

Suites

Exercice 1 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2021

Soit $n \in \mathbb{N}^*$. On note (E_n) l'équation $\frac{\ln(x)}{x} = \frac{1}{n}$.

1. Montrer qu'il existe des suites (u_n) et (v_n) telles que, pour n assez grand, u_n et v_n vérifient (E_n) et $0 < u_n < e < v_n$.
2. Montrer que la suite (u_n) converge. On note ℓ sa limite
3. Trouver un équivalent de $u_n - \ell$.

Exercice 2 ★★★

Centrale

1. Pour $n \in \mathbb{N}^*$, montrer que l'équation $\sum_{k=1}^n \frac{x^k}{k} = 1$ admet une unique solution x_n dans \mathbb{R}_+ .
2. Etudier la convergence de la suite (x_n) .
3. Calculer sa limite.

Exercice 3

ENSEA

1. Montrer que pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, l'équation $\cos x = nx$ possède une unique solution $x_n \in [0, 1]$.
2. Déterminer la limite de (x_n) .
3. Etudier la monotonie de (x_n) .
4. Etablir que $x_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{n}$.
5. Déterminer un équivalent de $x_n - \frac{1}{n}$.

Exercice 4 ★★★

CCINP (ou CCP) PC 2014

Montrer que $\sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n^2} - \sin\left(\frac{k}{n^2}\right) \right)$ tend vers 0 quand n tend vers $+\infty$.

En déduire la limite de $\sum_{k=1}^n \sin\left(\frac{k}{n^2}\right)$ quand n tend vers $+\infty$.

Polynômes

Exercice 5 ★★

Banque CCP

Soient $\theta \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}^*$. Décomposez en produit de polynômes irréductibles dans $\mathbb{C}[X]$, puis dans $\mathbb{R}[X]$ le polynôme :

$$P = X^{2n} - 2X^n \cos(n\theta) + 1$$

Exercice 6 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2023

Montrer que $P = X^3 + 3X^2 + 2$ est irréductible sur \mathbb{Q} .

Exercice 7 ★★★★★

Stabilité

1. Déterminer les polynômes $P \in \mathbb{C}[X]$ tels que $P(\mathbb{R}) \subset \mathbb{R}$.
2. Déterminer les polynômes $P \in \mathbb{C}[X]$ tels que $P(\mathbb{U}) \subset \mathbb{U}$.
3. Déterminer les polynômes $P \in \mathbb{C}[X]$ tels que $P(\mathbb{Q}) \subset \mathbb{Q}$.

Exercice 8 ★★

CCP PC

Soient x, y, z trois complexes non nuls tels que $x + y + z = 0$ et $\frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} = 0$. Montrer que $|x| = |y| = |z|$.

Exercice 9**CCINP (ou CCP) PC 2019**

Soit $z \in \mathbb{C}^*$. On pose $f(z) = z + \frac{1}{z}$.

1. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Montrer que $f(z^{n+1}) = f(z)f(z^n) - f(z^{n-1})$.
2. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Montrer qu'il existe un polynôme P_n de degré n et de coefficient dominant un tel que : $\forall z \in \mathbb{C}^*, f(z^n) = P_n(f(z))$. On donnera une expression de P_{n+1} en fonction de P_n et P_{n-1} .
3. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Montrer que le seul polynôme Q vérifiant : $\forall z \in \mathbb{C}^*, f(z^n) = Q(f(z))$ est P_n .
4. Soient $n \in \mathbb{N}^*$ et $k \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket$. On pose $z_k = e^{\frac{i(2k+1)\pi}{2n}}$. Calculer $f(z_k^n)$. Que peut-on en déduire ? Donner une expression des P_n .
5.
 - a. Montrer que $(P_n(0))_{n \in \mathbb{N}}$ est une suite récurrente linéaire d'ordre 2.
 - b. En déduire le coefficient constant de P_n .
6. Calculer $\prod_{k=0}^{n-1} \cos\left(\frac{(2k+1)\pi}{2n}\right)$.
7. Calculer $\sum_{k=0}^{n-1} \cos\left(\frac{(2k+1)\pi}{2n}\right)$.

Exercice 10 ★★**Mines-Ponts MP**

Trouver les polynômes $P \in \mathbb{R}[X]$ tels que $(X+4)P(X) = XP(X+1)$.

Exercice 11 ★★**CCINP (ou CCP) MP 2016**

Soit $E = \mathbb{R}_n[X]$. On considère la suite de polynômes définie par : $N_0 = 1$ et pour $k \in \mathbb{N}^*$, $N_k(X) = \frac{X(X-1)\dots(X-k+1)}{k!}$. On considère l'endomorphisme de E défini par $u(P) = P(X+1) - P(X)$.

1. Déterminer le noyau de u .
2. Montrer que (N_0, \dots, N_n) est une base de E .
3. Calculer $u(N_k)$.
4. Montrer que u est nilpotent. Quel est son indice de nilpotence ?
5. Soit $P \in \mathbb{R}_{n-1}[X]$ ($n \in \mathbb{N}^*$). Montrer qu'il existe un unique $Q \in E$ tel que $u(Q) = P$ et $Q(0) = 0$.

Algèbre générale**Exercice 12 ★★****CCINP (ou CCP) MP 2015**

Soit $(A, +, \times)$ un anneau commutatif.

1. Rappeler la définition d'un anneau et d'un idéal.
2. Soit I un idéal de A . Montrer que si $1_A \in I$, alors $I = A$.
3. On pose $I_a = \{ax, x \in A\}$. Montrer que I_a est bien un idéal de A .
4. On suppose que A n'est pas l'anneau nul. Montrer que A est un corps si et seulement si les seuls idéaux de A sont $\{0_A\}$ et A .

Exercice 13**Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2022**

Pour un anneau A , on dit qu'un idéal I de A est premier si et seulement si :

$$\forall (x, y) \in A^2, xy \in I \implies x \in I \text{ ou } y \in I$$

Soit A un anneau abélien dont tous les idéaux sont premiers. Montrer que A est un anneau intègre, puis que A est un corps.

Exercice 14 ★★★★★

ENS MP 2011

On s'intéresse aux sous-groupes discrets de $(\mathbb{C}, +)$ et $(\mathrm{SL}_2(\mathbb{R}), \times)$.

1. Donner des exemples de tels sous-groupes.
2. Soit Γ un sous-groupe discret non trivial de $(\mathbb{C}, +)$ et $\lambda \in \mathbb{C}^*$ tel que $\lambda\Gamma = \Gamma$. Montrer que $\lambda^4 = 1$ ou $\lambda^6 = 1$.
3. Soit $\lambda \in \mathbb{R}^*$ et Γ le sous-groupe de $\mathrm{SL}_2(\mathbb{R})$ engendré par $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ et $\begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda^{-1} \end{pmatrix}$. A quelle condition sur λ le sous-groupe Γ est-il discret ?

Exercice 15 ★★

Mines-Ponts MP 2016

Soit p un nombre premier impair et k un diviseur premier de $2^p - 1$. Montrer que $k \equiv 1[2p]$.

Exercice 16 ★★★

Banque Mines-Ponts MP 2021

Soit G un groupe fini. On suppose que tous les éléments de G sont d'ordre au plus 2. Que peut-on dire du cardinal de G ?

Exercice 17

C.C.E. Mines MP 2015

Soit $a \in \mathbb{R}_+^*$. On pose pour $h \in \mathbb{R}$, $A(h) = \begin{pmatrix} a^h & 0 & 0 \\ 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ et $E = \{A(h), h \in \mathbb{R}\}$.

1. Montrer que E est un groupe multiplicatif isomorphe à $(\mathbb{R}, +)$.
2. Calculer $\exp(tV)$ avec $V = A'(0)$

Exercice 18 ★★

Caractéristique d'un anneau

Soit $(A, +, \times)$ un anneau non nul. Si 1_A est d'ordre fini n dans le groupe $(A, +)$, on dit que A est de *caractéristique* n . Sinon, on dit que A est de caractéristique nulle.

1. Déterminer les caractéristiques des anneaux \mathbb{Z} et $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$.
2. Montrer que si A est de caractéristique n , $nx = 0_A$ pour tout $x \in A$.
3. On suppose que A est un anneau intègre. Montrer que la caractéristique de A est soit nulle, soit un nombre premier.
4. On suppose que A est un anneau commutatif dont la caractéristique est un nombre premier p . Montrer que l'application $f : x \in A \mapsto x^p$ est un endomorphisme d'anneau. Que peut-on dire de f si A est intègre ? si A est intègre et fini ?
5. Soit \mathbb{K} un corps fini de caractéristique p . Montrer que p est un nombre premier puis qu'on peut munir \mathbb{K} d'une structure de $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -espace vectoriel. En déduire qu'il existe $n \in \mathbb{N}$ tel que $\mathrm{card} F = p^n$.

Algèbre linéaire

Exercice 19 ★★

CCP MP

Pour $p \in \mathbb{N}$ et $\alpha \in \mathbb{R} \setminus \{0, 1\}$, on note S_p l'ensemble des suites réelles u vérifiant :

$$\exists P \in \mathbb{R}_p[X], \forall n \in \mathbb{N}, u_{n+1} = \alpha u_n + P(n)$$

1. Montrer que si $u \in S_p$, P est unique. On notera P_u ce polynôme.
2. Montrer que S_p est un \mathbb{R} -espace vectoriel.
3. Montrer que l'application $\phi : \begin{cases} S_p & \longrightarrow \mathbb{R}_p[X] \\ u & \longmapsto P_u \end{cases}$ est linéaire et donner une base de son noyau.
4. Quelle est l'image de ϕ ? Donner une base de S_p . On pourra utiliser les polynômes $R_k = (X+1)^k - \alpha X^k$ avec $k \in \llbracket 0, p \rrbracket$.
5. Application : déterminer le terme général de la suite u définie par $u_0 = -2$ et $u_{n+1} = 2u_n - 2n + 7$.

Exercice 20 ★★★

Mines P' 1995

Soit E un espace vectoriel de dimension finie et f un endomorphisme de E nilpotent d'indice n . On pose

$$\Phi: \begin{cases} \mathcal{L}(E) & \longrightarrow \mathcal{L}(E) \\ g & \longmapsto f \circ g - g \circ f \end{cases}$$

1. Montrer que $\Phi^p(g) = \sum_{k=0}^p (-1)^k \binom{p}{k} f^{p-k} \circ g \circ f^k$. En déduire que Φ est nilpotent.
2. Soit $a \in \mathcal{L}(E)$. Montrer qu'il existe $b \in \mathcal{L}(E)$ tel que $a \circ b \circ a = a$. En déduire l'indice de nilpotence de Φ .

Exercice 21 ★★★

Centrale MP

Soient H_1 et H_2 deux sous-espaces supplémentaires de $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n)$ vérifiant la propriété suivante :

$$\forall (f, g) \in H_1 \times H_2, f \circ g + g \circ f = 0$$

1. Justifier qu'il existe $(p_1, p_2) \in H_1 \times H_2$ tel que $p_1 + p_2 = \text{Id}$.
2. Montrer que p_1 et p_2 sont des projecteurs.
3. Montrer que $\dim H_1 \leq (n - \text{rg } p_2)^2$ et $\dim H_2 \leq (n - \text{rg } p_1)^2$.
4. Quel est le nombre de choix possibles pour le couple (H_1, H_2) ?

Exercice 22 ★★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

Soit $(u, v) \in \mathcal{L}(E, F)^2$ avec E et F deux \mathbb{K} -espaces vectoriels de dimension finie. Montrer que

$$\dim \text{Ker}(u + v) \leq \dim(\text{Ker}(u) \cap \text{Ker}(v)) + \dim(\text{Im}(u) \cap \text{Im}(v))$$

Exercice 23 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

Résoudre le système

$$(S): \begin{cases} a^2x + a^3y + az = m \\ a^2x + y + az = m \\ x + ay + a^2z = m \end{cases}$$

Exercice 24 ★

CCP 2010

Soit f l'application qui à tout polynôme P de $\mathbb{R}[X]$ associe le polynôme \tilde{P} tel que

$$\forall x \in \mathbb{R}, \tilde{P}(x) = \int_x^{x+1} P(t) dt$$

1. Soit $n \in \mathbb{N}$. Montrer que f induit un endomorphisme f_n de $\mathbb{R}_n[X]$.
2. Calculer $\det(f_n)$ en fonction de n .

Exercice 25 ★★★

ENS 2010

On considère l'ensemble des matrices de taille $n \in \mathbb{N}^*$ à coefficients dans $\{-1, 1\}$.

1. Combien de coefficients faut-il changer au plus pour rendre une telle matrice inversible ?
2. Combien y a-t-il de telles matrices ? Calculer la moyenne des déterminants au carré de ces matrices.

Exercice 26 ★★★

Centrale MP 2017

On considère une fonction continue f de \mathbb{R} dans \mathbb{R} telle que pour toute matrice carrée d'ordre $n > 0$ réelle inversible $A = (a_{i,j})$, la matrice $A' = (f(a_{i,j}))$ soit également inversible.

1. Montrer que pour tous réels distincts x et y , la matrice $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ x & y \end{pmatrix}$ est inversible. En déduire que f est injective.
2. On suppose f surjective. En considérant les matrices $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ x & y & z \end{pmatrix}$ pour x, y, z réels avec $z \neq x + y$ montrer que $f(x + y) = f(x) + f(y)$.
3. Montrer que f est surjective. Conclure quant à f .

Exercice 27 ★★★

Banque Mines-Ponts MP 2021

Soit $(x, y) \in \mathbb{C}^2$. On pose $D = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ x & 1 & y & 1 & 0 \\ x^2 & 2x & y^2 & 2y & 2 \\ x^3 & 3x^2 & y^3 & 3y^2 & 6y \\ x^4 & 4x^3 & y^4 & 4y^3 & 12y^2 \end{vmatrix}$.

Montrer que $D = 0 \iff x = y$.

Exercice 28 ★★★

Centrale PSI

Soient n un entier supérieur ou égal à 2, a_1, \dots, a_n des complexes et $P = \prod_{i=1}^n (X - a_i)$.

Calculer $D(x) = \begin{vmatrix} \frac{P(x)}{x - a_1} & \frac{P(x)}{x - a_2} & \dots & \frac{P(x)}{x - a_n} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_1^{n-2} & a_2^{n-2} & \dots & a_n^{n-2} \end{vmatrix}$ pour $x \in \mathbb{C}$.

Arithmétique

Exercice 29 ★★★

Mines-Ponts MP

Montrer que si p est un entier premier différent de 2 et 5, alors il divise un des entiers de l'ensemble $\{1, 11, 111, 1111, \dots\}$.

Exercice 30 ★★★

Centrale MP 2012

Résoudre dans \mathbb{N}^2 l'équation

$$n(n+1)(n+2) = m^2$$

Exercice 31 ★★★

Mines-Ponts MP 2018

Soient a_1, \dots, a_r des entiers naturels non nuls premiers entre eux deux à deux.

1. On pose pour $i \in \llbracket 1, r \rrbracket$,

$$c_i = \prod_{j \in \llbracket 1, r \rrbracket \setminus \{i\}} a_j$$

Montrer que c_1, \dots, c_r sont premiers entre eux dans leur ensemble.

2. Soit $b \in \mathbb{Z}$. Montrer qu'il existe un unique uplet $(y, x_1, \dots, x_r) \in \mathbb{Z}^{r+1}$ tel que

$$\forall k \in \llbracket 1, r \rrbracket, 0 \leq x_k < a_k \quad \text{et} \quad \frac{b}{a_1 \dots a_r} = y + \sum_{k=1}^r \frac{x_k}{a_k}$$

Exercice 32 ★★★★★

X MP 2001

1. Montrer qu'il existe une infinité de nombres premiers p tels que $p \equiv 3[4]$.
2. Soit $p > 2$ un nombre premier. Montrer que $\forall u \in (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$, $u^{\frac{p-1}{2}} = \pm 1$.
3. Combien y a-t-il de $u \in (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ tels que $u^{\frac{p-1}{2}} = -1$?
4. Montrer que -1 est un carré dans $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ si et seulement si $p \equiv 1[4]$.
5. Si $u \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ vérifie $u^{\frac{p-1}{2}} = -1$, que peut-on dire de la structure de l'ensemble K des matrices de $\mathcal{M}_2(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})$ de la forme $\begin{pmatrix} x & yu \\ y & x \end{pmatrix}$ avec $(x, y) \in (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^2$?

Exercice 33 ★★

Mines-Ponts MP 2012

Montrer que la somme de deux nombres premiers consécutifs ne peut pas être égal au produit de deux nombres premiers.

Exercice 34 ★★★★★

Centrale-Supélec MP 2015

Soit N une application de \mathbb{Q} dans \mathbb{R}^+ . On dit que N est une valeur absolue si et seulement si :

- (i) $\forall x \in \mathbb{Q}, N(x) = 0 \iff x = 0$;
- (ii) $\forall (x, y) \in \mathbb{Q}^2, N(xy) = N(x)N(y)$;
- (iii) $\forall (x, y) \in \mathbb{Q}^2, N(x + y) \leq N(x) + N(y)$.

Une valeur absolue N est dite *ultramétrique* si $\forall (x, y) \in \mathbb{Q}^2, N(x + y) \leq \max(N(x), N(y))$. N est dite *triviale* si elle est constante sur \mathbb{Q}^* .

Si p est un nombre premier, on note $v_p(n)$ la valuation p -adique définie sur les entiers. On pose par convention $v_p(0) = +\infty$.

1. Soit N une valeur absolue. Déterminer $N(1)$ et $N(-1)$.
2. Soient $q = \frac{a}{b} \in \mathbb{Q}^*$ où $(a, b) \in (\mathbb{Z}^*)^2$ et p un nombre premier. Montrer que $v_p(a) - v_p(b)$ ne dépend que de q . On le notera $v_p(q)$.
3. On définit pour $q \in \mathbb{Q}, |q|_p = p^{-v_p(q)}$. Montrer que $|\cdot|_p$ est une valeur absolue ultramétrique.
4. Soit N une valeur absolue ultramétrique non triviale. Montrer qu'il existe $\alpha \in \mathbb{R}_+^*$ et p premier tels que $N = |\cdot|_p^\alpha$.

Exercice 35 ★★

Mines-Ponts MP 1998

Montrer que pour tout entier $n \in \mathbb{N}^*$ et tout entier a impair

$$a^{2^{n-1}} \equiv 1 [2^n]$$

Exercice 36 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2021

1. Résoudre $x^2 = x$ dans $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$, p premier.
2. Résoudre $x^2 = x$ dans $\mathbb{Z}/34\mathbb{Z}$.

Exercice 37 ★★★★★

Centrale-Supélec MP 2019

On pose $\mathbb{F}_p = \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ avec p premier et impair, $\mathcal{C} = \{x^2, x \in \mathbb{F}_p \setminus \{\bar{0}\}\}$.

1. Que dire de la structure algébrique de \mathbb{F}_p et de \mathcal{C} ?
2. Expliciter \mathcal{C} pour $p = 11$.
3. Soit P un polynôme de degré strictement inférieur à d et à coefficients entiers, avec $d \in \mathbb{N}^*$. Soient $(a_1, \dots, a_d) \in \mathbb{Z}^d$ tel que les a_i soient distincts modulo p et tel que p divise les $P(a_i)$. Montrer que pour tout $n \in \mathbb{Z}$, p divise $P(n)$.
4. Montrer que $\mathcal{C} = \left\{x \in \mathbb{F}_p, x^{\frac{p-1}{2}} = \bar{1}\right\}$.

Exercice 38 ★★★

C.C.E. Mines MP 2015

Soit P un polynôme à coefficients entiers et quatre entiers $(\lambda_i)_{1 \leq i \leq 4}$ distincts tels que $P(\lambda_i) = 7$ pour i entre 1 et 4. Montrer que l'équation $P(n) = 14$ n'admet pas de solution entière.

Intégrales impropres

Exercice 39

Centrale-Supélec MP 2022

1. Enoncer et démontrer la formule de Taylor avec reste intégral.
2. Donner la nature de l'intégrale $\int_0^{+\infty} \frac{\sin(\sqrt{t})}{t} dt$.
3. Donner la nature de la série $\sum_{n \geq 1} \frac{\sin(\sqrt{n})}{n}$.

Exercice 40 ★★★

Centrale PSI

Soit f une fonction continue sur \mathbb{R}_+ . On pose

$$\forall x \in \mathbb{R}_+, \varphi(x) = f(x) + \int_0^x f(t) dt$$

On suppose que φ admet une limite finie en $+\infty$. Montrer que f admet pour limite 0 en $+\infty$.

Exercice 41 ★★★★★

Mines-Ponts MP 2016

1. Soient $a \in \mathbb{C}$ tel que $\operatorname{Re}(a) > 0$ et f de classe \mathcal{C}_1 sur \mathbb{R}_+ à valeurs dans \mathbb{C} telle que $\lim_{+\infty} f' + af = 0$. Montrer que $\lim_{+\infty} f = 0$.
2. Soit f de classe \mathcal{C}^2 sur \mathbb{R}_+ à valeurs dans \mathbb{C} telle que $\lim_{+\infty} f'' + f' + f = 0$. Montrer que $\lim_{+\infty} f = 0$.
3. Généraliser.

Exercice 42 ★★★

Centrale MP 2018

Soit $f : \mathbb{R}_+ \mapsto \mathbb{R}$ continue de carré intégrable sur \mathbb{R}_+ . On pose $g : x \in \mathbb{R}_+^* \mapsto \frac{1}{x} \int_0^x f(t) dt$.

1. Déterminer la limite de g en 0.
2. Déterminer la limite de g en $+\infty$.
3. Montrer que g est de carré intégrable sur \mathbb{R}_+ .

Exercice 43 ★★★

Banque Mines-Ponts PSI 2021

$$\text{Soit } f(x) = \int_x^{+\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt.$$

1. Montrer que f est définie sur $I =]0, +\infty[$.
2. Montrer que f est dérivable sur I et déterminer f' .
3. Déterminer un équivalent de f en 0 et en $+\infty$.
4. Montrer que $\int_0^{+\infty} f(t) dt$ est définie et la calculer.

Exercice 44 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2017

On pose pour tout x non nul,

$$F(x) = \int_x^{7x} \frac{1 - e^{-t}}{t^2} dt$$

Déterminer $\lim_{x \rightarrow 0^+} F(x)$ et $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x)$.

Exercice 45 ★★

CCP MP

1. Déterminer le domaine de définition $F : x \mapsto \int_0^{+\infty} \frac{\ln t}{x^2 + t^2} dt$.
2. Calculer $F(1)$.
3. Calculer $F(x)$ pour tout x dans le domaine de définition de f .

Exercice 46 ★★★

TPE-EIVP PSI 2017

Soit $a > 1$, Soit f une fonction continue sur $[1, +\infty[$ admettant une limite finie ℓ en $+\infty$.

1. Montrer que pour tout x dans $[1, +\infty[$:

$$\int_1^x \frac{f(at) - f(t)}{t} dt = \int_x^{ax} \frac{f(t)}{t} dt - \int_1^a \frac{f(t)}{t} dt$$

2. En déduire que $\int_1^{+\infty} \frac{f(at) - f(t)}{t} dt$ converge et la calculer en fonction de $\int_1^a \frac{f(t)}{t} dt$ et de ℓ .

Exercice 47 ★★★

CCP MP 2018

Soit $f : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}$ continue et π -périodique vérifiant

$$\int_0^\pi f(t) dt = 0$$

Pour $n \in \mathbb{N}^*$, on pose

$$u_n = \int_0^\pi f(t)e^{-t/n} dt \quad v_n = \int_0^{+\infty} f(t)e^{-t/n} dt$$

1. Justifier que u_n et v_n sont bien définis pour tout $n \in \mathbb{N}^*$.
2. Justifier qu'il existe une suite (a_n) , que l'on précisera, telle que $v_n = a_n u_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$.
3. Montrer que $a_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{n}{\pi}$.
4. Montrer que (u_n) converge vers 0. Montrer que (v_n) converge et préciser sa limite.

Exercice 48 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2021

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on pose $I_n = \int_0^1 (t \ln(t))^n dt$. Montrer que cette intégrale converge.

Donner sa valeur.

Exercice 49 ★★

Banque Mines-Ponts MP 2023

Soit $f \in \mathcal{C}^0(\mathbb{R}^+, \mathbb{R}^+)$ décroissante. Montrer que si f est intégrable sur \mathbb{R}_+ , alors $\lim_{x \rightarrow +\infty} x f(x) = 0$.

La réciproque est-elle vraie ?

Convexité

Exercice 50 ★★

Soient f et g deux fonctions continues sur un intervalle $[a, b]$. On suppose que $f \geq 0$ sur $[a, b]$ et on souhaite montrer qu'il n'existe qu'une solution non nulle de l'équation différentielle $y'' - fy = g$ s'annulant en a et b .

Soient donc φ_1 et φ_2 deux solutions de l'équation différentielle $y'' - fy = g$ s'annulant en a et b .

1. Montrer que $(\varphi_1 - \varphi_2)^2$ est convexe.
2. En déduire que $\varphi_1 = \varphi_2$.

Exercice 51 ★★

TPE

Soit f une fonction de classe \mathcal{C}^2 convexe sur $[0, 2\pi]$. Montrer que

$$\int_0^{2\pi} f(t) \cos(t) dt \geq 0$$

Exercice 52 ★★★

X MP

Soit f une application de $[0, 1]$ dans \mathbb{R} continue et concave telle que $f(0) = 1$. Montrer que

$$\int_0^1 x f(x) dx \leq \frac{2}{3} \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2$$

Exercice 53 ★★★

Entropie

Soient p_1, \dots, p_n des réels strictement positifs et de somme 1. On pose $H(p) = -\sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i)$.

1. Montrer que $0 \leq H(p) \leq \ln(n)$.
2. Soient q_1, \dots, q_n des réels strictement positifs et de somme 1. Montrer que

$$H(p) \leq -\sum_{i=1}^n p_i \ln(q_i)$$

Exercice 54 ★★★

CCINP (ou CCP) MP 2017

1. Etudier la convexité des fonctions \ln et \exp .
2. Démontrer que pour tout (x_1, \dots, x_n) dans $(\mathbb{R}_+)^n$,

$$\left(\prod_{i=1}^n x_i\right)^{1/n} \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

3. Démontrer que si S est une matrice réelle symétrique alors :
 $\forall X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}), X^T S X \geq 0$ si et seulement si $\text{Sp}(S) \subset \mathbb{R}_+$.
4. Démontrer que si S est une matrice réelle d'ordre n symétrique à valeurs propres positives, alors $(\det(S))^{\frac{1}{n}} \leq \frac{1}{n} \text{tr}(S)$.
5. Démontrer que pour toute matrice réelle d'ordre n , $\det(M)^2 \leq \left(\frac{1}{n} \text{tr}(M^T M)\right)^n$.

Exercice 55 ★★★★★

ENS Ulm/Lyon/Cachan MP 2001

Pour $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_+$, on note

$$E_f = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2, y > f(x)\}$$

l'épigraphe de f .

Soient $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_+$.

1. Montrer qu'il existe une unique application $h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_+$ telle que $E_h = E_f + E_g$.
2. On suppose f et g convexes. Montrer que h est convexe.
3. Montrer que f et g peuvent être de classe \mathcal{C}^∞ sans que h le soit.

Suites et séries de fonctions

Exercice 56 ★★

CCP MP

On pose $f_n: x \mapsto n \cos^n(x) \sin(x)$ pour $n \in \mathbb{N}$.

1. Étudier la convergence simple de la suite (f_n) sur \mathbb{R} .
2. La suite (f_n) converge-t-elle uniformément sur $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$, sur $\left[a, \frac{\pi}{2}\right]$ où $a \in \left]0, \frac{\pi}{2}\right[$?
3. Soit g continue sur $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$. Montrer que

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f_n(t) g(t) dt = g(0)$$

Exercice 57 ★★

Mines-Ponts PC

On pose $f_n(x) = \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{k+x}} \right) - 2\sqrt{n}$ pour $n \in \mathbb{N}^*$.

1. Étudier la convergence simple de $\sum_{n \geq 1} f_{n+1} - f_n$.
2. Montrer que (f_n) converge simplement vers une fonction f de classe \mathcal{C}^1 .
3. Calculer $\int_0^1 f(t) dt$.

Exercice 58 ★★★

Mines-Télécom MP 2018

1. Déterminer l'ensemble de définition de la série de $f: x \mapsto \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{\operatorname{sh}(nx)}$. Donner un équivalent simple de f en 0.
2. Mêmes questions avec $g: x \mapsto \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{\operatorname{sh}^2(nx)}$.

Exercice 59 ★★

Mines-Télécom MP 2017

On définit la suite de fonctions (g_n) de $[0, 1]$ dans \mathbb{R} par $g_0 = 1$ et

$$\forall n \in \mathbb{N}, \forall x \in [0, 1], g_{n+1}(x) = \int_0^x g_n(1-t) dt$$

1. Montrer que pour tout $n \in \mathbb{N}$, g_n est bornée et que $\forall n \in \mathbb{N}^*, \|g_{n+1}\|_\infty \leq \frac{1}{2} \|g_{n-1}\|_\infty$.
2. On pose $G: x \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} g_n(x)$.
Montrer que G est bien définie sur $[0, 1]$ et déterminer une équation différentielle vérifiée par G .
3. En déduire l'expression de G .

Exercice 60 ★★★★★

Banque Mines-Ponts MP 2019

1. Existe-t-il une suite de réels $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ telle que $\forall k \in \mathbb{N}^*, \sum_{n=0}^{+\infty} a_n^k = k$?
2. Existe-t-il une suite de réels $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ telle que $\forall k \in \mathbb{N}^*, \sum_{n=0}^{+\infty} a_n^k = \frac{1}{k^2}$?

Exercice 61

CCINP (ou CCP) PC 2019

Soit $t \in \mathbb{R}$ et on pose $f(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} \ln(1 + e^{nt})$.

1. Quel est l'ensemble de définition de f ?
2. Montrer que $\lim_{t \rightarrow -\infty} f(t) = \ln(2)$.
3. Montrer que $\lim_{t \rightarrow 0^-} f(t) = +\infty$.

Exercice 62

CCINP (ou CCP) MP 2019

Soit $(a, b) \in (\mathbb{R}_+^*)^2$.

1. Pour $t \in]0, 1[$, écrire $\frac{t^{a-1}}{1+t^b}$ comme somme de série $\sum_{n \geq 0} u_n(t)$, où les u_n sont des fonctions puissances.

2. Déterminer la nature de la série $\sum \int_0^1 |u_n(t)| dt$. Que peut-on en déduire ?

3. Soit $S_N(t) = \sum_{n=0}^N u_n(t)$. Démontrer

$$\int_0^1 \frac{t^{a-1}}{1+t^b} dt = \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_0^1 S_N(t) dt$$

4. En déduire

$$\int_0^1 \frac{t^{a-1}}{1+t^b} dt = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{a+nb}$$

5. Calculer $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{3n+1}$.

Exercice 63 ★★★

Arts et Métiers PSI

Soit f une fonction continue sur $[a, b]$ à valeurs dans \mathbb{R} . Soit (f_n) la suite de fonctions définies par $f_0 = f$ et pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\forall x \in [a, b], f_{n+1}(x) = \int_a^x f_n(t) dt$$

1. Déterminer la nature de la convergence de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} f_n$ sur $[a, b]$.
2. On note F la somme de cette série. Montrer que

$$\forall x \in [a, b], F(x) = f(x) + e^x \int_a^x e^{-t} f(t) dt$$

Exercice 64 ★★★★★

Centrale MP

Pour $n \in \mathbb{N}^*$, on pose $u_n : x \mapsto x \ln \left(1 + \frac{1}{n}\right) - \ln \left(1 + \frac{x}{n}\right)$.

1. Montrer que la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} u_n$ converge simplement sur \mathbb{R}_+ .
2. On note g la somme de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} u_n$. Montrer que g est de classe \mathcal{C}^1 sur \mathbb{R}_+ .
3. On pose $f : x \mapsto g(x) - \ln(x)$. Montrer que f vérifie les trois conditions suivantes :
 - (i) $f(1) = 0$.
 - (ii) f est convexe sur \mathbb{R}_+^* ;
 - (iii) $\forall x \in \mathbb{R}_+^*, f(x+1) - f(x) = \ln(x)$;
4. Réciproquement, soit f vérifiant les trois conditions de la question précédente. Montrer que pour tout $x \in \mathbb{R}_+^*$,

$$f(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} x \ln(n) + \ln(n!) - \sum_{k=0}^n \ln(x+k)$$

Exercice 65 ★★

E3A MP 2019

On rappelle les formules de trigonométrie que l'on pourra utiliser sans les redémontrer

$$2 \cos(p) \cos(q) = \cos(p+q) + \cos(p-q) \quad 2 \sin(p) \cos(q) = \sin(p+q) + \sin(p-q)$$

On rappelle que pour tout $z \in \mathbb{C}$, la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{z^n}{n!}$ converge et a pour somme e^z .

Soit α un réel non nul fixé.

Pour tout entier naturel n , on définit la fonction u_n de \mathbb{R} vers \mathbb{R} par :

$$\forall x \in \mathbb{R}, u_n(x) = \frac{\alpha^n \cos(nx)}{n!}$$

1. Déterminer l'ensemble de définition \mathcal{D} de la fonction $C : x \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} u_n(x)$.
2. Etudier la convergence uniforme de la série de fonctions $\sum u_n$ sur \mathcal{D} .
3. Donner pour tout $x \in \mathcal{D}$ une expression de $C(x)$ à l'aide des fonctions usuelles.
4. Pour tout entier naturel n , on note

$$J_n = \int_{-\pi}^{\pi} \sin(nx) C(x) \, dx \quad I_n = \int_{-\pi}^{\pi} \cos(nx) C(x) \, dx$$

- a. Calculer J_n puis I_n .
 - b. Déterminer $\lim_{n \rightarrow +\infty} J_n$ et $\lim_{n \rightarrow +\infty} I_n$.
5. On pose enfin, lorsque cela existe $S(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{\alpha^n \cos^2(nx)}{n!}$.
Déterminer l'ensemble de définition de la fonction S et donner une expression de $S(x)$ à l'aide des fonctions usuelles.

Exercice 66 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

1. Etudier la convergence simple de $\sum_{n \geq 0} (-1)^n \frac{e^{-nx}}{n+1}$ sur \mathbb{R}_+ . On note, pour $x \in \mathbb{R}_+$,

$$S(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n \frac{e^{-nx}}{n+1}.$$

2. La série de fonctions considérée converge-t-elle normalement sur \mathbb{R}_+ ? Converge-t-elle uniformément ?
3. Montrer que sa somme est continue sur \mathbb{R}_+ et donner sa limite en $+\infty$.
4. Résoudre $y' - y = -\frac{e^x}{e^x + 1}$ sur $]0, +\infty[$.
5. En déduire l'expression de S à l'aide des fonctions usuelles.

Exercice 67 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2023

Pour $n \in \mathbb{N}^*$ et $x \in \mathbb{R}$, on pose $v_n(x) = n^x e^{-nx}$. Soit $S : x \mapsto \sum_{n=1}^{+\infty} v_n(x)$.

1. Donner l'ensemble de définition de S .
2. Montrer que S est continue sur son ensemble de définition.
3. Donner la limite de S en $+\infty$ à l'aide du théorème de la double limite.
4. $\sum_{n \geq 1} v_n$ converge-t-elle uniformément sur $]0, +\infty[$?
5. S est-elle dérivable sur $]0, +\infty[$?

Exercice 68

Banque Mines-Ponts MP 2023

On pose :

$$\forall n \in \mathbb{N}, \forall x \in]0, +\infty[, u_n(x) = \frac{(-1)^n}{x+n}$$

On définit $f : x \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} u_n(x)$.

1. f est-elle bien définie ? Continue ?
2. Trouver un équivalent de f en 0^+ , puis en $+\infty$.
3. Écrire $f(x)$ sous la forme d'une intégrale.

Exercice 69 ★★

Soit (f_n) une suite de fonctions définies sur un ensemble X et à valeurs dans \mathbb{K} .

1. On suppose que la série $\sum f_n$ converge uniformément sur X . Montrer que la suite (f_n) converge uniformément vers la fonction nulle.
2. Montrer que la série $\sum f_{n+1} - f_n$ converge uniformément sur X si et seulement si la suite (f_n) converge uniformément sur X .

Exercice 70 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2018

Soit (λ_n) une suite strictement croissante de réels strictement positifs de limite $+\infty$. On pose pour $n \in \mathbb{N}$ et $x \in \mathbb{R}_+^*$

$$f_n(x) = (-1)^n e^{-\lambda_n x}$$

1. Étudier la convergence simple de la série $\sum f_n$ sur \mathbb{R}_+^* .
2. Étudier sa convergence uniforme sur \mathbb{R}_+^* .
3. On pose $S = \sum_{n=0}^{+\infty} f_n$. Montrer que l'intégrale $\int_0^{+\infty} S(t) dt$ converge et que

$$\int_0^{+\infty} S(t) dt = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{\lambda_n}$$

Exercice 71 ★★

CCINP (ou CCP) PC 2017

On considère pour $x > 0$ la suite (u_n) définie pour $n \in \mathbb{N}$ par $u_n(x) = \frac{(-1)^n}{x+n}$ et $f(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} u_n(x)$.

1. f est-elle bien définie et continue sur \mathbb{R}_+^* ?
2. Montrer que

$$\forall x > 0, f(x) = \frac{1}{x} - \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{x+k+1}$$

3. Montrer que

$$\forall x > 0, 2f(x) = \frac{1}{x} + \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{(x+k+1)(x+k)}$$

4. Déterminer un équivalent de f en $+\infty$.
5. Déterminer un équivalent de f en 0^+ .
6. Montrer que :

$$f(x) = \int_0^1 \frac{t^{x-1}}{1+t} dt$$

Exercice 72

CCINP (ou CCP) MP 2021

Soit $S(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{n+x}$.

1. Montrer que S est définie et de classe \mathcal{C}^1 sur \mathbb{R}_+^* et montrer que

$$\forall x \in \mathbb{R}_+^*, S'(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(n+x)^2}$$

2. À l'aide du critère spécial des séries alternées, trouver la monotonie de S .
3. Montrer que

$$\forall x \in \mathbb{R}_+^*, S(x+1) + S(x) = \frac{1}{x}$$

puis en déduire un équivalent simple de S en 0^+ et en $+\infty$.

Exercice 73 ★★**E3A PSI 2020**

Pour tout entier naturel n , on définit sur l'intervalle $J = [1, +\infty[$, la fonction f_n par :

$$f_n(x) = \frac{(-1)^n}{\sqrt{1+nx}}$$

1. Montrer que la série de fonctions $\sum_{n \in \mathbb{N}} f_n$ converge simplement sur J .

On note alors $\varphi(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} f_n(x)$ pour tout $x \in J$.

2. Montrer que $\sum_{n \in \mathbb{N}} f_n$ ne converge pas normalement sur J .

3. Étudier alors sa convergence uniforme sur J .

4. Déterminer $\ell = \lim_{x \rightarrow +\infty} \varphi(x)$.

5. Pour $n \in \mathbb{N}^*$, on note $u_n = \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}$.

a. Justifier la convergence de la série $\sum u_n$. On note $a = \sum_{n=1}^{+\infty} u_n$ sa somme.

b. Montrer que l'on a au voisinage de l'infini :

$$\varphi(x) = \ell + \frac{a}{\sqrt{x}} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{x^{3/2}}\right)$$

Intégrales à paramètres**Exercice 74 ★★****CCP MP**

On pose $f_n : x \mapsto n \cos^n(x) \sin(x)$ pour $n \in \mathbb{N}$.

1. Étudier la convergence simple de la suite (f_n) sur \mathbb{R} .
2. La suite (f_n) converge-t-elle uniformément sur $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$, sur $\left[a, \frac{\pi}{2}\right]$ où $a \in \left]0, \frac{\pi}{2}\right[$?
3. Soit g continue sur $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$. Montrer que

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f_n(t) g(t) dt = g(0)$$

Exercice 75**Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) PSI 2019**

Pour $n \in \mathbb{N}$, on pose $u_n = \int_0^{+\infty} \frac{dt}{(1+t^3)^n}$.

1. Pour quelles valeurs de n l'intégrale est-elle définie ?
2. Calculer la limite de la suite (u_n) .
3. Déterminer la nature de la série $\sum u_n$.
4. Montrer que la série $\sum (-1)^n u_n$ converge et calculer sa somme S sous la forme d'une intégrale.
5. Calculer S .

Exercice 76 ★★★**Banque Mines-Ponts PC 2023**

Soit f une fonction continue et bornée sur $[0, +\infty[$ telle que $f(0) \neq 0$. Pour tout n dans

\mathbb{N}^* , on pose $a_n = \int_0^{+\infty} f(t) \frac{e^{-nt}}{\sqrt{t}} dt$.

Trouver un équivalent de a_n quand n tend vers $+\infty$.

Exercice 77

Mines-Ponts MP 2018

Montrer que pour tout $x \in \mathbb{R}_+$,

$$\int_0^{+\infty} \frac{\arctan(x/t) dt}{1+t^2} = \int_0^x \frac{\ln(t) dt}{t^2-1}$$

Exercice 78

Mines-Ponts MP 2017

A toute fonction $h \in \mathcal{C}^0(\mathbb{R}_+, \mathbb{R})$, on associe la fonction $R(h)$ définie par

$$\forall x \in \mathbb{R}_+, R(h)(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} h(x \sin t) dt$$

A toute fonction $g \in \mathcal{C}^1(\mathbb{R}_+, \mathbb{R})$, on associe fonction $S(g)$ définie par

$$\forall x \in \mathbb{R}_+, S(g)(x) = g(0) + x \int_0^{\frac{\pi}{2}} g'(x \sin t) dt$$

1. Montrer que R et S sont des applications linéaires à valeurs dans $\mathcal{C}^0(\mathbb{R}_+, \mathbb{R})$.
2. On pose $W_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n(t) dt$ pour $n \in \mathbb{N}$. Déterminer une relation entre W_n et W_{n+2} .
3. Soit P un polynôme. Montrer que $S \circ R(P) = P$.
4. Montrer que pour $g \in \mathcal{C}^1(\mathbb{R}_+, \mathbb{R})$, $S \circ R(g) = g$.

Exercice 79

CCP MP

On pose $g(x) = \int_0^{+\infty} \frac{e^{-tx}}{t+1} dt$.

1. Montrer que g est de classe \mathcal{C}^1 sur \mathbb{R}_+^* .
2. Donner une équation différentielle vérifiée par g sur \mathbb{R}_+^* .
3. Donner un équivalent de g en $+\infty$.

Exercice 80 ★★

Mines Télécom MP 2016

Soit $F(x) = \int_0^{+\infty} \frac{1 - \cos(xt)}{t^2} e^{-t} dt$.

1. Montrer que F est définie sur \mathbb{R} et paire.
2. Montrer que $|\sin u| \leq |u|$ pour tout $u \in \mathbb{R}$.
3. Montrer que F est de classe \mathcal{C}^2 sur \mathbb{R} et déterminer F'' .
4. Déterminer la fonction F .

Exercice 81 ★★

Centrale MP 2011

Soit $f : x \mapsto \int_0^x e^{-t^2} dt$ et $g : x \mapsto \int_0^1 \frac{e^{-x^2(1+t^2)} dt}{1+t^2}$.

1. Montrer que $f^2 + g$ est constante. Quelle est sa valeur ?
2. En déduire la valeur de $\int_0^{+\infty} e^{-t^2} dt$.

Exercice 82 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

On pose $f(x) = \int_0^{+\infty} \frac{e^{-xt^2}}{1+t^2} dt$.

On rappelle que $\int_0^{+\infty} e^{-t^2} dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$.

1. a. Montrer que f est définie et continue sur \mathbb{R}_+ .
b. Montrer que f est de classe \mathcal{C}^1 sur \mathbb{R}_+^* .
2. a. Montrer que f est solution de (E) : $y' - y = -\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{x}}$.
b. Déterminer la fonction f .

Exercice 83

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2023

On pose $F(x) = \int_0^{+\infty} \ln(t)e^{-xt} dt$.

1. Déterminer le domaine de définition de F .
2. Montrer que F est de classe \mathcal{C}^1 sur \mathbb{R}_+^* .
3. Déterminer une équation différentielle dont F est solution sur \mathbb{R}_+^* , puis résoudre cette équation différentielle.

Exercice 84

Mines-Ponts MP

On définit une fonction f par $f(x) = \int_0^{+\infty} e^{-t} \operatorname{sh}(x\sqrt{t}) dt$.

1. Donner l'ensemble de définition de f .
2. Montrer que f est développable en série entière au voisinage de 0 et déterminer ce développement en série entière.
3. Exprimer f à l'aide des fonctions usuelles.

Exercice 85 ★

ENSEA/ENSIIE MP 2015

1. Montrer que

$$\forall x \in [-1, 1], \int_0^1 \frac{1-t}{1-xt^3} dt = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{x^n}{(3n+1)(3n+2)}$$

2. Calculer $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(3n+1)(3n+2)}$

Exercice 86 ★

CCINP (ou CCP) PSI 2019

Soit $\sum a_n$ une série complexe absolument convergente.

1. Calculer $I_n = \int_0^{+\infty} x^n e^{-x} dx$ pour $n \in \mathbb{N}$.
2. Déterminer le rayon de convergence de la série entière $\sum \frac{a_n}{n!} x^n$.
3. Pour x réel, on pose $f(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{a_n}{n!} x^n$. Montrer que

$$\int_0^{+\infty} e^{-x} f(x) dx = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n$$

Exercice 87 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

1. Montrer que $I = \int_0^1 \ln(x) \ln(1-x) dx$ est bien définie.
2. Donner la décomposition en série entière de $x \mapsto \ln(1-x)$ et préciser son rayon de convergence.
3. Écrire I comme somme d'une série.
4. Donner la valeur exacte de I sachant que $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}$.

Exercice 88 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

Soit $I = \int_0^1 \frac{\ln(t) \ln(1-t)}{t} dt$.

1. Montrer que I converge.
2. Montrer que $I = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^3}$.

Exercice 89 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2018

Pour $n \in \mathbb{N}$, on pose $a_n = \int_0^1 \frac{t^n}{1+t} dt$.

1. Donner le rayon de convergence R de la série entière $\sum a_n x^n$.
2. Rappeler le théorème d'intégration terme à terme d'une série de fonctions sur un segment.
3. En déduire la valeur de $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n x^n$ pour $|x| < R$.

Exercice 90 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2019

1. Montrer l'intégrabilité de $f : x \mapsto \frac{(\ln x)^2}{1+x^2}$ sur $]0, 1]$.
2. Pour $n \in \mathbb{N}$, on pose $u_n : x \in]0, 1] \mapsto x^{2n}(\ln x)^2$. Montrer l'intégrabilité de u_n sur $]0, 1]$ et calculer $\int_0^1 u_n(x) dx$.
3. Déterminer une expression de $I = \int_0^1 \frac{(\ln x)^2}{1+x^2} dx$ sous forme de somme.
4. Soit $\varepsilon > 0$. Proposer une méthode de calcul de I à ε près.

Exercice 91 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2017

Soit $n \in \mathbb{N}$ et $x \geq 0$. On pose : $f_n(x) = \frac{e^{-x}}{(x+1)^n}$ et $J_n = \int_0^{+\infty} f_n(x) dx$.

1. Montrer que J_n est bien définie et étudier sa limite en $+\infty$.
2. Calculer $f'_n(x)$ et en déduire un équivalent de J_n .
3.
 - a. Déterminer le rayon de convergence de la série entière $\sum_{n \geq 0} J_n z^n$.
 - b. Calculer la somme de cette série entière sous forme intégrale.

Exercice 92 ★★★

Banque Mines-Ponts MP 2014

On pose $f : x \mapsto \int_0^{+\infty} \frac{dt}{t^x(1+t)}$.

1. Déterminer le domaine de définition de f .
2. Déterminer des équivalents simples de f aux bornes de son domaine de définition.

Réduction

Exercice 93 ★★

Mines-Ponts MP 2016

Soit E un espace euclidien de dimension finie. On considère des vecteurs unitaires a et b de E formant une famille libre.

Réduire l'endomorphisme

$$\phi : \begin{cases} E & \longrightarrow E \\ x & \longmapsto \langle a | x \rangle a + \langle b | x \rangle b \end{cases}$$

Exercice 94 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2021

Soit l'endomorphisme

$$u : \begin{cases} \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) & \longrightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \\ M & \longmapsto M + \text{tr}(M)I_n \end{cases}$$

Déterminer les valeurs propres de u , ainsi que les espaces propres associés.

Exercice 95

X MP 2010

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. Montrer que $A\bar{A} = I_n$ si et seulement si il existe $S \in GL_n(\mathbb{C})$ tel que $A = S\bar{S}^{-1}$.

Exercice 96 ★

CCP MP 2010

Soient A et B dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ à spectres disjoints.

1. Montrer que $\chi_A(B)$ est inversible.
2. Soit X dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ telle que $AX = XB$. Montrer que pour tout $P \in \mathbb{C}[X]$, $P(A)X = XP(B)$ et en déduire que $X = 0$.
3. Montrer que pour tout $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$, il existe $X \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ telle que $AX - XB = M$.

Exercice 97

ENS MP 2018

Soit $(A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})^2$. Montrer que les polynômes caractéristiques de A et B sont premiers entre eux si et seulement si il n'existe pas de matrice $X \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ non nulle telle que $AX = XB$.

Exercice 98 ★★★

Mines-Ponts MP 2018

Soient E un espace vectoriel de dimension $n \in \mathbb{N}^*$, et $(f, g) \in \mathcal{L}(E)^2$.
On suppose qu'il existe $h \in \mathcal{L}(E)$ de rang $r \geq 1$ tel que $h \circ g = f \circ h$. Montrer que χ_f et χ_g ont un facteur commun de degré r .
La réciproque est-elle vraie ?

Exercice 99 ★★

CCP 2015

Soient E un espace vectoriel de dimension $2n + 1$ et de base (e_1, \dots, e_{2n+1}) ainsi que u l'endomorphisme de E tel que $u(e_1) = e_1 + e_{2n+1}$ et $u(e_i) = e_{i-1} + e_i$ pour tout $i \in \llbracket 2, 2n + 1 \rrbracket$.

1. Déterminer le polynôme caractéristique de u .
2. Montrer que u est inversible et déterminer un polynôme P tel que $u^{-1} = P(u)$.
3. Déterminer les valeurs propres complexes de u .
4. En déduire $\prod_{k=0}^{2n} \cos\left(\frac{k\pi}{2n+1}\right)$.

Exercice 100 ★

TPE MP 2010

Déterminer les $n \in \mathbb{N}^*$ pour lesquels il existe $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ telle que $M^3 - M^2 - M - 2I_n = 0$ et $\text{tr}(M) = 0$.

Exercice 101

TPE-EIVP PSI 2017

Soient A, B, C dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telles que $C = A + B$, $C^2 = 2A + 3B$, $C^3 = 5A + 6B$. A et B sont-elles diagonalisables ?

Exercice 102 ★★★★★

X MP

Soit M une matrice symétrique de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Trouver le rang minimal et le rang maximal des matrices $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telles que $A + A^T = M$.

Exercice 103

CCP MP 2010

Soient E un \mathbb{R} -espace vectoriel de dimension finie et $u \in \mathcal{L}(E)$ tel que $u^3 + u = 0$. Montrer que $\text{rg}(u)$ est pair.

Exercice 104 ★★★★★

Mines-Ponts MP 2015

On note $\text{GL}_2(\mathbb{Z})$ l'ensemble des matrices $\mathcal{M}_2(\mathbb{Z})$ inversible et dont l'inverse appartient aussi à $\mathcal{M}_2(\mathbb{Z})$.

1. Montrer que $(\text{GL}_2(\mathbb{Z}), \times)$ est un groupe.
2. Soit G un sous-groupe fini de $\text{GL}_2(\mathbb{Z})$. Montrer que pour toute matrice $M \in G$, $M^{12} = I_2$.

Exercice 105 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2019

Soit $n \geq 2$ entier. On considère $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telle que $A^2 = I_n$ et $A \neq \pm I_n$.

1. Montrer que $\text{tr}(A) \equiv n[2]$.
2. Montrer que $|\text{tr}(A)| \leq n - 2$.

Exercice 106 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2021

On pose $A = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$.

1. Étudier la diagonalisabilité de A , et la diagonaliser si possible.
2. Résoudre l'équation $M^2 = A$ pour $M \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$.

Exercice 107 ★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2021

On pose : $A = \begin{pmatrix} -1 & -4 & 2 \\ 1 & 3 & -1 \\ -1 & -2 & 2 \end{pmatrix}$ et $B = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -2 \\ -1 & 0 & 2 \end{pmatrix}$. A et B sont-elles semblables ?

Exercice 108 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2021

On considère la matrice : $A = \begin{pmatrix} -5 & 3 \\ 6 & -2 \end{pmatrix}$.

1. Montrer que A s'écrit PDP^{-1} avec $P \in GL_2(\mathbb{R})$ et D matrice diagonale de $\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$.
2. On cherche à résoudre l'équation $X^3 = A$ d'inconnue $X \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$.
Montrer que si X est solution de cette équation, alors $P^{-1}XP$ commute avec D puis qu'elle est diagonale.
Résoudre l'équation.

Exercice 109

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) PSI 2021

Soit $A = \begin{pmatrix} a & c & b \\ b & a & c \\ c & b & a \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_3(\mathbb{C})$ et $J = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$.

1. Exprimer A en fonction de J et J^2 .
2. Calculer le polynôme caractéristique de J . La matrice J est-elle diagonalisable ?
3. Diagonaliser A .

Exercice 110

Banque Mines-Ponts MP 2023

1. Soient $n, p \in \mathbb{N}$ et $A_1, \dots, A_p \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ diagonalisables commutant entre elles.
 - a. Montrez que A_1 et A_2 sont simultanément diagonalisables.
 - b. Conclure pour A_1, \dots, A_p (on fera une récurrence).
2. Soit G un sous-groupe de $GL_n(\mathbb{C})$ inclus dans $\{A \in GL_n(\mathbb{C}) \mid A^2 = I_n\}$. Montrer que G est fini. Que dire de son cardinal ?
3. Soient $m, n \in \mathbb{N}$ distincts. Existe-t-il un isomorphisme de $GL_n(\mathbb{C})$ sur $GL_m(\mathbb{C})$?

Exercice 111 ★★★

D'après Centrale MP

Soit u un endomorphisme d'un \mathbb{C} -espace vectoriel E de dimension finie.
Montrer que u est diagonalisable si et seulement si tout sous-espace vectoriel de E stable par u admet un supplémentaire dans E stable par u . Le résultat persiste-t-il si E est un \mathbb{R} -espace vectoriel ?

Exercice 112 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2019

Soit E un \mathbb{K} -espace vectoriel de dimension finie. On note f et g deux endomorphismes de E et on note A et B leurs matrices dans une même base de E .

1. On suppose f et g bijectifs dans cette question.
 - a. Montrer que $\chi_{AB} = \chi_{BA}$.
 - b. Montrer que si $f \circ g$ est diagonalisable, alors $g \circ f$ l'est aussi.
2.
 - a. Montrer que $f \circ g$ et $g \circ f$ ont le même spectre.
 - b. Donner un exemple de matrices telles que AB soit diagonalisable mais pas BA .

Exercice 113 ★★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) PSI 2019

Soient f et g deux endomorphismes d'un \mathbb{R} -espace vectoriel de dimension finie E vérifiant $f \circ g = f + g$.

1. Montrer que $\text{Ker } f = \text{Ker } g$ et $\text{Im } f = \text{Im } g$.
2. On suppose g diagonalisable. Montrer que f et $f \circ g$ sont aussi diagonalisables et que $\text{Sp}(f \circ g) \subset \mathbb{R} \setminus]0, 4[$.

Exercice 114 ★★

Soit $\Phi : P \in \mathbb{R}_n[X] \mapsto (X+1)P(X) - XP(X+1)$.

1. Montrer que Φ est un endomorphisme de $\mathbb{R}_n[X]$.
2. Déterminer les éléments propres de Φ . Φ est-il diagonalisable ?

Exercice 115 ★

CCP 2018

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ avec $n \geq 2$, telle que $\text{rg}(A) = 1$.
Montrer que A est diagonalisable si et seulement si $\text{tr}(A) \neq 0$.

Exercice 116 ★★

CCP MP 2018

Soient x un nombre réel et E_x l'ensemble des matrices $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ vérifiant $M^2 + M + xI_n = 0$.

1. Si $x \neq 0$, montrer qu'une matrice $M \in E_x$ est inversible et exprimer son inverse. Quelles sont les matrices inversibles appartenant à E_0 ?
2. Pour quelles valeurs de x tous les éléments de E_x sont ils diagonalisables dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$?
3. Déterminer l'ensemble T des traces des éléments de E_{-2} . Quel est son cardinal ?

Exercice 117 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

On considère $f : \begin{cases} \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) & \longrightarrow & \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \\ M & \longmapsto & M + 2M^T \end{cases}$.

1. Montrer que f est un endomorphisme.
2. Donner les valeurs propres et les sous-espaces propres de f .
3. L'endomorphisme f est-il diagonalisable ?
4. Calculer $\text{tr}(f)$ et $\det(f)$.

Exercice 118

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2018

Soient $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ une matrice diagonalisable et $B = \begin{pmatrix} 0 & 2A \\ -A & 3A \end{pmatrix}$. Montrer que B est diagonalisable.

Exercice 119 ★★

CCINP (ou CCP) PSI 2021

On définit : $\forall m \in \mathbb{R}, A_m = \begin{pmatrix} -m-1 & m & 2 \\ -m & 1 & m \\ -2 & m & 3-m \end{pmatrix}$.

1. Donner les valeurs propres et sous-espaces propres de A_m .
2. Donner les valeurs de m pour lesquelles A_m soit diagonalisable. Même question pour l'inversibilité.
3. Si A_m est diagonalisable, déterminer une matrice inversible P telle que $P^{-1}AP$ soit diagonale.

Exercice 120 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2023

Soit $A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$.

1. Montrer que A est diagonalisable dans $\mathcal{M}_3(\mathbb{C})$ et admet une unique valeur propre réelle a . Montrer que $a > 1$.
2. Soit $n \in \mathbb{N}$. Montrer que $\sum_{\lambda \in \text{Sp}(A)} \lambda^n$ est un entier.
3. Montrer que $\sum_{n \geq 0} \sin(\pi a^n)$ converge.

Exercice 121 ★★

Mines-Télécom MP 2018

Soient A une matrice diagonalisable et $B = \begin{pmatrix} 0 & 2A \\ -A & 3A \end{pmatrix}$. Montrer que B est diagonalisable.

Exercice 122 ★★

Magistère MP 2017

Soit $(A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ tel que $AB - BA = A$.

1. Montrer que pour tout $k \in \mathbb{N}$, $A^k B - BA^k = kA^k$.
2. Montrer que A est nilpotente.

Exercice 123 ★★★

Magistère MP 2017

Montrer que l'espace vectoriel engendré par les matrices nilpotentes est égal à celui des matrices de trace nulle.

Exercice 124

CCINP (ou CCP) MP 2021

Soit E un \mathbb{R} -espace vectoriel de dimension $n > 1$. On considère f un endomorphisme de E .

1. La condition « f est de rang 1» est-elle suffisante/nécessaire pour que f soit un projecteur ?
2. On suppose f de rang 1 et de trace 1, montrer que f est un projecteur.
3. Construire une base de $\mathcal{L}(E)$ formée de projecteurs.

Exercice 125

CCINP (ou CCP) MP 2021

Soit n un entier supérieur ou égal à 2. Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ telle que $A^n = I_n$ et telle que la famille $(I_n, A, A^2, \dots, A^{n-1})$ soit libre. Montrer que $\text{tr}(A) = 0$.

Exercice 126

ENS MP 2011

1. Soit A une matrice inversible réelle. Exprimer le polynôme minimal de A^{-1} en fonction de celui de A .
2. Soit A une matrice orthogonale réelle telle que 1 et -1 ne soient pas racines de son polynôme minimal. Montrer que A et A^{-1} ont même polynôme minimal. Montrer que le degré de ce polynôme minimal est pair.

Exercice 127 ★★

CCINP (ou CCP) PSI 2021

Soit $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ 2 & & & \\ \vdots & & (0) & \\ n & & & \end{pmatrix}$ où $n \geq 3$.

1. Quel est le rang de A ? la dimension du noyau de A ?
2. La matrice A est-elle diagonalisable ?
3. Quelle est la multiplicité de la valeur propre 0 ?
4. Montrer qu'il existe $\lambda \in]1, +\infty[$ tel que $\text{Sp}(A) = \{0, \lambda, 1 - \lambda\}$.
5. Déterminer un polynôme annulateur de A de degré 3.

Exercice 128 ★★

CCINP (ou CCP) PSI 2021

Soient $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et $B = \begin{pmatrix} A & A \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{2n}(\mathbb{R})$.

1. Donner le rang de B en fonction du rang de A .
2. Montrer que, pour tout $P \in \mathbb{R}[X]$,

$$P(B) = \begin{pmatrix} P(A) & P(A) \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + P(0) \begin{pmatrix} 0 & -I_n \\ 0 & I_n \end{pmatrix}$$

3. On suppose que A est diagonalisable. Montrer que B l'est aussi, et donner ses valeurs propres.

Exercice 129 ★★

CCINP (ou CCP) PSI 2021

On définit : $\forall m \in \mathbb{R}, A_m = \begin{pmatrix} -m-1 & m & 2 \\ -m & 1 & m \\ -2 & m & 3-m \end{pmatrix}$. Déterminer le polynôme minimal de A_m .

Exercice 130 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

On considère un entier $n \geq 2$. Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ telle que $A^n = I_n$ et telle que la famille $(I_n, A, A^2, \dots, A^{n-1})$ soit libre. Montrer que $\text{tr}(A) = 0$.

Exercice 131 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2023

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et $M = \begin{pmatrix} A & 0 \\ A & A \end{pmatrix}$.

1. Comparer le spectre de A et celui de M .
2. Pour $P \in \mathbb{R}[X]$, exprimer $P(M)$ en fonction de $P(A)$ et $P'(A)$.
3. Conclure en donnant une condition nécessaire et suffisante portant sur A quant à la diagonalisabilité de M .

Exercice 132 ★★

Soit E un \mathbb{K} -espace vectoriel de dimension finie. Pour $u \in \mathcal{L}(E)$, on considère les endomorphismes $G_u : v \in \mathcal{L}(E) \mapsto u \circ v$ et $D_u : v \in \mathcal{L}(E) \mapsto v \circ u$.

1. Montrer que les applications $u \mapsto G_u$ et $u \mapsto D_u$ sont des morphismes d'algèbres injectifs.
2. Montrer que pour tout $P \in \mathbb{K}[X]$, $P(G_u) = G_{P(u)}$ et $P(D_u) = D_{P(u)}$.
3. Montrer que $\pi_{G_u} = \pi_{D_u} = \pi_u$.
4. Montrer que les propositions suivantes sont équivalentes : (i) u est diagonalisable ; (ii) G_u est diagonalisable ; (iii) D_u est diagonalisable.
5. Montrer que si u est diagonalisable, alors $G_u - D_u$ l'est également.
6. Montrer que si u est nilpotent, alors $G_u - D_u$ l'est aussi.

Séries et familles sommables

Exercice 133 ★★

Mines-Télécom MP 2018

Convergence et somme de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} u_n$, où $u_n = \int_0^1 x^n \sin(\pi x) dx$. On pourra travailler sur les sommes partielles de la série.

Exercice 134 ★★★

X (non PC/PSI) MP 2021

On pose $u_n = \sum_{k=1}^n k^2$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$. Calculer $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{u_n}$.

Exercice 135 ★★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

1. Donner la définition de la convergence d'une série puis montrer que si $\sum u_n$ converge alors la suite (u_n) tend vers 0.
2. Soit (u_n) une suite décroissante telle que $\sum u_n$ converge.
 - a. On suppose que $\lim_{n \rightarrow \infty} nu_n = \lambda \in \mathbb{R} \cup \{-\infty; +\infty\}$. Montrer que $\lambda = 0$.
 - b. Montrer que $\lim_{n \rightarrow \infty} nu_n = 0$.
 - c. Montrer que la série $\sum n(u_n - u_{n+1})$ converge puis montrer que $\sum_{n=1}^{+\infty} u_n = \sum_{n=0}^{+\infty} n(u_n - u_{n+1})$.

Exercice 136 ★★

CCINP (ou CCP) PSI 2019

Pour $n \in \mathbb{N}$, on pose $I_n = \int_0^{\pi/4} (\tan(x))^n dx$.

1. Calculer la limite de I_n lorsque n tend vers $+\infty$.
2. Pour $n \in \mathbb{N}$, calculer $I_n + I_{n+2}$.
3. En déduire $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1}$.
4. Montrer que la série $\sum_{n \geq 0} (-1)^n I_n$ converge et calculer sa somme.

Exercice 137 ★★

CCINP (ou CCP) PC 2021

On pose pour tout entier $n \geq 2$,

$$u_n = \prod_{k=2}^n \left(2 - e^{\frac{1}{k}}\right)$$

et pour tout entier $n \geq 3$,

$$v_n = \ln \left(\frac{nu_n}{(n-1)u_{n-1}} \right)$$

Montrer que la série $\sum_{n \geq 2} v_n$ converge, puis que la série $\sum_{n \geq 3} u_n$ diverge.

Exercice 138 ★★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

1. Montrer que pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, il existe un unique $u_n \in]0, 1]$ tel que

$$\int_{u_n}^1 \frac{e^t}{t} dt = n$$

On pourra considérer la fonction $x \mapsto \int_x^1 \frac{e^t}{t} dt$.

2. Étudier la monotonie de (u_n) et sa limite.
3. On pose $v_n = n + \ln u_n$. Montrer que (v_n) converge et exprimer sa limite sous forme d'une intégrale.
4. Quelle est la nature de la série $\sum u_n$?

Exercice 139 ★★★

Banque Mines-Ponts MP 2021

Soit $(a_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ une suite réelle telle que :

$$a_1 = 1 \quad \text{et} \quad \forall n \geq 2, a_n = 2a_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}$$

Montrer que (a_n) est définie, puis que la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{a_n^2}$ converge et calculer sa somme.

Exercice 140 ★★★

Centrale-Supélec MP 2019

Soit $(a_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ une suite de réels strictement positifs telle que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n(a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2) = 1$$

1. Montrer que la suite (a_n) converge vers 0 et que $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} a_n^2$ diverge.

2. On note $S_n = \sum_{k=1}^n a_k^2$. Montrer que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{S_{n-1}}^{S_n} t^2 dt = 1$$

3. Montrer que $a_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{\sqrt[3]{3n}}$.

Exercice 141 ★★★

Banque Mines-Ponts MP 2021

1. Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite numérique. Montrer que :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \ell \implies \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} u_k = \ell$$

2. Soient $a > 0$, $\lambda > 0$, $\alpha > 1$ et $f : [0, a] \rightarrow [0, a]$ continue admettant un développement asymptotique en 0 de la forme :

$$f(x) \underset{x \rightarrow 0}{=} x - \lambda x^\alpha + o(x^\alpha)$$

- a. Montrer qu'il existe $\varepsilon > 0$ tel que 0 soit le seul point fixe de f dans $[0, \varepsilon]$.
- b. On définit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ telle que $u_0 \in [0, \varepsilon]$ et $\forall n \in \mathbb{N}$, $u_{n+1} = f(u_n)$. Montrer que (u_n) converge vers 0.
- c. Trouver un équivalent de $f(x)^{1-\alpha} - x^{1-\alpha}$ quand x tend vers 0.
- d. En déduire un équivalent de u_n quand n tend vers $+\infty$.
- e. Appliquer aux fonctions $x \mapsto \sin x$ et $x \mapsto \ln(1+x)$.

Exercice 142 ★★

D'après Mines-Télécom MP 2016

Soit (v_n) une suite telle que $v_n = \frac{\cos(v_{n-1})}{n}$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$.

1. Déterminer la limite puis un équivalent de v_n . En déduire la nature de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} v_n$.
2. Montrer que la série $\sum \frac{(-1)^n}{n}$ converge.
3. En déduire la nature de la série $\sum_{n \in \mathbb{N}} (-1)^n v_n$.

Exercice 143 ★★★

Banque Mines-Ponts MP 2021

Pour $n \in \mathbb{N}$, on pose $u_n = \cos\left(n^2 \pi \ln\left(\frac{n}{n+1}\right)\right)$. Déterminer la nature de la série $\sum u_n$.

Exercice 144 ★★★

Déterminer la nature de la série $\sum \frac{(-1)^n}{\sqrt{n} + (-1)^n}$.

Exercice 145 ★★

CCINP (ou CCP) PC 2019

On pose $a_n = \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}$ pour tout entier $n \geq 2$.

1. Nature de $\sum_{n \geq 2} \ln(1 + a_n)$.
2. Déterminer $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\prod_{k=2}^n (1 + a_k) \right)$.

Exercice 146 ★★

Constante γ d'Euler

1. Montrer que $\ln(n) - \ln(n-1) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{1}{n} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)$.
2. En déduire qu'il existe $\gamma \in \mathbb{R}$ tel que $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \ln(n) + \gamma + o(1)$.

Exercice 147

Navale PSI 2019

Trouver un équivalent de $\sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^3}$.

Exercice 148

CCINP (ou CCP) MP 2022

On pose :

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, u_n = \frac{1}{3^n n!} \prod_{k=1}^n (3k-2) \quad \text{et} \quad v_n = \frac{1}{n^{2/3}}$$

1. Montrer que : $\forall n \in \mathbb{N}^*, \frac{u_{n+1}}{u_n} \geq \frac{v_{n+1}}{v_n}$.
2. En étudiant la suite $\left(\frac{u_n}{v_n}\right)$, montrer que la série $\sum u_n$ diverge.
3. On pose :

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, w_n = \frac{2}{3} \ln\left(\frac{n+1}{n}\right) + \ln\left(\frac{u_{n+1}}{u_n}\right)$$

Montrer que la série $\sum w_n$ converge.

4. En déduire qu'il existe deux réels a et C tels que $u_n \sim_{n \rightarrow +\infty} \frac{C}{n^a}$.

Exercice 149 ★★★

Banque Mines-Ponts MP 2018

1. Pour $n \in \mathbb{Z}$, calculer $\int_0^{2\pi} t e^{-int} dt$.
2. Soient I une partie finie de \mathbb{N}^* , $(a_n)_{n \in I}$ et $(b_n)_{n \in I}$ deux suites finies de réels positifs. Montrer que

$$\sum_{(n,m) \in I^2} \frac{a_n b_m}{n+m} \leq \pi \sqrt{\sum_{n \in I} a_n^2 \sum_{n \in I} b_n^2}$$

3. Soient $(a_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ et $(b_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ deux suites réelles telles que les familles $(a_n^2)_{n \in \mathbb{N}^*}$ et $(b_n^2)_{n \in \mathbb{N}^*}$ soient sommables. Montrer que $\left(\frac{a_n b_m}{n+m}\right)_{(n,m) \in (\mathbb{N}^*)^2}$ est sommable et que

$$\sum_{(n,m) \in (\mathbb{N}^*)^2} \frac{a_n b_m}{n+m} \leq \pi \sqrt{\sum_{n \in \mathbb{N}^*} a_n^2 \sum_{n \in \mathbb{N}^*} b_n^2}$$

Séries entières

Exercice 150 ★★

CCP MP

On note $f(x)$ la somme de la série entière $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} \sin\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right) x^n$.

1. Déterminer le rayon de convergence R de cette série entière.
2. Y a-t-il convergence en R et $-R$?
3. Déterminer $\lim_{x \rightarrow 1^-} f(x)$.
4. Montrer que $\lim_{x \rightarrow 1^-} (1-x)f(x) = 0$.

Exercice 151 ★★

CCP MP 2018

Soit $\beta \in \mathbb{R}$. Pour $n \in \mathbb{N}^*$, on pose $r_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^\beta}$ et $b_n = \frac{1}{r_n}$.

1. Déterminer le rayon de convergence R de la série entière $\sum b_n x^n$.
2. Étudier la convergence de la série pour $x = R$ et $x = -R$.

Exercice 152 ★★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

1. Déterminer le rayon de convergence de $\sum_{n \geq 1} (-1)^n \ln(n) x^n$.

$$\text{On note } S(x) = \sum_{n=1}^{+\infty} (-1)^n \ln(n) x^n.$$

2. Montrer que

$$\forall x \in]-1, 1[, S(x) = \frac{1}{1+x} \sum_{n=1}^{+\infty} (-1)^{n+1} \ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) x^{n+1}$$

3. En déduire que

$$\lim_{x \rightarrow 1} S(x) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{+\infty} (-1)^{n+1} \ln\left(1 + \frac{1}{n}\right)$$

4. Déterminer $\lim_{x \rightarrow 1} S(x)$.

Exercice 153 ★★

CCP MP

Soit (a_n) la suite définie par $a_0 \in \mathbb{R}_+^*$ et $a_{n+1} = \ln(1 + a_n)$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.

1. Déterminer la limite de (a_n) .
2. Déterminer le rayon de convergence de la série entière $\sum a_n z^n$.
3. Déterminer le domaine de définition de $x \in \mathbb{R} \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} a_n x^n$.

On pourra déterminer la limite de $\frac{1}{a_{n+1}} - \frac{1}{a_n}$.

Exercice 154 ★★★★★

X MP 2010

Caractériser les suites $(a_n) \in \mathbb{C}^{\mathbb{N}}$ telles que $\sum_{n \in \mathbb{N}} a_n x^n$ soit le développement en série entière en 0 d'une fraction rationnelle.

Exercice 155 ★★★

Mines-Ponts MP 2017

1. Soit $P \in \mathbb{C}[X]$. Montrer qu'il existe un unique polynôme Q tel que

$$\forall z \in \mathbb{C}, Q(z) = e^{-z} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{P(n)z^n}{n!}$$

On notera ce polynôme $u(P)$.

2. Montrer que u est un automorphisme de $\mathbb{C}[X]$.
3. Déterminer les éléments propres de u .

Exercice 156 ★★★

Centrale MP 2018

Soit $(a_n)_{n \geq 2}$ une suite de réels. On pose $D = \{z \in \mathbb{C}, |z| < 1\}$ et on suppose que

$$f : z \mapsto z + \sum_{n=2}^{+\infty} a_n z^n$$

est définie et injective sur D .

1. Montrer que $\forall z \in D, z \in \mathbb{R} \iff f(z) \in \mathbb{R}$.
2. Montrer que $\forall z \in D, \operatorname{Im}(z) > 0 \iff \operatorname{Im}(f(z)) > 0$.
3. Soient $r \in]0, 1[$ et $n \in \mathbb{N}^*$. Calculer en fonction de r et n l'intégrale

$$I_n(r) = \int_0^\pi \operatorname{Im}(f(re^{i\theta})) \sin(n\theta) d\theta$$

4. En remarquant que $|\sin(n\theta)| \leq n \sin(\theta)$ pour $\theta \in [0, \pi]$, montrer que $|a_n| \leq n$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$.

Exercice 157 ★★★

Mines-Ponts MP 2017

E est un ensemble à n éléments. On appelle *dérangement* une permutation de E sans point fixe. On note D_n le nombre de dérangements de E . On pose $D_0 = 1$.

1. Montrer l'égalité $n! = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} D_k$.

On définit $f : x \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{D_n}{n!} x^n$.

2. Justifier que f est définie sur $] -1, 1[$.
3. Montrer que pour x dans $] -1, 1[$, $f(x) = \frac{e^{-x}}{1-x}$.
4. En déduire l'égalité $D_n = n! \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{k!}$.
5. Montrer que, lorsque $n \in \mathbb{N}^*$, D_n est la partie entière de $\frac{n!}{e} + \frac{1}{2}$.

Exercice 158**Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) PSI 2019**

On cherche à résoudre l'équation

$$(E) \quad \forall x \in \mathbb{R}_+, u(x) = 1 + \int_0^x u\left(\frac{t}{2}\right) dt$$

avec $u \in \mathcal{C}^0(\mathbb{R}_+, \mathbb{R})$.

1. Soit la suite (u_n) de fonctions définie par $u_0 = 1$ et, pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\forall x \in \mathbb{R}_+, u_{n+1}(x) = 1 + \int_0^x u_n\left(\frac{t}{2}\right) dt$$

Montrer par récurrence que,

$$\forall x \in \mathbb{R}_+, 0 \leq u_{n+1}(x) - u_n(x) \leq \frac{x^{n+1}}{(n+1)!}$$

En déduire que la suite (u_n) converge vers une certaine fonction u .

2. Montrer que u est solution de (E).
3. Donner les fonctions développables en série entière dont la restriction à \mathbb{R}_+ est solution de (E).

Exercice 159 ★★**CCINP (ou CCP) MP 2021**

Soit $t \in \mathbb{R}$. On pose $\forall n \in \mathbb{N}, f_n(t) = \frac{(t^2 - 1)^{n+1}}{n+1}$.

1. Donner le domaine de convergence D de $\sum f_n$.
2. Calculer $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n(t)$.
3. Étudier la convergence normale de $\sum f_n$ sur $[0, 1]$.
4. Étudier la convergence uniforme de $\sum f_n$ sur $[0, 1]$.
5. Quelle est la nature de la série $\sum u_n$, avec $u_n = \int_0^1 \frac{(t^2 - 1)^{n+1}}{n+1} dt$?
6. Calculer $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n$.

Exercice 160 ★★★**Banque Mines-Ponts MP 2018**

Soit $(z_p)_{p \in \mathbb{N}} \in \mathbb{C}^{\mathbb{N}}$ une suite de complexes non nuls à valeurs dans le disque ouvert $D(0, R)$ ($R > 0$) et qui converge vers 0.

1. Soit $f(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n$ de rayon de convergence R , telle que $\forall p \in \mathbb{N}, f(z_p) = 0$.
Montrer que $a_n = 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.
2. Que dire de deux séries entières f et g de même rayon de convergence R et telles que $f(z_p) = g(z_p)$ pour tout $p \in \mathbb{N}$?

Exercice 161 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2023

Soit $\alpha \in]-1, 1[$. Pour $x \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}^*$, on pose $w_n(x) = \frac{\alpha^n}{n} \cos nx$. Soit $W : x \mapsto \sum_{n=1}^{+\infty} w_n(x)$.

1. Montrer que W est de classe \mathcal{C}^1 sur \mathbb{R} ; exprimer W' à l'aide des fonctions usuelles.
2. Calculer $\int_{-\pi}^{\pi} \ln(1 - 2\alpha \cos x + \alpha^2) dx$.

Exercice 162 ★★★★★

ENS MP 2011

Soit \mathbb{K} un corps fini et \mathcal{P} l'ensemble des polynômes irréductibles unitaires de $\mathbb{K}[X]$. On pose

$$\zeta(t) = \prod_{P \in \mathcal{P}} \frac{1}{1 - t^{\deg P}}$$

1. Montrer que ζ est défini sur un intervalle du type $[0, t_0[$.
2. Montrer que ζ est développable en série entière au voisinage à droite de 0 et déterminer son développement.

Exercice 163 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2021

Développer en série entière $f : x \mapsto \ln(1 - \sqrt{2x + x^2})$.

Exercice 164 ★★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2021

On pose pour $x \in \mathbb{R}$, lorsque c'est possible : $g(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} e^{-n+n^2ix}$.

1. Montrer que g est de classe \mathcal{C}^∞ sur \mathbb{R} .
2. Montrer que g n'est pas développable en série entière.

Exercice 165 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

Développer en séries entières les fonctions suivantes au voisinage de 0 et préciser le rayon de convergence :

1. $f(z) = \frac{1}{6z^2 - 5z + 1}$, $z \in \mathbb{C}$
2. $g(x) = \ln\left(\frac{2+x}{1-x}\right)$, $x \in \mathbb{R}$
3. $h(x) = \int_0^x \sin(t^2) dt$, $x \in \mathbb{R}$

Exercice 166 ★★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2023

Soit $q \in]-1, 1[$.

1. Montrer qu'il existe une unique fonction f continue en 0 telle que $f(0) = 1$ et

$$\forall x \in]-1, 1[, f(x) = \frac{1+x}{1-x} f(qx)$$

2. Cette fonction est-elle développable en série entière ? Si oui, quel est son rayon de convergence ?

Exercice 167 ★★

Centrale PC

On pose $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$ pour $n \in \mathbb{N}^*$. Déterminer le rayon de convergence et la somme de la série entière $\sum_{n \in \mathbb{N}^*} H_n x^n$.

Exercice 168 ★★

Mines-Ponts MP 2016

Soit $q > 0$, on pose $a_n = q^{\sqrt{n}}$ si n est un carré d'entier et $a_n = 0$ sinon. Déterminer le rayon de convergence de la série entière $\sum_{n \in \mathbb{N}} a_n x^n$.

Exercice 169 ★★

CCP MP 2018

1. Montrer que \arctan est développable en série entière sur $] -1, 1[$.
2. On considère la série entière $\sum_{k \in \mathbb{N}^*} \frac{(-1)^{k+1}}{(2k+1)(2k-1)} x^{2k+1}$. Donner son rayon de convergence R . On note $f(x)$ la somme.
3. Donner une expression simple de f' et de f .
4. Que peut-on dire de la convergence sur $[-R, R]$?
5. Calculer $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{4n^2 - 1}$.

Exercice 170 ★★★

Mines-Ponts MP 2018

On note $a_n = \int_0^1 \frac{dt}{(2+t^2)^{n+1}}$ pour $n \in \mathbb{N}$.

1. Donner le rayon de convergence de la série entière $\sum_{n \in \mathbb{N}} a_n x^n$.
2. Calculer la somme de cette série entière sur son domaine de convergence.

Exercice 171 ★

Petites Mines PC 2017

Déterminer le rayon de convergence et la somme de la série entière $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{n^2 + 4n - 1}{n + 2} x^n$.

Probabilités

Exercice 172

Mines-Ponts MP 2018

On considère n ampoules s'allumant aléatoirement de manière indépendante, la probabilité que la i -ème s'allume étant de p_i . On note Y la variable aléatoire donnant le nombre d'ampoules qui sont allumées.

1. Donner l'espérance et la variance de Y .
2. On note $m = \mathbb{E}(Y)$. Déterminer, à m fixé, les p_i tels que $\mathbb{V}(Y)$ soit maximale. Quelle loi suit Y pour de tels p_i ?

Exercice 173 ★★

CCINP (ou CCP) PC 2017

Soient X et Y des variables aléatoires indépendantes de lois géométriques de paramètres p_1 et p_2 . Déterminer la loi de $Z = \min(X, Y)$.

Exercice 174 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

Soient X, Y, Z des variables aléatoires mutuellement indépendantes définies sur un même espace probabilisé $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ et suivant la même loi géométrique de paramètre $p \in]0, 1[$.

1. Calculer $\mathbb{P}(X = Y)$. En déduire $\mathbb{P}(X \leq Y)$.
2. Déterminer la loi de $X + Y$.
3. Calculer $\mathbb{P}(Z > n)$.
4. Calculer $\mathbb{P}(Z > X + Y)$.

Exercice 175 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2021

Une urne contient initialement une boule blanche. On effectue un ou plusieurs lancers indépendants d'une pièce équilibrée :

- si on obtient pile, on ajoute une boule noire et on lance à nouveau la pièce ;
- si on obtient face, on tire une boule de l'urne et l'expérience s'arrête.

On note X le numéro du lancer auquel on arrête l'expérience.

1. Déterminer la loi de X .
2. Quelle est la probabilité de tirer une boule blanche à la fin de l'expérience ?

Exercice 176 ★★★★★

Centrale-Supélec MP 2021

Soit X et Y deux variables aléatoires indépendantes suivant la même loi géométrique de paramètre $p \in]0, 1[$. On pose $U = \min(X, Y)$ et $V = X - Y$.

1. Écrire explicitement les lois suivies par X et Y .
2.
 - a. Déterminer la loi conjointe du couple (U, V) puis les lois de U et de V .
 - b. Montrer que U et V sont deux variables aléatoires indépendantes.
3. Réciproquement, on suppose que X et Y sont indépendantes de même loi, et que U et V sont indépendantes telles que

$$\forall (n, m) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{Z}, \mathbb{P}(\{U = n\} \cap \{V = m\}) \neq 0$$

Montrer que X et Y suivent une loi géométrique dont on précisera le paramètre.

Exercice 177

CCINP (ou CCP) MP 2018

On cherche à obtenir toutes les pièces d'un puzzle de n pièces différentes. On achète chaque semaine une pièce emballée, chaque pièce étant équiprobable. Pour $k \in \mathbb{N}^*$ on note Y_k le nombre d'achats à effectuer, sachant qu'on a eu une $(k-1)^{\text{ème}}$ pièce différente, avant d'avoir une $k^{\text{ème}}$ pièce qu'on n'a pas déjà eue.

1.
 - a. Les variables aléatoires Y_k sont-elles mutuellement indépendantes ? Justifier que Y_1 peut s'écrire comme une constante simple.
 - b. Donner la loi de Y_k , pour $k \in \mathbb{N}^*$. Donner l'espérance, puis la variance de Y_k .
2. On note X le nombre d'achats à effectuer avant d'avoir le puzzle complet. Exprimer X en fonction des Y_k . Donner l'espérance de X en fonction de $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$.
3. En utilisant une comparaison série-intégrale, déterminer un équivalent de H_n . En déduire un équivalent quand $n \rightarrow +\infty$ de l'espérance de X .

Exercice 178

Centrale MP

Peut-on piper deux dés de manière à ce qu'il y ait équiprobabilité sur l'ensemble des sommes possibles obtenues en les lançant simultanément ?

Exercice 179 ★★★★★

Banque Mines-Ponts MP 2018

On note $\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s}$ pour $s > 1$ et $\mathcal{P} = \{2, 3, 5, \dots\}$ l'ensemble des nombres premiers.

1. Quelle valeur doit prendre $\lambda \in \mathbb{R}$ pour que la relation $\mathbb{P}(\{n\}) = \lambda n^{-s}$ définisse une loi de probabilité sur $(\mathbb{N}^*, \mathcal{P}(\mathbb{N}^*))$?
On considère l'espace probabilisé $(\mathbb{N}^*, \mathcal{P}(\mathbb{N}^*))$ dans la suite.
2. On pose $A_r = r\mathbb{N}^*$ pour $r \in \mathbb{N}^*$. Calculer $\mathbb{P}(A_r)$.
3. Montrer que la $(A_p)_{p \in \mathcal{P}}$ est une famille d'événements mutuellement indépendants.
4. Montrer que : $\bigcap_{p \in \mathcal{P}} \overline{A_p} = \{1\}$.
En déduire que $\zeta(s) = \prod_{p \in \mathcal{P}} \frac{1}{1 - p^{-s}}$.
5. La famille $\left(\frac{1}{p}\right)_{p \in \mathcal{P}}$ est-elle sommable ?

Exercice 180

Mines-Ponts MP 2019

Soit un entier $k \geq 2$. On pose $\omega = e^{\frac{2i\pi}{k}}$.

1. Soit $j \in \mathbb{N}$. Calculer $\sum_{\ell=0}^{k-1} \omega^{\ell j}$.
2. Soit $n \in \mathbb{N}$. On lance n fois une pièce de monnaie équilibrée. Soit X_n la variable aléatoire comptant le nombre de piles.
Montrer que la probabilité que X_n soit divisible par k converge quand n tend vers l'infini et calculer sa limite.

Exercice 181

CCINP (ou CCP) PSI 2021

On dispose d'une urne contenant trois jetons indiscernables numérotés de 1 à 3. On effectue une série de tirages indépendants avec remise d'un jeton. On note :

- Y la variable aléatoire indiquant le nombre de tirages nécessaires pour avoir deux nombres différents ;
- Z la variable aléatoire indiquant le nombre de tirages nécessaires pour avoir les trois numéros.

1. Reconnaître la loi de $Y - 1$.
2. En déduire la loi de Y .
3. En déduire $\mathbb{E}(Y)$ et $\mathbb{V}(Y)$.
4. Déterminer la loi du couple (Y, Z) .
5. En déduire la loi de Z .

Exercice 182

C.C.E. Mines MP 2015

On considère un péage composé de m guichets. On note N la variable aléatoire égale au nombre de voitures utilisant le péage en 1h. N suit une loi de Poisson de paramètre $\lambda > 0$. Le choix du guichet se fait de manière aléatoire et indépendamment des autres voitures. On note X la variable aléatoire égale au nombre de voitures ayant pris le guichet n°1.

1. Calculer la probabilité conditionnelle $\mathbb{P}(X = k \mid N = n)$ pour $0 \leq k \leq n$.
2. Montrer que $\mathbb{P}(X = k) = e^{-\lambda} \left(\frac{\lambda}{m}\right)^k \frac{1}{k!} \sum_{n=0}^{+\infty} \lambda^n \left(1 - \frac{1}{m}\right)^n \frac{1}{n!}$.
3. Donner la loi de X .
4. Espérance et variance de X ?

Exercice 183 ★★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2019

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on pose $I_n = \int_{-\infty}^{+\infty} t^n e^{-t^2} dt$

1. Justifier que I_n est bien définie.
2. Trouver une relation de récurrence entre I_n et I_{n+2} .
3. On considère une variable aléatoire X suivant une loi de Poisson de paramètre $\lambda > 0$. On pose $Y = I_X$. Calculer $\mathbb{E}(Y)$.

Exercice 184

ENS Ulm MPI 2019

On lance une pièce équilibrée jusqu'à ce que le nombre de «piles» soit égal au double du nombre de «faces». Quelle est la probabilité qu'on ne s'arrête jamais ?

Exercice 185 ★★★**CCINP (ou CCP) MP 2018**

- Une urne contient n boules blanches et n boules noires indiscernables au toucher. On tire simultanément n boules de l'urne.
 - Quel est le nombre de tirages possibles ?
 - Montrer que $\sum_{k=0}^n \binom{n}{k}^2 = \binom{2n}{n}$.
- Une puce se déplace sur un axe gradué d'origine O par bonds successifs d'une unité. Elle peut aller à tout instant, soit à droite, soit à gauche, avec équiprobabilité. On note C_n l'événement : «la puce est en O après n sauts». On donne : $P(C_0) = 1$.
 - Déterminer $P(C_{2n+1})$ et $P(C_{2n})$.
 - Calculer $\lim_{n \rightarrow +\infty} P(C_{2n})$ à l'aide de la formule de Stirling.
- La puce peut à présent se déplacer suivant deux directions (droite, gauche, haut, bas) avec équiprobabilité.
 - Montrer que $P(C_{2n}) = \binom{2n}{n}^2 \left(\frac{1}{4}\right)^{2n}$.
 - Calculer $\lim_{n \rightarrow +\infty} P(C_{2n})$.

Exercice 186**Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2019**

On considère la série entière $\sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{n^2 + n + 1}{n!} t^n$.

- Donner le rayon de convergence R de cette série.
- Calculer sa somme $S(t)$ sur $] -R, R[$.
- On se donne une variable aléatoire X telle que, $\forall t \in [-1, 1]$, $G_X(t) = \lambda S(t)$ avec $\lambda \in \mathbb{R}$.
 - Que vaut λ ?
 - Calculer $E(X)$ et $V(X)$.

Equations différentielles**Exercice 187 ★★****CCINP (ou CCP) MP 2019**

Résoudre, à l'aide de matrices, le système différentiel suivant :

$$\begin{cases} x' = 3x + 6y \\ y' = -3x - 6y \\ z' = -3x - 6y - 5z \end{cases}$$

Exercice 188 ★★**CCINP (ou CCP) PSI 2021**

Soit le système différentiel $Y'(t) = A(t)Y(t)$ avec $A(t) = \begin{pmatrix} 1-3t & -2t \\ 4t & 1+3t \end{pmatrix}$.

- Donner les valeurs propres de $A(t)$.
- En déduire qu'il existe P indépendant de t telle que $P^{-1}A(t)P$ soit diagonale.
- Résoudre le système différentiel.

Exercice 189 ★★**TPE-EIVP MP 2014**

Résoudre le système différentiel suivant :

$$\begin{cases} x'(t) = 9x(t) - 5y(t) + 2t \\ y'(t) = 10x(t) - 6y(t) + e^t \end{cases}$$

Exercice 190 ★★**Saint-Cyr PSI 2019**

Soit la matrice $A = \begin{pmatrix} 3 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

1. Montrer que A est semblable à $T = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$. Donner une matrice inversible P telle que $A = PTP^{-1}$.

2. Trouver les solutions du système différentiel $X'(t) = AX(t)$, avec $X(t) = \begin{pmatrix} f(t) \\ g(t) \\ h(t) \end{pmatrix}$.

Exercice 191**CCINP (ou CCP) MP 2013**

On se donne l'équation différentielle $4x^2y'' - 8xy' + 9y = x^2 + 1$.

1. Trouver une solution polynomiale de degré 2 à l'équation.
2. Résoudre l'équation sur \mathbb{R}_+^* . On pourra poser $x = e^t$.
3. Résoudre l'équation sur \mathbb{R}_-^* .

Exercice 192 ★★★**Mines MP 2010**

Soit $q \in \mathcal{C}^0(\mathbb{R}_+, \mathbb{R}_+)$. On considère l'équation différentielle $y'' + qy = 0$. On suppose que q est non constamment nulle au voisinage de $+\infty$ et que l'on dispose d'une solution y strictement positive sur \mathbb{R}_+ et on pose $f = \frac{y'}{y}$.

1. Trouver une équation différentielle vérifiée par f .
2. Montrer que f ne s'annule pas sur \mathbb{R}_+ .
3. Montrer que f est décroissante sur \mathbb{R}_+ puis qu'elle y est strictement positive.
4. Montrer que q est intégrable sur \mathbb{R}_+ et que $\int_{[x, +\infty[} q_{x \rightarrow +\infty} = \mathcal{O}\left(\frac{1}{x}\right)$.

Exercice 193 ★★★★★**ENS MP 2010**

Soient q une application continue périodique non identiquement nulle de \mathbb{R} dans \mathbb{R}_+ et f une solution de l'équation différentielle $y'' + qy = 0$. Montrer que f s'annule une infinité de fois sur \mathbb{R}_+ .

Exercice 194 ★★★**TPE-EIVP MP 2018**

Soient a et b deux fonctions définies et continues sur $[0, 1]$ et à valeurs dans \mathbb{R} . Soit (E) l'équation différentielle : $y'' + a(t)y' + b(t)y = 0$.

1. On considère f une fonction solution de (E) sur $[0, 1]$ s'annulant une infinité de fois. Montrer qu'il existe $x \in [0, 1]$ tel que $f(x) = f'(x) = 0$.
2. Déterminer toutes les solutions de (E) s'annulant une infinité de fois sur $[0, 1]$.

Exercice 195 ★★★**Banque Mines-Ponts MP 2019**

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telle que $\text{tr}(A) > 0$, et $x : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ de classe \mathcal{C}^1 , telle que $\forall t \in \mathbb{R}$, $x'(t) = Ax(t)$ et $\lim_{t \rightarrow +\infty} x(t) = 0$.

Montrer qu'il existe une forme linéaire non nulle ℓ , telle que $\forall t \in \mathbb{R}$, $\ell(x(t)) = 0$.

Exercice 196 ★★★**Zéros entrelacés**

1. Soient p et q deux fonctions continues sur \mathbb{R} telles que $p \leq q$ sur \mathbb{R} . Soient u et v deux fonctions de classe \mathcal{C}^2 telles que $u'' + pu = 0$ et $v'' + qv = 0$. On suppose que u s'annule en des réels a et b avec $a < b$ mais qu'elle ne s'annule pas sur $]a, b[$.
 - a. On pose $W = u'v - uv'$. Déterminer W' .
 - b. En déduire que v s'annule sur $[a, b]$.
2. Application. Soient r une fonction continue sur \mathbb{R} , f de classe \mathcal{C}^2 sur \mathbb{R} telle que $f'' + rf = 0$ et $M \in \mathbb{R}_+^*$.
 - a. On suppose $r \geq M^2$. Montrer que tout intervalle fermé de longueur $\frac{\pi}{M}$ contient au moins un zéro de f .
 - b. On suppose $r \leq M^2$. On suppose que f s'annule en des réels a et b tels que $a < b$ mais qu'elle ne s'annule pas sur $]a, b[$. Montrer que $b - a \geq \frac{\pi}{M}$.

Topologie

Exercice 197 ★★★★★

Centrale MP 2018

Soient E un espace vectoriel normé, K un compact de E et $g : K \rightarrow K$ une application 1-lipschitzienne. On cherche à montrer que g est surjective si, et seulement si, c est une isométrie.

1. On commence par supposer g surjective. On considère x et y dans K ainsi que x_n et y_n des antécédents par g^n de x et y respectivement. On note (x', y') une valeur d'adhérence de la suite $(x_n, y_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Montrer que $x - y$ est une valeur d'adhérence de la suite $(g^n(x') - g^n(y'))_{n \in \mathbb{N}}$.
2. Montrer que la suite $(\|g^n(x') - g^n(y')\|)_{n \in \mathbb{N}}$ tend vers $\|x - y\|$. En déduire que g est une isométrie.
3. On suppose maintenant que g est une isométrie. Montrer que g est surjective. Donner un contre-exemple lorsque K est seulement bornée.

Exercice 198 ★★★★★

Centrale MP

Soit E un \mathbb{R} -espace vectoriel de dimension finie.

1. Pour un compact K non vide, on pose $\delta(K) = \sup_{(x,y) \in K^2} \|x - y\|$. Montrer que $\delta(K)$ est bien défini. La borne supérieure est-elle atteinte ?
2. Pour $a \in E$, on note \mathcal{S}_a l'ensemble des compacts de E symétriques par rapport à a . Pour B compact de E , on pose

$$T(B) = \left\{ x \in B \mid \forall y \in B, \|x - y\| \leq \frac{1}{2} \delta(B) \right\}$$

Montrer que T induit une application de \mathcal{S}_a dans \mathcal{S}_a .

3. Soit $B_0 \in \mathcal{S}_a$. On pose $B_{n+1} = T(B_n)$ pour $n \in \mathbb{N}$. Déterminer $\bigcap_{n \geq 0} B_n$.
4. En déduire que toute isométrie de E conserve les milieux.
Remarque : une isométrie de E est une application $u : E \rightarrow E$ telle que $\|u(x) - u(y)\| = \|x - y\|$ pour tout $(x, y) \in E^2$.

Exercice 199 ★★★★★

Mines MP

Soit K une partie compacte non vide d'un espace vectoriel normé et $f : K \rightarrow K$ telle que

$$\forall (x, y) \in K^2, x \neq y \implies \|f(x) - f(y)\| < \|x - y\|$$

1. Montrer que f admet un unique point fixe.
2. Soit (x_n) une suite de premier terme $x_0 \in K$ et telle que $x_{n+1} = f(x_n)$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. Montrer que (x_n) converge vers l'unique point fixe de f .
3. Donner un contre-exemple en ne supposant plus K compact.

Exercice 200 ★★★★★

Principe du maximum pour les polynômes (X 2019)

Soit $P \in \mathbb{C}[X]$. On note

$$B = \{z \in \mathbb{C}, |z| \leq 1\} \quad \text{et} \quad S = \{z \in \mathbb{C}, |z| = 1\}$$

Montrer que

$$\max_{z \in B} |P(z)| = \max_{z \in S} |P(z)|$$

Exercice 201

X MP 2010

Soit A une partie convexe et dense de \mathbb{R}^n . Montrer que $A = \mathbb{R}^n$.

Exercice 202

ENS MP 2010

Soit $(a_n)_{n \geq 0}$ une suite strictement croissante de réels strictement positifs. Montrer l'équivalence des conditions suivantes :

- (i) le sous-espace vectoriel engendré par la famille $(x \mapsto x^{a_n})_{n \geq 0}$ est dense dans $\mathcal{C}([0, 1], \mathbb{R})$

$$\text{pour la norme } \|\cdot\|_2 : f \mapsto \sqrt{\int_0^1 f^2};$$

- (ii) la série de terme général $\frac{1}{a_n}$ diverge.

Exercice 203

Mines MP

Soit E un espace vectoriel normé.

1. Soit F un sous-espace vectoriel de E . Montrer que \overline{F} est encore un sous-espace vectoriel de E .
2. Soit H un hyperplan de E . Montrer que H est fermé ou dense dans E .

Exercice 204 ★★★

CCP MP 2016

Soient $\alpha_0, \dots, \alpha_n$ des réels distincts ($n \geq 1$). On pose $N(P) = \sum_{k=0}^n |P(\alpha_k)|$. Montrer que N est une norme non euclidienne sur $\mathbb{R}_n[X]$.

Exercice 205 ★★★

CCP MP 2019

Soit E un espace préhilbertien réel muni de son produit scalaire $\langle \cdot, \cdot \rangle$. On note $\|\cdot\|$ la norme associée.

On dit qu'une suite $(x_n) \in E^{\mathbb{N}}$ converge *fortement* vers $x \in E$ si $\lim_{n \rightarrow +\infty} \|x_n - x\| = 0$ et que (x_n) converge *faiblement* vers x si $\forall y \in E, \lim_{n \rightarrow +\infty} \langle x_n - x, y \rangle = 0$.

1.
 - a. Montrer que si (x_n) converge faiblement, sa limite est unique.
 - b. Montrer que la convergence forte implique la convergence faible.
2. Montrer que (x_n) converge fortement vers x si et seulement si (x_n) converge faiblement vers x et $\lim_{n \rightarrow +\infty} \|x_n\| = \|x\|$.
3. Montrer que, en dimension finie, ces deux modes de convergence sont équivalents.
4. Donner un contre-exemple en dimension infinie.

Exercice 206 ★★★

Centrale PSI 2010

Soit $E = \mathcal{C}([0, 1])$. Pour $f \in E$, on pose $\|f\|_{\infty} = \sup_{[0,1]} |f|$ et $\|f\|_2 = \left(\int_{[0,1]} f^2 \right)^{\frac{1}{2}}$.

1. Montrer qu'il existe $b \in \mathbb{R}_+$ tel que $\forall f \in E, \|f\|_2 \leq b \|f\|_{\infty}$.
2. Soit V un sous-espace vectoriel de E de dimension finie. Montrer qu'il existe $c \in \mathbb{R}_+$ tel que $\forall f \in V, \|f\|_{\infty} \leq c \|f\|_2$.
3. Soit V un sous-espace vectoriel de E . On suppose qu'il existe $n \in \mathbb{N}^*$ tel que $\forall f \in V, \|f\|_{\infty} \leq n \|f\|_2$. Montrer que V est de dimension finie et que $\dim V \leq n^2$.

Exercice 207 ★★★

D'après Centrale MP 2006

On note E l'ensemble des fonctions f de classe \mathcal{C}^2 sur $[0, 1]$ telles que $f(0) = f'(0) = 0$. Pour $f \in E$, on pose

$$N_{\infty}(f) = \sup_{[0,1]} |f| \quad N(f) = N_{\infty}(f + f'') \quad N_1(f) = N_{\infty}(f) + N_{\infty}(f'')$$

1. Montrer que N_{∞} , N et N_1 sont des normes sur E .
2. Montrer que N_{∞} n'est équivalente ni à N ni à N_1 .
3. Soit $f \in E$. Montrer que pour tout $x \in [0, 1]$,

$$f(x) = \int_0^x \sin(x-t)(f(t) + f''(t)) dt$$

4. Montrer que N et N_1 sont équivalentes.

Exercice 208

CCP 2013

Soit E l'ensemble des fonctions continues de $[0, 1]$ dans \mathbb{R} que l'on munit de la norme uniforme. On pose

$$A = \left\{ f \in E \mid f(0) = 0, \int_0^1 f(t) dt \geq 1 \right\}$$

1. Montrer que A est une partie fermée de E .
2. Montrer que pour tout $f \in A$, $\|f\|_\infty > 1$.
3. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Montrer que l'on peut choisir $\alpha \in]0, 1]$ tel que la fonction

$$f_n : x \in [0, 1] \mapsto \begin{cases} \frac{1}{\alpha} \left(1 + \frac{1}{n}\right) x & \text{si } x \leq \alpha \\ 1 + \frac{1}{n} & \text{si } x > \alpha \end{cases}$$

appartienne à A .

4. En déduire la distance $d(0, A)$.

Exercice 209 ★★

Petites Mines MP 2016

Soit $E = \mathcal{C}^0([0, 1], \mathbb{R})$. On pose

$$O = \{f \in E \mid f(1) > 0\} \quad \text{et} \quad F = \left\{ f \in E, \int_0^1 f(t) dt \leq 0 \right\}$$

1. Montrer que O est ouvert pour $\|\cdot\|_\infty$.
2. Montrer que F est fermé pour $\|\cdot\|_\infty$ et pour $\|\cdot\|_1$.
3. O est-il ouvert pour $\|\cdot\|_1$?

Exercice 210 ★

Mines-Télécom (hors Mines-Ponts) MP 2021

Soit $E = \mathbb{C}[X]$. Pour $P = \sum_{k=0}^{+\infty} a_k X^k \in E$, on pose $\|P\| = \sum_{k=0}^{+\infty} |a_k|$. Soit $b \in \mathbb{C}$. On définit l'application $f : P \in E \mapsto P(b)$.

1. Montrer que f est linéaire.
2. Etudier la continuité de f et calculer sa norme subordonnée le cas échéant.

Exercice 211 ★★★

Banque Mines-Ponts MP 2022

On fixe $\omega \in \mathcal{C}^0(\mathbb{R}, \mathbb{R}_+^*)$. Pour toute fonction $f \in \mathcal{C}^0(\mathbb{R}, \mathbb{R})$, on pose :

$$T_\omega(f)(x) = \frac{1}{\int_0^x \omega(t) dt} \int_0^x f(t) \omega(t) dt$$

1. Montrer que $T_\omega(f)$ est prolongeable par continuité en 0.
2. Soit $a > 0$. Montrer que T_ω est un endomorphisme continu et injectif de $\mathcal{C}^0([0, a], \mathbb{R})$ muni de la norme infinie.
3. Soient $\lambda \in \mathbb{R}$ et $f \in \mathcal{C}^0(\mathbb{R}, \mathbb{R})$, non nulle, telle que : $T_\omega(f) = \lambda f$.
 - a. Donner une équation différentielle vérifiée par f et la résoudre.
 - b. Montrer que $\lambda \in]0, 1]$.

Exercice 212 ★★★

Soit $(A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})^2$. Montrer que $\chi_{\exp(AB)} = \chi_{\exp(BA)}$.

Espaces préhilbertiens réels

Exercice 213 ★★★

ENS MP 2010

Montrer que $\Phi : \mathcal{S}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ qui à une matrice associe sa plus grande valeur propre est une application convexe.

Exercice 214 ★★★

ENS MP 2010

Soient $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ et $B = \left(\begin{array}{c|c} A & I_n \\ \hline I_n & A \end{array} \right)$. Trouver les valeurs propres de B .

Exercice 215 ★★★★★

Banque Mines-Ponts MP 2021

Soient $n \in \mathbb{N}^*$ et $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Montrer l'équivalence entre les deux propositions suivantes :

- (i) $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ et $\forall (\lambda, \mu) \in \text{Sp}(A)^2, \lambda + \mu \neq 0$;
- (ii) $\forall B \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R}), \exists ! M \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R}), AM + MA = B$.

Exercice 216 ★★★

Banque Mines-Ponts MP 2021

Soit $S \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ une matrice symétrique dont les coefficients diagonaux sont nuls et D une matrice diagonale.

Montrer que $S + D$ est semblable à D si, et seulement si, S est nulle.

Exercice 217

CCINP (ou CCP) PC 2019

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ tel que $M^n = 0$.

1. Montrer que si M est symétrique, alors $M = 0$.
2. Montrer que si $M^T M = M M^T$, alors $M = 0$.

Exercice 218 ★★★

ENS MP

Soient $n \in \mathbb{N}^*$ et (e_1, \dots, e_n) une base orthogonale de \mathbb{R}^n .

1. Montrer qu'il existe un vecteur u de \mathbb{R}^n non nul tel que les projetés orthogonaux de e_1, \dots, e_n sur $\text{vect}(u)$ aient la même norme.
2. Montrer que cette norme commune est indépendante du vecteur u choisi et l'exprimer en fonction de $\|e_1\|, \dots, \|e_n\|$.

Exercice 219

CCINP (ou CCP) MP 2021

Soit $E = \mathbb{R}[X]$.

1. Montrer que $(P, Q) \mapsto \int_0^{+\infty} P(t)Q(t)e^{-t} dt$ est un produit scalaire sur E .
2. Calculer $\int_0^{+\infty} t^n e^{-t} dt$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.
3. Donner une base orthonormée de $F = \mathbb{R}_2[X]$.
4. Déterminer le projeté orthogonal de X^3 sur F .
5. Montrer que :

$$\forall P \in E, \left| \int_0^{+\infty} P(t)e^{-t} dt \right| \leq \sqrt{\int_0^{+\infty} P^2(t)e^{-t} dt}$$

Exercice 220 ★★★

ENS MP 2010

Soient E un espace euclidien et x_1, \dots, x_p des vecteurs de E . Pour $x \in E$, on pose $f(x) = \sum_{i=1}^p \|x - x_i\|^2$. Montrer que f atteint son minimum en un unique point que l'on précisera.

Exercice 221 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

Pour $n \in \mathbb{N}$, on pose $A_n = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} t^n e^{-t^2} dt$. On rappelle que $A_0 = 1$. Pour tous $P, Q \in \mathbb{R}[X]$, on pose $\langle P, Q \rangle = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} P(t)Q(t)e^{-t^2} dt$.

1. Vérifier que $\langle \cdot, \cdot \rangle$ est un produit scalaire sur $\mathbb{R}[X]$.
2. Calculer A_n en distinguant deux cas selon la parité de n .
3. Trouver une base orthonormée de $\mathbb{R}_2[X]$.
4. Calculer $d(X^3, \mathbb{R}_2[X])$.

Exercice 222 ★★★★★

ENS MP 2010

Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Déterminer toutes les matrices de $O_n(\mathbb{R})$ laissant stable $(\mathbb{R}_+)^n$.

Exercice 223 ★★

Petites Mines 2009

Soit u une isométrie vectorielle d'un espace euclidien E . On pose $v = \text{Id}_E - u$. Montrer que $\text{Im } v$ et $\text{Ker } v$ sont orthogonaux et supplémentaires.

Exercice 224 ★★

Mines MP 2011

Soient E un espace euclidien de dimension 3 ainsi que deux éléments f et g de $\text{SO}(E)$ tels que $f \circ g = g \circ f$.
Montrer que f et g sont soit deux rotations de même axe soit des symétries par rapport à des droites orthogonales entre elles.

Exercice 225 ★★

Banque Mines-Ponts MP 2018

Soit f une isométrie vectorielle d'un espace euclidien E .

1. Montrer que $\text{Ker}(f - \text{Id}_E) = \text{Im}(f - \text{Id}_E)^\perp$.
2. En déduire que $(f - \text{Id}_E)^2 = 0 \implies f = \text{Id}_E$.

Exercice 226 ★★★★★

Banque Mines-Ponts MP 2018

Soit n un entier naturel supérieur ou égal à 2. Soit \mathcal{E} l'ensemble des matrices $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telles que $A^T = A^2 + A - I_n$.

On appelle a l'endomorphisme de \mathbb{R}^n canoniquement associé à A .

1. Décrire a si A est symétrique, avec $A \in \mathcal{E}$.
2. Décrire a si on ne suppose plus A symétrique, avec $A \in \mathcal{E}$.

Exercice 227 ★★★

CCINP (ou CCP) MP 2021

Soit E un espace euclidien de dimension n et u un endomorphisme de E vérifiant :

$$\forall x \in E, \langle u(x), x \rangle = 0$$

1. Montrer que la matrice de u dans une base orthonormale de E est antisymétrique.
2. Montrer que $(\text{Ker } u)^\perp$ est stable par u .
3. Montrer qu'il existe une base orthonormale de E dans laquelle la matrice de u est de la forme $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & N \end{pmatrix}$ avec N inversible.
4. Montrer que le rang de u est pair.

Exercice 228 ★★★

Mines-Ponts MP 2016

Soit E un espace euclidien de dimension finie. On considère des vecteurs unitaires a et b de E formant une famille libre.

Réduire l'endomorphisme

$$\phi : \begin{cases} E & \longrightarrow E \\ x & \longmapsto \langle a, x \rangle a + \langle b, x \rangle b \end{cases}$$

Exercice 229 ★★

CCP MP 2016

Soit (u_1, \dots, u_n) une base de E . On pose $f(x) = \sum_{k=1}^n \langle x, u_k \rangle u_k$ pour $x \in E$.

1. Montrer que f est un endomorphisme auto-adjoint défini positif.
2. Montrer qu'il existe $g \in \mathcal{L}(E)$ auto-adjoint, défini positif telle que $g^2 = f^{-1}$.
3. Montrer que $(g(u_1), \dots, g(u_n))$ est une base orthonormale de E .

Exercice 230

Soit E un espace euclidien.

1. Soit $u \in \mathcal{S}(E)$. Montrer que $\text{Ker}(u)^\perp = \text{Im}(u)$.
2. Soit $u \in \mathcal{S}^+(E)$. Montrer que pour tout $x \in E$, $\langle u(x), x \rangle = 0 \iff u(x) = 0_E$.
3. Soit $(u, v) \in \mathcal{S}^+(E)^2$.
 - a. Montrer que $u + v \in \mathcal{S}^+(E)$.
 - b. Montrer que $\text{Ker}(u + v) = \text{Ker}(u) \cap \text{Ker}(v)$.
 - c. Montrer que $\text{Im}(u + v) = \text{Im}(u) + \text{Im}(v)$.

Exercice 231 ★★★

Soit E un espace euclidien.

1. Soit u un endomorphisme auto-adjoint de E . Montrer que $v = \exp(u)$ est un auto-morphisme auto-adjoint défini positif de E .
2. Soit v un endomorphisme auto-adjoint défini positif de E . Montrer qu'il existe un endomorphisme auto-adjoint de E tel que $v = \exp(u)$. Cet endomorphisme u est-il unique ?

Exercice 232 ★★★

Centrale-Supélec MP 2023

Soit $(E, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ un espace euclidien et $s \in \mathcal{L}(E)$.

1. Établir l'identité de polarisation.
2. Montrer l'équivalence entre les deux propriétés suivantes :
 - a. $\exists c \in \mathbb{R}, \forall (x, y) \in E^2, \langle s(x), s(y) \rangle = c \langle x, y \rangle$.
 - b. $\forall (x, y) \in E^2, \langle x, y \rangle = 0 \implies \langle s(x), s(y) \rangle = 0$.
3. Trouver les $u \in \mathcal{L}(E)$ tels que : pour tout sous-espace V de E , $u(V^\perp) \subset u(V)^\perp$.

Exercice 233 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2023

On considère un espace euclidien E dont le produit scalaire est noté, pour tous vecteurs x et y de E : $\langle x|y \rangle$. On fixe deux vecteurs non nuls u et v de E .

1. Pour tout vecteur x de E , on pose : $(u \otimes v)(x) = \langle v|x \rangle u$.
 - a. Justifier que $u \otimes v$ est linéaire et donner son rang.
 - b. Déterminer les éléments propres de $u \otimes v$.
 - c. L'endomorphisme $u \otimes v$ est-il diagonalisable ?
2. Calculer $(u \otimes v)^2 = (u \otimes v) \circ (u \otimes v)$ et retrouver le résultat de la question 1.c.
3. Soit g un endomorphisme de E . On note g^* son adjoint. Montrer que g commute avec $u \otimes v$ si et seulement si il existe un réel α tel que : $g(u) = \alpha u$ et $g^*(v) = \alpha v$.

Calcul différentiel

Exercice 234 ★★★★★

Banque Mines-Ponts MP 2019

On note $E = \mathcal{C}^\infty(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$ et E^* son dual.
On définit

$$D = \{\varphi \in E^*, \forall (f, g) \in E^2, \varphi(fg) = f(0)\varphi(g) + g(0)\varphi(f)\}$$

1. Montrer que D est un sous-espace vectoriel de E^* non réduit à 0.
2. Montrer que l'application $a \in \mathbb{R}^n \mapsto (f \in E \mapsto df(0) \cdot a)$ est injective.
3. Donner une base de D .
Indication : On pourra utiliser la relation fondamentale de l'analyse pour $t \in \mathbb{R} \mapsto f(tx)$.

Exercice 235 ★★★

Banque Mines-Ponts MP 2018

Soit $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ différentiable, telle que $df(x)$ soit injective pour tout $x \in \mathbb{R}^n$, et vérifiant $\|f(x)\| \xrightarrow{\|x\| \rightarrow +\infty} +\infty$, où $\|\cdot\|$ est la norme associée au produit scalaire canonique sur \mathbb{R}^n .

Le but de cet exercice est de montrer que f est surjective. On pose pour cela $g: x \rightarrow \|f(x) - a\|^2$ où $a \in \mathbb{R}^n$.

1. Justifier que g est différentiable sur \mathbb{R}^n et calculer $dg(x)$ pour tout $x \in \mathbb{R}^n$.
2. Montrer que g admet un minimum sur \mathbb{R}^n .
3. Conclure.

Exercice 236 ★★★

CCINP (ou CCP) MP 2023

$\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est muni d'une norme sous-multiplicative $\|\cdot\|$, c'est-à-dire que

$$\forall (A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})^2, \|AB\| \leq \|A\|\|B\|$$

1. Soit $H \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telle que $\|H\| < 1$. Montrer que $I_n - H$ est inversible, d'inverse $\sum_{n=0}^{\infty} H^n$.
2. Montrer que $GL_n(\mathbb{R})$ est ouvert dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.
3. Soit $f: M \in GL_n(\mathbb{R}) \mapsto M^{-1}$.
 - a. Montrer que f est différentiable en I_n et que $df(I_n)(H) = -H$.
 - b. Montrer que f est différentiable en tout point de $GL_n(\mathbb{R})$. On remarquera que $(M + H)^{-1} = (M(I_n + M^{-1}H))^{-1}$.

Exercice 237 ★★

CCINP (ou CCP) MP 2018

Soit E un espace euclidien de dimension $n \in \mathbb{N}^*$. On considère un endomorphisme auto-adjoint f de E dont toutes les valeurs propres sont strictement positives.

1. Montrer que : $\forall h \in E \setminus \{0_E\}, (f(h) | h) > 0$.
2. Soient $u \in E$ fixé et $g: x \mapsto \frac{1}{2}(f(x) | x) - (u | x)$.
 - a. Montrer que g est différentiable sur E et calculer sa différentielle en tout point de E .
 - b. Montrer qu'il existe un unique vecteur $z_0 \in E$ point critique de g .
 - c. Montrer que g admet un minimum global en z_0 .

Exercice 238 ★★

CCP PSI 2015

On considère les ensembles

$$K = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2, 0 \leq x \leq 1 \text{ et } 0 \leq y \leq 1\}$$

et

$$T = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2, 0 < x < y < 1\}$$

ainsi que la fonction F définie sur K par

$$F(x, y) = \begin{cases} x(1-y) & \text{si } 0 \leq x \leq y \leq 1 \\ y(1-x) & \text{si } 0 \leq y \leq x \leq 1 \end{cases}$$

1. La fonction F admet-elle des extrema locaux sur T ?
2. La fonction F admet-elle un minimum sur K ? un maximum sur K . Si oui, déterminer leurs valeurs.

Exercice 239 ★★★

Mines-Ponts MP 2018

Soit E un espace euclidien, que l'on munit de sa norme euclidienne, et $f : E \rightarrow E$ différentiable, telle que pour tout $x \in \mathbb{R}^2$, $df(x)$ soit injective, et vérifiant $\lim_{\|x\| \rightarrow +\infty} \|f(x)\| = +\infty$. Le but de cet exercice est de montrer que f est surjective. On pose pour cela $g : x \in E \mapsto \|f(x) - a\|^2$ où $a \in E$.

1. Pour $x \in E$, calculer $dg(x)$.
2. Montrer que g admet un minimum sur E .
3. Conclure.

Exercice 240 ★★

Soit $f : (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mapsto xy$. Déterminer le minimum et le maximum éventuels de f sur $S = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2, x^2 + y^2 = 1\}$.

Exercice 241 ★★

Etudier les extrema globaux de $f : (x, y) \mapsto 2x - y$ sous la contrainte $g(x, y) = x^2 + xy + y^2 - 1 = 0$.

Exercice 242 ★★

CCINP (ou CCP) PSI 2019

Soit la fonction $f : \begin{cases} \mathbb{R}^2 \longrightarrow \mathbb{R} \\ (x, y) \longmapsto \begin{cases} \frac{x^3 - y^3}{x^2 + y^2} & \text{si } (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & \text{si } (x, y) = (0, 0) \end{cases} \end{cases}$.

1. f est-elle continue sur \mathbb{R}^2 ?
2. f est-elle de classe \mathcal{C}^1 sur \mathbb{R}^2 ?
3. Étudier l'existence de dérivées partielles secondes de f en $(0, 0)$.

Exercice 243 ★★★

CCINP (ou CCP) MP 2023

Soit $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 telle que $f(0, 0) = 0$ et

$$\forall (x, y) \in \mathbb{R}^2, \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) > \left| \frac{\partial f}{\partial x}(x, y) \right|$$

On pose $u : x \mapsto f(x, x)$, $v : x \mapsto f(x, -x)$ et $w_x : y \mapsto f(x, y)$.

1. Calculer les dérivées de u , v et w_x .
2. Montrer que pour tout $x \in \mathbb{R}$, il existe un unique $y_x \in \mathbb{R}$ tel que $|y_x| \leq |x|$ et $w_x(y_x) = 0$.
3. On pose $\varphi : x \mapsto y_x$. On suppose que φ est dérivable. Exprimer $\varphi'(x)$ en fonction des dérivées partielles de f en $(x, \varphi(x))$. Montrer que φ est de classe \mathcal{C}^1 .

Exercice 244 ★★

Résoudre l'équation aux dérivées partielles (E) : $\frac{\partial f}{\partial x} + x \frac{\partial f}{\partial y} = x + y$ d'inconnue $f \in \mathcal{C}^1(\mathbb{R}^2, \mathbb{R})$ en effectuant le changement de variable $\begin{cases} x = u \\ y = \frac{u^2}{2} + v \end{cases}$.

Déterminer la solution vérifiant $f(0, y) = y$ pour tout $y \in \mathbb{R}$.