \in \mathbb{N}^*$ . On appelle partition de  $n$  toute liste décroissante  $(\lambda - 1 \leq k \leq n)$  d'entiers naturels non nuls de somme  $n$ . On note  $P(n)$  le nombre de telles listes.

Montrer que  $P(n) \leq 2^{n-1}$ .

- On fixe  $n \geq 1$  et on considère une variable aléatoire  $X$  suivant la loi uniforme sur l'ensemble des partitions de  $n$ . On fixe  $k \in \mathbb{N}^*$  et  $j \in \mathbb{N}$ . On pose  $N_k = |\{i \in \llbracket 1, n \rrbracket : X_i = k\}|$ .

Exprimer  $\mathbf{P}(N_k \geq j)$  comme un quotient  $\frac{P(a)}{P(b)}$  pour des entiers  $a$  et  $b$  à préciser.

- Calculer  $\sum_{i=1}^n iN_i$ .

**Exercice 289** [X MP 2023 # 385] On considère la suite  $(a_n)$  définie par  $a_1 = 0, a_2 = 1$  et  $a_n = a_{n-1} + a_{n-2}$  pour  $n \geq 3$ .

- Calculer  $\sum_{n=2}^{+\infty} \frac{a_n}{2^n}$ .
- On lance une pièce non truquée. Déterminer la loi de la variable aléatoire  $X$  qui donne l'instant de première apparition du motif Face-Face.
- Calculer  $\mathbf{E}(X)$  et  $\mathbf{V}(X)$ .

- Donner un équivalent de  $\mathbf{P}(X = n)$ .

**Exercice 290** [X MP 2023 # 386] Soit  $n \in \mathbb{N}^*$ . On munit  $\mathcal{S}_n$  de la loi uniforme, et on note  $N$  la variable aléatoire associant à tout  $\sigma \in \mathcal{S}_n$  le nombre de ses orbites.

- Calculer  $\mathbf{P}(N = 1)$  et  $\mathbf{P}(N = n)$ .
- Donner une formule simple pour la fonction génératrice de  $N$ .
- Donner un équivalent de  $\mathbf{E}(N)$  quand  $n$  tend vers  $+\infty$ .
- Donner un équivalent de  $\mathbf{V}(N)$  quand  $n$  tend vers  $+\infty$ .

**Exercice 291** [X MP 2023 # 387] Soient  $n \geq 2$ ,  $X_1, \dots, X_n$  des variables aléatoires i.i.d. suivant la loi uniforme sur  $\llbracket 1, n \rrbracket$ . Soit  $(e_1, \dots, e_n)$  la base canonique de  $\mathbb{C}^n$  et  $f_{(X_1, \dots, X_n)}$  la variable aléatoire à valeurs dans  $\mathcal{L}(\mathbb{C}^n)$  telle que, pour tout  $i$ ,  $f_{(X_1, \dots, X_n)}(e_i) = e_{X_i}$ .

- Déterminer  $\mathbf{E}(\operatorname{rg}(f_{(X_1, \dots, X_n)}))$ .
- Pour  $z \in \mathbb{C}$ , soit  $\mu_z$  la multiplicité de  $z$  comme valeur propre de  $f_{(X_1, \dots, X_n)}$ . Calculer  $\mathbf{E}(\mu_z)$ .

**Exercice 292** [X MP 2023 # 388] Soient  $b, n \in \mathbb{N}^*$ . On considère  $(B_i)_{1 \leq i \leq n}$  des variables aléatoires indépendantes suivant la loi uniforme sur  $\llbracket 0, b-1 \rrbracket$ . On note  $S$  l'ensemble des descentes de la suite  $B$  c'est-à-dire  $S = \{i \in \llbracket 1, n \rrbracket \mid B_i > B_{i+1}\}$ .

- Pour  $i \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket$ , calculer  $\mathbf{P}(B_i > B_{i+1})$ .
- Soit  $j \in \llbracket 1, n-j-1 \rrbracket$ . Calculer  $\mathbf{P}(B_1 > B_2 > \dots > B_{j+1})$ .
- Pour  $I \subset \llbracket 1, n \rrbracket$ , on pose  $\alpha(I)$  (resp.  $\beta(I)$ ) le nombre de suites à  $n$  éléments à valeurs dans  $\llbracket 0, b-1 \rrbracket$  qui vérifient  $S \subset I$  (resp.  $S = I$ ). Exprimer  $\alpha$  en fonction de  $\beta$ , puis  $\beta$  en fonction de  $\alpha$ .

**Exercice 293** [X MP 2023 # 389] Si  $n \in \mathbb{N}^*$ ,  $\sigma \in \mathcal{S}_{2n}$  et  $k \in \{1, \dots, 2n\}$ , on note  $s(\sigma, k)$  le segment de  $\mathbb{C}$  qui joint les points  $e^{\frac{ik\pi}{n}}$  et  $e^{\frac{i\sigma(k)\pi}{n}}$ . On note  $b(\sigma)$  le nombre de segments qui ne croisent aucun autre segment (ou on dit que deux segments se croisent s'ils ont un point d'intersection qui n'est pas une extrémité).

Pour  $n \in \mathbb{N}^*$ , soit  $\sigma_n$  une variable aléatoire suivant la loi uniforme sur  $\mathcal{S}_{2n}$ . Déterminer  $\mathbf{E}(b(\sigma_n))$  et en donner un équivalent.

**Exercice 294** [X 2023 # 390] Soient  $p \in [0, 1/2]$ ,  $(X_n)_{n \geq 1}$  i.i.d. telle que  $\mathbf{P}(X_n = -1) = \mathbf{P}(X_n = 1) = p$  et  $\mathbf{P}(X_n = 0) = 1 - 2p$ . On cherche  $p$  tel que :  $\forall n \in \mathbb{N}^*, \forall a_1, \dots, a_n, b \in \mathbb{Z}, \mathbf{P}(\sum_{i=1}^n a_i X_i = 0) \geq \mathbf{P}(\sum_{i=1}^n a_i X_i = b)$ .

1. Montrer que  $p \leq \frac{1}{3}$ , puis que  $p < \frac{1}{3}$  et enfin que  $p \leq \frac{1}{4}$ .
2. Si  $X$  une variable aléatoire à valeurs dans  $\mathbb{Z}$ , on pose  $\Phi_X : \theta \mapsto \mathbf{E}(e^{iX\theta})$ . Exprimer  $\mathbf{P}(X = k)$  en fonction de  $\Phi_X$ .
3. En déduire que  $p \leq \frac{1}{4}$  est une condition suffisante.

*Démonstration.* 1. On regarde les probabilités, jusqu'à  $n = 3$ .

2.  $\Phi_X(\theta) = \sum P(X = k)e^{ikt}$  et formule de Cauchy.

3.

□

**Exercice 295** [X MP 2023 # 391] Soient  $n$  et  $d$  des entiers tels que  $1 \leq d < n$ , et  $X_1, \dots, X_n$  des variables aléatoires indépendantes uniformément distribuées sur  $\llbracket 0, d \rrbracket$ . On note  $S_n$  la classe de  $X_1 + \dots + X_n$  dans  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ .

- La variable aléatoire  $S_n$  est-elle uniformément distribuée sur  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ ?
- Calculer la loi de  $S_n$ .

*Démonstration.* • Non, cf  $d = 1$ , c'est une loi binomiale.

- Fonction génératrice.

□

**Exercice 296** [X MP 2023 # 392] Soient  $d \in \mathbb{N}^*$ ,  $(X_n)_{n \geq 1}$  une suite i.i.d. de variables aléatoires suivant la loi uniforme sur  $\llbracket 1, d \rrbracket$ . Pour  $n \in \mathbb{N}^*$ , on pose  $S_n = X_1 + \dots + X_n$ .

- Soient  $Y$  une variable aléatoire à valeurs dans  $\mathbb{Z}$ ,  $r \in \llbracket 0, d-1 \rrbracket$ ,  $\omega = e^{2i\pi/n}$ .  
Montrer que  $\mathbf{P}(Y \equiv r [d]) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{\omega^{kr}} \mathbf{E}(\omega^{kY})$ .
- Soit  $\llbracket 0, d-1 \rrbracket$ . Donner une expression de  $\mathbf{P}(S_n \equiv r [d])$ .
- Déterminer la limite de la suite de terme général  $\mathbf{P}(S_n \equiv 0 [d])$ .

**Exercice 297** [X MP 2023 # 393] Soit  $n \geq 1$ .

- On se donne deux variables aléatoires indépendantes  $X_n$  et  $Y_n$  suivant chacune la loi uniforme sur  $\llbracket 1, n \rrbracket^2$ . Soit  $r \in \mathbb{Q}$ . Déterminer la probabilité  $u_n(r)$  pour que  $X_n$  et  $Y_n$  soient deux points distincts et le coefficient directeur de la droite  $(X_n Y_n)$  soit égal à  $r$ . Donner un équivalent de  $u_n(r)$  lorsque  $n \rightarrow +\infty$ .
- On se donne quatre variables aléatoires indépendantes  $X_n, Y_n, A_n, B_n$  suivant chacune la loi uniforme sur  $\llbracket 1, n \rrbracket^2$ . On note  $p_n$  la probabilité pour que  $X_n \neq Y_n, A_n \neq B_n$  et les droites  $(X_n Y_n)$  et  $(A_n B_n)$  soient parallèles. Montrer que  $p_n = O(\frac{\ln n}{n^2})$  quand  $n \rightarrow +\infty$ .

*Démonstration.* !!

- C'est la probabilité que  $\frac{a_n - b_n}{c_n - d_n} = \frac{p}{q}$ , c'est-à-dire  $p(c_n - d_n) = q(a_n - b_n)$ . Les différences suivent des lois

□

**Exercice 298** [X MP 2023 # 394] • Soit  $a \in [1, 2]$ . On pose  $f_a : x \mapsto |1+x|^a - |2x|^a - ax$ . Montrer :  $\forall x \in \mathbb{R}, f_a(x) \leq 1$ .

- Soit  $X$  une variable aléatoire réelle centrée et admettant un moment d'ordre 2. Montrer :  $\forall c \in \mathbb{R}, \mathbf{E}(|c+X|^a) \leq 2^a \mathbf{E}(|X|^a) + |c|^a$ .

- Soit  $(X_n)_{n \geq 1}$  une suite i.i.d. de variables aléatoires centrées admettant un moment d'ordre 2. Montrer que, pour  $n \in \mathbb{N}^*$ ,  $\mathbf{E}(|\sum_{i=1}^n X_i|^a) \leq 2^a \sum_{i=1}^n \mathbf{E}(|X_i|^a)$ .

**Exercice 299** URNE DE POLYA [X MP 2023 # 395] Une urne contient  $a$  boules jaunes et  $b$  boules rouges. On effectue une succession de tirages d'une boule dans l'urne avec remise. A chaque tirage, on ajoute une boule de la couleur de celle tirée dans l'urne. On note  $X_n$  le nombre de boules jaunes dans l'urne après  $n$  tirages et  $T_n$  l'événement «tirer une boule jaune au  $n$ -ième tirage».

1. Calculer  $P(T_1 | T_2)$ .
2. Déterminer la loi de  $X_n$ .
3. Calculer  $P(T_n)$ .
4. Pour  $n_1, \dots, n_p, m_1, \dots, m_q$  tous distincts, calculer  $P(T_{n_1} \cap \dots \cap T_{n_p} \cap \overline{T_{m_1}} \cap \dots \cap \overline{T_{m_q}})$ .

*Démonstration.* 1.

2.  $P(X_n = a) = \frac{b}{a+b} \frac{b+1}{a+b+1} \dots \frac{b+n-1}{a+b+(n-1)}$   
 $P(X_n = a+1) = n \frac{b}{a+b} \frac{b+1}{a+b+1} \dots \frac{b+n-2}{a+b+(n-2)} \frac{a}{a+b+(n-1)}$ .  
 En général,  $P(X_n = a+k) = \binom{n}{k} \frac{(a+b-1)!}{(a+b+n-1)!} \frac{(b+n-k-1)!}{(b-1)!} \frac{a+k-1!}{(a-1)!}$ .

3. dur dur,  $E(X_n)$

4. □

**Exercice 300** [X 2023 # 396] Soient  $n \geq 1$  et  $A, B, C$  des variables aléatoires indépendantes uniformément distribuées sur  $\{0, 1\}^n$ .

1. Pour  $n \geq 2$ , calculer la probabilité  $p_n$  que  $ABC$  soit un triangle équilatéral.
2. Déterminer un équivalent de  $p_n$ .

*Démonstration.* Relier à un précédent.

1. On prend  $A = \vec{0}$ . Alors on veut  $B, C$  avec autant de termes 1, et autant de différences entre les deux.

On considère les ensembles  $B \subset \llbracket 1, n \rrbracket$ ,  $C \subset \llbracket 1, n \rrbracket$ , et  $B \oplus C$ .

Les parties  $U = B \setminus C$ ,  $V = C \setminus B$  et  $W = B \cap C$  vérifient  $u + w = v + w = u + v$ , donc ils sont de même cardinaux, et disjoints. □

**Exercice 301** [X MP 2023 # 397] On munit l'ensemble  $\mathcal{S}_n$  des permutations de  $[1, n]$  de la probabilité uniforme. Soit  $X_n$  la variable aléatoire donnant le nombre de points fixes d'une permutation aléatoire  $\sigma \in \mathcal{S}_n$ .

- Calculer  $\mathbf{P}(X_n = 0)$ .
- Déterminer la loi de  $X_n$ .
- Étudier la convergence en loi de la suite  $(X - n \in \mathbb{N}^*)$ .
- Calculer les espérance et variance de la variable aléatoire  $X_n$ .

**Exercice 302** [X MP 2023 # 398] Soit  $M = \begin{pmatrix} a & -b & -c & -d \\ b & a & d & -c \\ c & -d & a & b \\ d & c & -b & a \end{pmatrix}$  une matrice aléatoire ou  $(a+1) \sim \mathcal{P}(\alpha)$ ,  $(b+1) \sim \mathcal{P}(\beta)$ ,  $(c+1) \sim \mathcal{P}(\gamma)$  et  $(d+1) \sim \mathcal{P}(\delta)$ .

- Calculer la probabilité que la matrice  $M$  soit inversible.
- Calculer la probabilité que la matrice  $M$  soit inversible et diagonalisable dans  $\mathbb{R}$ .

**Exercice 303** [X MP 2023 # 399] Soient  $X$  et  $Y$  deux variables aléatoires à valeurs dans  $\mathbb{N}$  vérifiant  $\mathbf{P}(X \geq Y) = 1$ , et, pour tout  $n \in \mathbb{N}$  et tout  $i \in \llbracket 0, n \rrbracket$ ,  $\mathbf{P}(X = n) > 0$  et  $\mathbf{P}(Y = i | X = n) = \frac{1}{n+1}$ .

- Montrer que, si  $(i, j) \in \mathbb{N}^2$ ,  $\mathbf{P}(X = i, Y = j) = \mathbf{P}(X = i, X - Y = j)$ , puis que  $X - Y \sim Y$ .
- Montrer que  $\mathbf{P}(Y = 0) > 0$ .
- On suppose que  $X - Y$  et  $Y$  sont indépendantes. Déterminer la loi de  $Y$ , puis celle de  $X$ .

**Exercice 304** [X MP 2023 # 400] Soit  $n \geq 3$  un entier. Si  $k \in \mathbb{Z}$ , on note  $\bar{k}$  la réduction de  $k$  modulo  $n$ . Soient  $X_1, \dots, X_n$  des variables aléatoires indépendantes à valeurs dans  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  telles que, pour tout  $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$ ,  $X_k$  suit la loi uniforme sur  $\{\bar{1}, \bar{2}, \bar{3}\}$ . Soit  $F$  l'application aléatoire de  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  dans lui-même telle que, pour tout  $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$ ,  $F(\bar{k}) = \bar{k} + X_k$ . Calculer la probabilité que  $F$  soit bijective.

**Exercice 305** [X MP 2023 # 401] On cherche à collectionner  $N$  jouets. A chaque achat, chaque jouet a une probabilité uniforme d'être obtenu. Pour  $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$ , on note  $T_i$  le temps d'attente pour obtenir  $i$  jouets différents.

- Calculer l'espérance de  $T_N$ .
- Calculer la variance de  $T_N$ .
- Montrer que  $\forall \varepsilon > 0$ ,  $\mathbf{P}(|\frac{T_N}{N \ln N} - 1| \geq \varepsilon) \rightarrow 0$  quand  $N \rightarrow +\infty$ .

**Exercice 306** [X MP 2023 # 402] Soit  $(X - n \in \mathbb{N}^*)$  une suite i.i.d. de variables aléatoires réelles centrées. On suppose que  $\mathbf{E}(X_1^4) < +\infty$ .

- Montrer que  $\mathbf{E}((X_1 + \dots + X_n)^4) = O(n^2)$ .

- Pour  $\varepsilon > 0$ , quelle est la nature de la série de terme général  $\mathbf{P}\left(\frac{X_1 + \dots + X_n}{n} > \varepsilon\right)$  ?

**Exercice 307** [X MP 2023 # 403] Soient  $x \in \mathbb{R}^{+*}$ ,  $(X - k \geq 1)$  une suite i.i.d. de variables aléatoires suivant la loi  $\mathcal{P}(x)$ . Pour  $n \in \mathbb{N}^*$ , soient  $S_n = \sum_{k=1}^n X_k$ ,  $T_n = \frac{S_n - n}{\sqrt{n}}$ .

- Montrer que  $\int_0^{+\infty} \mathbf{P}(T_n \geq x) dx = \sqrt{n} \left(\frac{n}{e}\right)^n \frac{1}{n!}$ .
- On admet que, pour tout  $x \in \mathbb{R}$ ,  $\mathbf{P}(T_n \geq x) \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2/2} dt$ . Retrouver la formule de Stirling.