

TD d'optimisation
ENSAE
1A

Gabriel Romon

Version du 8 avril 2017 à 23:12

1. Différentielle

Exercice 1.1

Soit $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \mapsto \frac{x^3 y^3}{x^2 + y^2}$ si $(x, y) \neq (0, 0)$ et $f(0, 0) = 0$.

1. Montrer que f est C^1 .
2. Montrer que f est C^2 .

1. Les dérivées partielles de f en $(x, y) \neq (0, 0)$ sont clairement définies et données par $\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) = \frac{x^2 y^3 (x^2 + 3y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$ et $\frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = \frac{x^3 y^2 (3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$. Comme pour tout $h \in \mathbb{R}, f(0, h) = f(h, 0) = f(0, 0) = 0$, les dérivées partielles de f existent en $(0, 0)$ avec $\frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) = \frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) = 0$.

$(x, y) \mapsto \frac{\partial f}{\partial x}(x, y)$ et $(x, y) \mapsto \frac{\partial f}{\partial y}(x, y)$ sont clairement continues en tout $(x, y) \neq (0, 0)$. Montrons que ces deux fonctions sont continues en $(0, 0)$.

Pour $(x, y) \in \mathbb{R}^2$, si $x = 0$ ou $y = 0$, $\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) = \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = 0$. Dans la suite on supposera donc sans perte de généralité que $x \neq 0$ et $y \neq 0$.

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x}(x, y) \right| = \left| \frac{x^2 y^3 (x^2 + 3y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \right| \leq \frac{|y|^3 x^4}{(x^2 + y^2)^2} + 3 \frac{|y|^5 x^2}{(x^2 + y^2)^2} \leq |y|^3 + 3|y|x^2 \xrightarrow{(x, y) \rightarrow (0, 0)} 0$$

$$\left| \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) \right| \leq |x|^3 + 3|x|y^2 \xrightarrow{(x, y) \rightarrow (0, 0)} 0 \text{ par symétrie.}$$

f admet donc des dérivées partielles qui sont définies et continues en tout point de \mathbb{R}^2 . f est donc C^1 .

2. $(x, y) \mapsto \frac{\partial f}{\partial x}(x, y)$ et $(x, y) \mapsto \frac{\partial f}{\partial y}(x, y)$ admettent clairement des dérivées partielles en tout $(x, y) \neq (0, 0)$ données par

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x, y) = -\frac{2xy^5(x^2 - 3y^2)}{(x^2 + y^2)^3}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial yx}(x, y) = \frac{x^2 y^2(3x^4 + 14x^2 y^2 + 3y^4)}{(x^2 + y^2)^3}$$

et par symétrie

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(x, y) = \frac{2x^5 y(3x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^3}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial xy}(x, y) = \frac{x^2 y^2(3x^4 + 14x^2 y^2 + 3y^4)}{(x^2 + y^2)^3}$$

Comme pour tout $h \in \mathbb{R}$,

$$\frac{\partial f}{\partial x}(0, h) = \frac{\partial f}{\partial x}(h, 0) = \frac{\partial f}{\partial y}(0, h) = \frac{\partial f}{\partial y}(h, 0) = \frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) = \frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) = 0$$

1.. DIFFÉRENTIELLE

les dérivées partielles de $\frac{\partial f}{\partial x}$ et $\frac{\partial f}{\partial y}$ existent en $(0, 0)$ avec

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(0, 0) = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(0, 0) = \frac{\partial^2 f}{\partial xy}(0, 0) = \frac{\partial^2 f}{\partial yx}(x, y) = 0$$

Les quatre dérivées partielles sont clairement continues en tout $(x, y) \neq (0, 0)$. Montrons qu'elles sont continues en $(0, 0)$.

Soit $(x, y) \in \mathbb{R}^2$. Comme précédemment on peut supposer que $x \neq 0$ et $y \neq 0$.

Lemme : $\forall (x, y) \in \mathbb{R}^2, |xy| \leq \|(x, y)\|_2^2$

Preuve : Conséquence de l'inégalité $ab \leq \frac{a^2+b^2}{2}$ avec $a = |x|$ et $b = |y|$.

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x, y) \right| &= \left| \frac{2xy^5(x^2 - 3y^2)}{(x^2 + y^2)^3} \right| \leq \frac{2|x|^3|y|^5}{(x^2 + y^2)^3} + \frac{6|x||y|^7}{(x^2 + y^2)^3} \\ &= \frac{2y^2(|xy|)^3}{\|(x, y)\|_2^6} + \frac{6|x||y|^7}{(x^2 + y^2)^3} \\ &\leq \underbrace{\frac{2y^2\|(x, y)\|_2^6}{\|(x, y)\|_2^6}}_{\text{Lemme}} + 6|x||y| \\ &= 2y^2 + 6|x||y| \xrightarrow{(x, y) \rightarrow (0, 0)} 0 \end{aligned}$$

La symétrie permet de conclure $\left| \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x, y) \right| \leq 2x^2 + 6|x||y| \xrightarrow{(x, y) \rightarrow (0, 0)} 0$

et une technique similaire donne

$$\left| \frac{\partial^2 f}{\partial yx}(x, y) \right| \leq 3y^2 + 14\|(x, y)\|_2^2 + 3x^2 \xrightarrow{(x, y) \rightarrow (0, 0)} 0$$

$\frac{\partial f}{\partial x}$ et $\frac{\partial f}{\partial y}$ admettent des dérivées partielles qui sont définies et continues en tout point de \mathbb{R}^2 . Donc f est C^2 .

Exercice 1.2

Soit $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \mapsto (x^2 + y^2)^x$ si $(x, y) \neq (0, 0)$.
Montrer que f est différentiable sur $\mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\}$.

f admet clairement des dérivées partielles en tout $(x, y) \neq (0, 0)$ données par $\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) = (x^2 + y^2)^x \left(\frac{2x^2}{x^2 + y^2} + \log(x^2 + y^2) \right)$ et $\frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = 2xy(x^2 + y^2)^{x-1}$. Par composition et multiplication de fonction continues, ces dérivées partielles sont continues en tout $(x, y) \neq (0, 0)$.

f est donc différentiable en tout $(x, y) \neq (0, 0)$ et son gradient en (x, y) est

$$\left((x^2 + y^2)^x \left(\frac{2x^2}{x^2 + y^2} + \log(x^2 + y^2) \right), 2xy(x^2 + y^2)^{x-1} \right)$$

Exercice 1.3

Soit $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, (x, y) \mapsto (x + y, xy)$. Calculer la différentielle de f .

Pour $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ fixé et $(h_1, h_2) \in \mathbb{R}^2$,

$$f((x, y) + (h_1, h_2)) = f(x + h_1, y + h_2) = f(x, y) + \begin{pmatrix} h_1 + h_2 \\ yh_1 + xh_2 \end{pmatrix}^T + \begin{pmatrix} 0 \\ h_1h_2 \end{pmatrix}^T$$

Le candidat pour la différentielle de f en (x, y) est donc $(h_1, h_2) \mapsto \left[\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ y & x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} \right]^T$.

Il suffit de prouver que $\frac{\|(0, h_1h_2)\|}{\|(h_1, h_2)\|} \xrightarrow{\|(h_1, h_2)\| \rightarrow 0} 0$

Le choix de la norme n'importe pas étant donné l'équivalence des normes en dimension finie. On choisit par exemple la norme 2.

$$\frac{\|(0, h_1h_2)\|}{\|(h_1, h_2)\|} = \frac{|h_1h_2|}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2}} \leq |h_1| \rightarrow 0$$

en minorant trivialement le dénominateur par $\sqrt{h_2^2}$.

Exercice 1.4

Soit $f : M_n(\mathbb{R}) \rightarrow M_n(\mathbb{R}), X \mapsto X^T X$. Calculer la différentielle de f .

Pour $X \in M_n(\mathbb{R})$ et $H \in M_n(\mathbb{R})$, $f(X + H) = f(X) + X^T H + H^T X + H^T H$.

Le candidat pour la différentielle de f en X est donc $H \mapsto X^T H + H^T X$.

Il suffit de prouver que $\frac{\|H^T H\|}{\|H\|} \xrightarrow{\|H\| \rightarrow 0} 0$.

Par équivalence des normes en dimension finie, on choisit n'importe quelle norme d'opérateur sur $M_n(\mathbb{R})$ (celle qui dérive de la norme 2 par exemple). Alors

$\frac{\|H^T H\|}{\|H\|} \leq \frac{\|H^T\| \|H\|}{\|H\|} = \|H^T\|$. La transposée étant linéaire, elle est continue en 0, donc $\|H^T\| \xrightarrow{\|H\| \rightarrow 0} 0$ ce qui achève la preuve.

Exercice 1.5

Soient $f, g \in C^1(\mathbb{R}^2, \mathbb{R})$ et $\varphi : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2, (x, y, z) \mapsto (f(x^2y, z^2x), g(x^y, zx))$.
Calculer, si elle existe, la différentielle de f .

Posons $\gamma : (x, y, z) \mapsto (x^2y, z^2x)$ et $\delta : (x, y, z) \mapsto (x^y, zx)$.

γ et f sont différentiables en tous points de leurs domaines, donc $f \circ \gamma$ est différentiable en tout point de \mathbb{R}^3 avec

$$d(f \circ \gamma)(x, y, z) = df(\gamma(x, y, z)) \circ d\gamma(x, y, z)$$

On calcule $\text{Jac}(\gamma)(x, y, z) = \begin{pmatrix} 2xy & x^2 & 0 \\ z^2 & 0 & 2zx \end{pmatrix}$. En passant des applications linéaires aux matrices,

$$\begin{aligned} \text{Jac}(f \circ \gamma)(x, y, z) &= \text{Jac}(f)(x^2y, z^2x) \cdot \text{Jac}(\gamma)(x, y, z) \\ &= \text{Jac}(f)(x^2y, z^2x) \cdot \begin{pmatrix} 2xy & x^2 & 0 \\ z^2 & 0 & 2zx \end{pmatrix} \end{aligned}$$

δ est définie et différentiable en (x, y, z) dès lors que $x > 0$. On calcule de même $\text{Jac}(\delta)(x, y, z) = \begin{pmatrix} yx^{y-1} & x^y \ln x & 0 \\ z & 0 & x \end{pmatrix}$ de sorte que pour tout (x, y, z) avec $x > 0$,

$$\text{Jac}(g \circ \delta)(x, y, z) = \text{Jac}(g)(x^y, zx) \cdot \begin{pmatrix} yx^{y-1} & x^y \ln x & 0 \\ z & 0 & x \end{pmatrix}$$

La différentielle de $f \circ \gamma$ en (x, y, z) est donc

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix}^T \mapsto \left[\text{Jac}(f)(x^2y, z^2x) \cdot \begin{pmatrix} 2xy & x^2 & 0 \\ z^2 & 0 & 2zx \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} \right]^T$$

et celle de $g \circ \delta$ en (x, y, z) avec $x > 0$

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix}^T \mapsto \left[\text{Jac}(g)(x^y, zx) \cdot \begin{pmatrix} yx^{y-1} & x^y \ln x & 0 \\ z & 0 & x \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} \right]^T$$

Soit (x, y, z) fixé avec $x > 0$ et $h = (h_1, h_2, h_3)$

$$\begin{aligned} \varphi \left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} \right) &= \left(f \circ \gamma \left(\begin{pmatrix} x+h_1 \\ y+h_2 \\ z+h_3 \end{pmatrix} \right), g \circ \delta \left(\begin{pmatrix} x+h_1 \\ y+h_2 \\ z+h_3 \end{pmatrix} \right) \right) \\ &= (f \circ \gamma((x, y, z)) + d(f \circ \gamma)(x, y, z)(h_1, h_2, h_3) + \|h\| \varepsilon_1(\|h\|), \\ &\quad g \circ \delta((x, y, z)) + d(g \circ \delta)(x, y, z)(h_1, h_2, h_3) + \|h\| \varepsilon_2(\|h\|)) \end{aligned}$$

où ε_1 et ε_2 sont des fonctions telles que $\varepsilon_1(\|h\|) \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} 0$ et $\varepsilon_2(\|h\|) \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} 0$

$$\begin{aligned} &= \varphi((x, y, z)) + (d(f \circ \gamma)(x, y, z)(h_1, h_2, h_3), d(g \circ \delta)(x, y, z)(h_1, h_2, h_3)) \\ &\quad + \|h\| \underbrace{(\varepsilon_1(\|h\|), \varepsilon_2(\|h\|))}_{\xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} 0} \end{aligned}$$

La différentielle de φ en (x, y, z) est donc

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix}^T \mapsto \left(\left[\text{Jac}(f)(x^2y, z^2x) \cdot \begin{pmatrix} 2xy & x^2 & 0 \\ z^2 & 0 & 2zx \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} \right]^T, \left[\text{Jac}(g)(x^y, zx) \cdot \begin{pmatrix} yx^{y-1} & x^y \ln x & 0 \\ z & 0 & x \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} \right]^T \right)$$

Exercice 1.6

Soit $E = C^0([a, b], \mathbb{R})$ muni de la norme infinie $\|\cdot\|$ et $\varphi : E \rightarrow E, f \mapsto f^3$.
Montrer que φ est différentiable.

On n'est plus dans le cadre des espaces de dimension finie et la notion de différentielle est celle de Fréchet.

Pour $f \in E$ et $h \in E$, $\varphi(f+h) = \varphi(f) + 3f^2h + 3fh^2 + h^3$.

Le candidat pour la différentielle de φ en f est donc $h \mapsto 3f^2h$.

Il suffit de prouver que $h \mapsto 3f^2h$ est continue en 0 et que $\frac{\|3fh^2+h^3\|}{\|h\|} \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} 0$.

Lemme : Pour $f, g \in E$, $\|fg\| \leq \|f\|\|g\|$.

Preuve : Par continuité de $|fg|$ sur $[a, b]$, il existe $c \in [a, b]$ tel que

$$\|fg\| = |f(c)g(c)| \leq |f(c)|\|g\| \leq \|f\|\|g\|$$

D'après le lemme, $\|3f^2h\| \leq 3\|f^2\|\|h\|$ ce qui prouve la continuité en 0.

On a $\frac{\|3fh^2+h^3\|}{\|h\|} \leq 3\frac{\|fh^2\|}{\|h\|} + \frac{\|h^3\|}{\|h\|}$.

Le lemme donne $\frac{\|3fh^2+h^3\|}{\|h\|} \leq 3\|f\|\|h\| + \|h\| \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} 0$.

Exercice 1.7

Soit $E = C^0([0, 1], \mathbb{R})$ muni de la norme infinie $\|\cdot\|$ et $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ deux fois dérivable avec g'' bornée par $M \geq 0$.

Soit $I : E \rightarrow \mathbb{R}, f \mapsto \int_0^1 (g \circ f)(t) dt$

1. Montrer que I est différentiable et calculer sa différentielle.
2. Montrer que I est C^1 .
3. Qu'en est-il si g est seulement C^1 ?

1. Pour $f \in E$ fixé et $h \in E$, $t \in [0, 1]$, la formule de Taylor-Lagrange donne

$$g(f(t) + h(t)) = g(f(t)) + h(t)g'(f(t)) + \frac{h(t)^2}{2}g''(\xi_{h,t})$$

où $\xi_t \in \mathbb{R}$ de sorte que $t \mapsto \frac{h(t)^2}{2}g''(\xi_{h,t})$ est continue sur $[0, 1]$ et

$$I(f+h) = I(f) + \int_0^1 h(t)g'(f(t))dt + \int_0^1 \frac{h(t)^2}{2}g''(\xi_{h,t})dt$$

Le candidat pour la différentielle de I en f est $h \mapsto \int_0^1 h(t)g'(f(t))dt$.

Il suffit de prouver que $h \mapsto \int_0^1 h(t)g'(f(t))dt$ est continue en 0 et

$$\frac{\left| \int_0^1 \frac{h(t)^2}{2}g''(\xi_{h,t})dt \right|}{\|h\|} \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} 0$$

On a $\left| \int_0^1 h(t)g'(f(t))dt \right| \leq \|h\| \underbrace{\int_0^1 |g'(f(t))|dt}_{\text{indépendant de } h}$ ce qui prouve la continuité en 0.

Comme $\left| \frac{h(t)^2}{2} g''(\xi_{h,t}) \right| \leq \frac{M}{2} h(t)^2$,

$$\frac{\left| \int_0^1 \frac{h(t)^2}{2} g''(\xi_{h,t}) dt \right|}{\|h\|} \leq \frac{M}{2} \frac{\int_0^1 h(t)^2 dt}{\|h\|} \leq \frac{M}{2} \frac{\|h\|^2}{\|h\|} = \frac{M}{2} \|h\| \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} 0$$

2. Sur $\mathcal{L}_c(E, \mathbb{R})$ on institue la norme d'opérateur $\|\cdot\|_{op}$ dérivant de la norme infinie.

Il s'agit de montrer la continuité de $\varphi : \begin{cases} E & \longrightarrow \mathcal{L}_c(E, \mathbb{R}) \\ f & \longmapsto \begin{cases} E & \longrightarrow \mathbb{R} \\ h & \longmapsto \int_0^1 h(t)g'(f(t))dt \end{cases} \end{cases}$

Soit $f_0 \in E$ et $h \in E$. On a

$$\begin{aligned} |\varphi(f)(h) - \varphi(f_0)(h)| &= \left| \int_0^1 h(t)(g'(f(t)) - g'(f_0(t))) dt \right| \\ &\leq \int_0^1 |h(t)| M |f(t) - f_0(t)| dt \quad g'' \text{ est bornée par } M \text{ donc } g' \text{ est } M\text{-lipschitzienne} \\ &\leq M \|f - f_0\| \int_0^1 |h(t)| dt \\ &\leq M \|f - f_0\| \|h\| \end{aligned}$$

Donc $\frac{|\varphi(f)(h) - \varphi(f_0)(h)|}{\|h\|}$ est bornée par $M\|f - f_0\|$, d'où

$$\|\varphi(f) - \varphi(f_0)\|_{op} = \sup_h \frac{|\varphi(f)(h) - \varphi(f_0)(h)|}{\|h\|} \leq M\|f - f_0\|$$

Soit $\varepsilon > 0$. Avec $\delta := \frac{\varepsilon}{M}$, $\|f - f_0\| \leq \delta \implies \|\varphi(f) - \varphi(f_0)\|_{op} \leq \varepsilon$ ce qui prouve la continuité de φ en f_0 .

3. Mon intuition me laisse penser que si g est deux fois dérivable sans être bornée (donc C^1), I n'est pas forcément différentiable. Obtenir un contre-exemple n'est pas évident, car I est tout de même continue (par uniforme continuité de g sur un compact).

Exercice 1.8

Soient E et F des evn avec F complet. Soit $D \subset E$ un ouvert.

On pose $B^2 = \{f : D \rightarrow F / f \text{ } C^2, f \text{ bornée, } df \text{ bornée, et } d^2f \text{ bornée}\}$ et

$$\|f\| = \sup_{x \in D} (\|f(x)\| + \|df(x)\| + \|d^2f(x)\|)$$

Montrer que B^2 est complet.

On trouvera une présentation de l'intégrale des fonctions à valeurs dans un espace de Banach à l'adresse
http://www.math.ucsd.edu/~bdriver/231-02-03/Lecture_Notes/chap4.pdf

Etant donné X un ensemble et $(Y, \|\cdot\|_Y)$ un evn, on note $B(X, Y)$ l'ensemble des fonctions bornées de X dans Y . On rappelle que si Y est complet, alors $B(X, Y)$ est complet pour la norme $\|\cdot\|_{\infty, Y}$ définie par $\|f\|_{\infty, Y} = \sup_{x \in X} \|f(x)\|_Y$.

On notera $\|\cdot\|_{op}$ la norme d'opérateur sur $\mathcal{L}_c(E, F)$ qui dérive de $\|\cdot\|_F$. On rappelle que $(\mathcal{L}_c(E, F), \|\cdot\|_{op})$ est un Banach.

On notera $\|\cdot\|_{op'}$ la norme d'opérateur sur $\mathcal{L}_c(E, \mathcal{L}_c(E, F))$ qui dérive de $\|\cdot\|_{op}$, de sorte que $(\mathcal{L}_c(E, \mathcal{L}_c(E, F)), \|\cdot\|_{op'})$ est un Banach.

On rappelle que si $f \in B^2$ et $a \in D$, $df(a) \in \mathcal{L}_c(E, F)$ et $d^2f(a) \in \mathcal{L}_c(E, \mathcal{L}_c(E, F))$. La norme définie dans l'énoncé est donc à prendre au sens suivant :

$$\|f\| = \sup_{x \in D} (\|f(x)\|_F + \|df(x)\|_{op} + \|d^2f(x)\|_{op'})$$

On prouve facilement les faits suivants : pour $f \in B^2$,

$$\begin{aligned} \|f\| &\geq \|f\|_{\infty, F} \\ \|f\| &\geq \|df\|_{\infty, op} \\ \|f\| &\geq \|d^2f\|_{\infty, op'} \end{aligned}$$

Soit (f_n) de Cauchy dans B^2 pour $\|\cdot\|$.

- D'après la remarque précédente, (f_n) est de Cauchy pour $\|\cdot\|_{\infty, F}$ dans $B(D, F)$ qui est complet, donc (f_n) converge pour $\|\cdot\|_{\infty, F}$ vers un $f \in B(D, F)$.
 - D'après la remarque précédente, (df_n) est de Cauchy pour $\|\cdot\|_{\infty, op}$ dans $B(D, \mathcal{L}_c(E, F))$ qui est complet, donc (df_n) converge pour $\|\cdot\|_{\infty, op}$ vers un $\varphi \in B(D, \mathcal{L}_c(E, F))$.
 - En tant que limites uniformes de fonctions continues, f et φ sont continues.
 - Montrons que f est différentiable de différentielle φ .
- Soit $a \in D$. Pour $h \in D$, et n quelconque,

$$f_n(a+h) - f_n(a) = \int_0^1 df_n(a+th)dt$$

La convergence des df_n vers φ étant uniforme, on a en passant à la limite

$$f(a+h) - f(a) = \int_0^1 \varphi(a+th)dt$$

donc

$$\begin{aligned} \frac{\|f(a+h) - f(a) - \varphi(a)(h)\|_F}{\|h\|_E} &= \frac{\|\int_0^1 \varphi(a+th) - \varphi(a)(h) dt\|_F}{\|h\|_E} \\ &\leq \frac{\int_0^1 \|\varphi(a+th) - \varphi(a)\|_{op} \|h\|_E dt}{\|h\|_E} \\ &\leq \int_0^1 \|\varphi(a+th) - \varphi(a)\|_{op} dt \end{aligned}$$

Soit $\varepsilon > 0$. Comme φ est continue on dispose de $\delta > 0$ tel que $\|x\|_F \leq \delta \implies \|\varphi(a+x) - \varphi(a)\|_{op} \leq \varepsilon$. Pour $\|h\| \leq \varepsilon$ et $t \in [0, 1]$ on obtient

$$\|\varphi(a+th) - \varphi(a)\|_{op} \leq \varepsilon$$

donc $\frac{\|f(a+h) - f(a) - \varphi(a)(h)\|_F}{\|h\|_E} \leq \varepsilon$ dès que $\|h\| \leq \delta$.

f est donc différentiable sur D et sa différentielle est φ , qui est continue d'après la remarque précédente.

- Un raisonnement identique en remplaçant f_n par df_n montre que df est différentiable sur D , on note d^2f sa différentielle qui est continue.
- f est donc C^2 , bornée, de différentielles bornées. Il reste à prouver que (f_n) converge vers f pour la norme $\|\cdot\|$.

Etant donné $\varepsilon > 0$, on dispose de N, N', N'' tels que

$$\begin{aligned} \forall x \in D, \quad n \geq N &\implies \|f(x) - f_n(x)\|_F \leq \frac{\varepsilon}{3} \\ n \geq N' &\implies \|df(x) - df_n(x)\|_{op} \leq \frac{\varepsilon}{3} \\ n \geq N'' &\implies \|d^2f(x) - d^2f_n(x)\|_{op'} \leq \frac{\varepsilon}{3} \end{aligned}$$

Pour $n \geq \max(N, N', N'')$,

$$\|f(x) - f_n(x)\|_F + \|df(x) - df_n(x)\|_{op} + \|d^2f(x) - d^2f_n(x)\|_{op'} \leq \varepsilon$$

et ceci pour tout $x \in D$, donc $\|f - f_n\| \leq \varepsilon$. Ceci achève la preuve.

Exercice 1.9

Soit E un \mathbb{R} -evn, $D \subset E$ un ouvert et $f : \overline{D} \rightarrow \mathbb{R}$. On suppose \overline{D} compact, f continue, nulle à la frontière de D et f différentiable sur D .
Montrer qu'il existe $a \in D$ tel que $df(a) = 0$.

f est continue sur le compact \overline{D} donc elle admet un maximum M et un maximum m atteints respectivement en α et $\beta \in \overline{D}$.

Si $m = M = 0$, f est nulle sur D donc pour tout $x \in D$, $df(x) = 0$.

Sinon, $m < 0$ ou $M > 0$. On suppose par exemple $M > 0$. Comme f est nulle sur $\overline{D} \setminus \overset{\circ}{D} = \overline{D} \setminus D$, on a $\beta \in D$. En β , f admet un maximum global (donc local), d'où $df(\beta) = 0$.

Exercice 1.10

Soient $\varphi, \psi \in C^1(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ et $f(x, y, z) = (x + \varphi(yz), y + \psi(\frac{x}{z}))$.
Calculer la différentielle de f .

La démarche est identique à celle de l'exercice 1.5. En posant $f_1 : (x, y, z) \mapsto x + \varphi(yz)$ et $f_2 : (x, y, z) \mapsto y + \psi(\frac{x}{z})$, il suffit de démontrer que f_1 et f_2 sont différentiables en (x, y, z) pour obtenir la différentielle de f en (x, y, z) :

$$df(x, y, z) : (h_1, h_2, h_3) \mapsto (df_1(x, y, z)(h_1, h_2, h_3), df_2(x, y, z)(h_1, h_2, h_3))$$

On calcule

$$\text{Jac}(f_1)(x, y, z) = (1, \varphi'(yz)z, \varphi'(yz)y)$$

et

$$\text{Jac}(f_2)(x, y, z) = \left(\psi\left(\frac{x}{z}\right)\frac{1}{z}, 1, -\psi\left(\frac{x}{z}\right)\frac{x}{z^2} \right)$$

Exercice 1.11

1. Soient E, F, G, H des \mathbb{R} -evn. B est une forme bilinéaire continue de $F \times G$ dans H , $f : E \rightarrow F$ et $g : E \rightarrow G$.
On suppose que f et g sont différentiables en $a \in E$. Montrer que $C : E \rightarrow H, x \mapsto B(f(x), g(x))$ est différentiable en a .
2. Soit E un espace vectoriel euclidien.
 - (a) Montrer que $\varphi : x \mapsto \frac{x}{\|x\|^2}$ est différentiable sur $E \setminus \{0\}$.
 - (b) Déterminer la différentielle de $\psi : x \mapsto \|x\|^2$.
 - (c) Déterminer et interpréter la différentielle de φ .

1. Soit $a \in E$. Pour $h \in E$,

$$\begin{aligned} C(a+h) &= C(a) + B(f(a), dg(a)(h)) + B(df(a)(h), g(a)) \\ &\quad + \\ &\quad B(f(a), \|h\|_{\varepsilon_g}(\|h\|)) + B(df(a)(h), dg(a)(h) + \|h\|_{\varepsilon_g}(\|h\|)) + B(\|h\|_{\varepsilon_f}(\|h\|), g(a+h)) \end{aligned}$$

Le candidat pour la différentielle en a de f est $h \mapsto B(f(a), dg(a)(h)) + B(df(a)(h), g(a))$.
Il suffit de prouver que

$$B(f(a), \|h\|_{\varepsilon_g}(\|h\|)) + B(df(a)(h), dg(a)(h) + \|h\|_{\varepsilon_g}(\|h\|)) + B(\|h\|_{\varepsilon_f}(\|h\|), g(a+h)) = o(\|h\|)$$

B étant bilinéaire continue, il existe $K \geq 0$ tel que

$$\forall x, y \in E, \|B(x, y)\| \leq K\|x\|\|y\|$$

On traite chaque terme de la somme séparément :

- $B(f(a), \|h\|\varepsilon_g(\|h\|)) = \|h\| \underbrace{B(f(a), \varepsilon_g(\|h\|))}_{\rightarrow 0}$
- $\|B(df(a)(h), dg(a)(h))\| \leq K\|df(a)\|_{op}\|df(b)\|_{op}\|h\|^2$
- $B(df(a)(h), \|h\|\varepsilon_g(\|h\|)) = \|h\| \underbrace{B(df(a)(h), \varepsilon_g(\|h\|))}_{\rightarrow 0}$
- $B(\|h\|\varepsilon_f(\|h\|), g(a+h)) = \|h\| \underbrace{B(\varepsilon_f(\|h\|), g(a+h))}_{\rightarrow 0}$

La somme est bien $o(\|h\|)$.

2. a) $(x, y) \mapsto \langle x, y \rangle$ est bilinéaire continue (d'après Cauchy-Schwarz). La question 1. implique que $\psi : x \mapsto \langle x, x \rangle$ est différentiable en tout $a \in E$. La fonction $\delta : x \mapsto \frac{1}{x}$ est différentiable en tout $a \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ donc $\delta \circ \psi$ est différentiable en tout $a \in E \setminus \{0\}$.

$\pi : \mathbb{R} \times E \rightarrow E$, $(\lambda, x) \mapsto \lambda x$ est bilinéaire continue, et d'après 1., $x \mapsto \pi(\delta \circ \psi(x), x)$ est différentiable en tout $x \in E \setminus \{0\}$.

Ceci s'écrit encore $\varphi : x \mapsto \frac{x}{\|x\|^2}$ est différentiable sur $E \setminus \{0\}$.

b) Soit $x \in E$. Pour $h \in E$, $\psi(x+h) = \psi(x) + 2\langle x, h \rangle + \|h\|^2$.
La différentielle de ψ en x est donc $h \mapsto 2\langle x, h \rangle$.

c) D'après 1., la différentielle de φ en $x \neq 0$ est donnée par

$$\begin{aligned} d\varphi(x)(h) &= \pi(\text{Id}(x), d(\delta \circ \psi)(x)(h)) + \pi(d\text{Id}(x)(h), \delta \circ \psi(x)) \\ &= x \cdot d\delta(\psi(x))(d\psi(x)(h)) + \frac{h}{\|x\|^2} \\ &= x \cdot -\frac{2\langle x, h \rangle}{(\|x\|^2)^2} + \frac{h}{\|x\|^2} \\ &= \frac{h}{\|x\|^2} - \frac{2\langle x, h \rangle x}{\|x\|^4} \end{aligned}$$

Exercice 1.12

Déterminer toutes les fonctions $f \in C^2(\mathbb{R}^2, \mathbb{R})$ telles que

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

C'est un classique que l'on trouve dans n'importe quel livre de prépa.

Exercice 1.13

En quels points de \mathbb{R}^2 la fonction $g : (x, y) \mapsto \max(x^2, y)$ est-elle différentiable ? Calculer sa différentielle.

Soit $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ tel que $x^2 > y$. Cette relation reste vérifiée sur un voisinage de (x, y) de sorte que $g(x, y) = x^2$ sur un voisinage de (x, y) . g est donc différentiable en (x, y) de différentielle $(h_1, h_2) \mapsto 2xh_1$.

Soit $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ tel que $x^2 < y$. Cette relation reste vérifiée sur un voisinage de (x, y) de sorte que $g(x, y) = y$ sur un voisinage de (x, y) g est donc différentiable en (x, y) de différentielle $(h_1, h_2) \mapsto h_2$.

En $(0, 0)$: $\frac{g(0, \frac{1}{n}) - g(0, 0)}{\frac{1}{n}} = 1$ et $\frac{g(0, -\frac{1}{n}) - g(0, 0)}{-\frac{1}{n}} = 0$ donc g n'admet pas de dérivée partielle selon y en $(0, 0)$ donc g n'est pas différentiable en $(0, 0)$.

Soit $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ avec $x^2 = y$ et $x \neq 0$.

$$\frac{g(x + \frac{1}{n}, y) - g(x, y)}{\frac{1}{n}} = \frac{(x + \frac{1}{n})^2 - x^2}{\frac{1}{n}} \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 2x$$
$$\frac{g(x - \frac{1}{n}, y) - g(x, y)}{-\frac{1}{n}} = \frac{y - y}{-\frac{1}{n}} = 0 \neq 2x$$

donc g n'admet pas de dérivée partielle selon x en (x, y) donc g n'est pas différentiable en (x, y) .

Exercice 1.14

Soient $n \geq 1$ et $p \geq 1$ des entiers.

On définit $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \mapsto \frac{x^n y^p}{x^2 + y^2}$ si $(x, y) \neq (0, 0)$ et $f(0, 0) = 0$.

Pour quelles valeurs de (n, p) f est-elle différentiable dans \mathbb{R}^2 ?

Quelles que soient les valeurs de n et p , f est différentiable en $(x, y) \neq (0, 0)$ par composition. f admet donc des dérivées partielles données par

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) = \frac{nx^{n-1}y^p}{x^2 + y^2} - \frac{2x^{n+1}y^p}{(x^2 + y^2)^2}$$

et

$$\frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = \frac{px^n y^{p-1}}{x^2 + y^2} - \frac{2x^n y^{p+1}}{(x^2 + y^2)^2}$$

En $(0, 0)$: comme pour tout $h \in \mathbb{R}, f(0, h) = f(h, 0) = f(0, 0) = 0$, les dérivées

1.. DIFFÉRENTIELLE

partielles de f existent en $(0, 0)$ avec $\frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) = \frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) = 0$.

On étudie plusieurs cas selon n et p . Si les dérivées partielles sont continues en $(0, 0)$, f est différentiable en $(0, 0)$. Si ce n'est le pas on ne peut a priori rien dire.

On utilise les mêmes techniques de majoration que dans l'exercice 1.

1. Si $n \geq 4$: OK
2. Si $n = 3$:
 - (a) Si $p \geq 4$: OK par symétrie
 - (b) Si $p = 3$: OK
 - (c) Si $p = 2$: OK
 - (d) Si $p = 1$: OK
3. Si $n = 2$:
 - (a) Si $p \geq 4$: OK par symétrie
 - (b) Si $p = 3$: OK par symétrie
 - (c) Si $p = 2$: OK
 - (d) Si $p = 1$: Pour $t \in \mathbb{R}$ non nul,

$$\frac{f((0, 0) + t(1, 1)) - f((0, 0))}{t} = \frac{1}{2}$$

f admet donc une dérivée directionnelle selon le vecteur $(1, 1)$ qui vaut $\frac{1}{2}$.

Si f était différentiable en $(0, 0)$, son gradient donné par les dérivées partielles serait nul, donc la différentielle en $(0, 0)$ serait aussi nulle, donc toutes les dérivées directionnelles seraient aussi nulles, ce qui n'est pas le cas. f n'est donc pas différentiable en $(0, 0)$.

4. Si $n = 1$:
 - (a) Si $p \geq 4$: OK par symétrie
 - (b) Si $p = 3$: OK par symétrie
 - (c) Si $p = 2$: Non par symétrie
 - (d) Si $p = 1$: $f(0, \frac{1}{n}) = 0$ et $f(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}) = \frac{1}{2}$, donc f n'est pas continue en 0, donc pas différentiable en $(0, 0)$.

Conclusion : f est différentiable en $(0, 0)$ pour tout $n \geq 1$ et $p \geq 1$ exceptés les couples $(n = 2, p = 1)$, $(n = 1, p = 2)$, $(n = 1, p = 1)$.

Exercice 1.15

Soit B dans $M_n(\mathbb{R})$.

Donner la différentielle de $\varphi : GL_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}, A \mapsto \text{Tr}(A^{-1}B)$

On choisit une norme d'opérateur $\|\cdot\|$ sur $M_n(\mathbb{R})$. On rappelle que $GL_n(\mathbb{R})$ est ouvert.

Soit $A \in GL_n(\mathbb{R})$. On considère $V \subset GL_n(\mathbb{R})$ un voisinage de A tel que pour tout $X \in V$, $\|A^{-1}(X - A)\| < 1$. Calculons la différentielle de la fonction $M \rightarrow M^{-1}$ en A .

Il existe $\delta > 0$ tel que pour tout $H \in M_n(\mathbb{R})$, $\|H\| \leq \delta \implies A + H \in V$.

Pour $\|H\| \leq \delta$, $(A + H)^{-1} = (I_n + A^{-1}H)^{-1}A^{-1}$.

Démontrons que $(I_n + A^{-1}H)^{-1} = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k (A^{-1}H)^k$. Comme $\|H\| \leq \delta$, $\|A^{-1}H\| < 1$ donc la série en question est absolument convergente, donc convergente. On a pour $N \geq 1$,

$$(I_n + A^{-1}H) \sum_{k=0}^N (-1)^k (A^{-1}H)^k = (-1)^N \underbrace{(A^{-1}H)^{N+1}}_{\xrightarrow{N \rightarrow \infty} 0} + I_n$$

En passant à la limite sur N on a l'égalité voulue.

Par conséquent

$$(A+H)^{-1} = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k (A^{-1}H)^k A^{-1} = A^{-1} - A^{-1}HA^{-1} + \sum_{k=2}^{\infty} (-1)^k (A^{-1}H)^k A^{-1}$$

La candidat pour la différentielle de l'inverse en A est donc $H \mapsto -A^{-1}HA^{-1}$.

Il reste à remarquer que

$$\frac{\|\sum_{k=2}^{\infty} (-1)^k (A^{-1}H)^k A^{-1}\|}{\|H\|} \leq \frac{\|A^{-1}\|^2}{1 - \|A^{-1}H\|} \|H\| \rightarrow 0$$

La fonction $A \mapsto \text{Tr}(AB)$ étant linéaire, la différentielle de φ en A est donnée par $H \mapsto -\text{Tr}(A^{-1}HA^{-1}B)$

Exercice 1.16

Soit $\varphi : \mathbb{R} \rightarrow GL_n(\mathbb{R})$, $x \mapsto A(x)$
Calculer la différentielle de $x \mapsto \ln \det A(x)$

Il est classique (cf Gourdon Analyse ou Cassini Algèbre 2) que la différentielle du déterminant en A est donnée par $H \mapsto \text{Tr}((\text{com } A)^T H)$ qui devient $H \mapsto \det A \text{Tr}(A^{-1}H)$ lorsque A est inversible.

Pour $a \in \mathbb{R}$ et $h \in \mathbb{R}$,

$$\begin{aligned}
 d(\ln \circ \det \circ A)(a)(h) &= d(\ln \circ \det)(A(a))(dA(a)(h)) \\
 &= h \cdot d(\ln \circ \det)(A(a))(dA(a)(1)) \\
 &= h \cdot d(\ln \circ \det)(A(a))\left(\frac{dA}{dx}(a)\right) \\
 &= h \cdot d \ln(\det A(a)) \left(d \det(A(a))\left(\frac{dA}{dx}(a)\right) \right) \\
 &= h \cdot d \ln(\det A(a)) \left(\det A(a) \operatorname{Tr} \left(A(a)^{-1} \frac{dA}{dx}(a) \right) \right) \\
 &= h \det A(a) \operatorname{Tr} \left(A(a)^{-1} \frac{dA}{dx}(a) \right) d \ln(\det A(a))(1) \\
 &= h \operatorname{Tr} \left(A(a)^{-1} \frac{dA}{dx}(a) \right)
 \end{aligned}$$

La différentielle cherchée en a est donc $h \mapsto h \operatorname{Tr} \left(A(a)^{-1} \frac{dA}{dx}(a) \right)$

Exercice 1.17

Soient f et g deux fonctions $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ dérivables en 1. Montrer que $\varphi : (x, y) \mapsto f(xy) + g(\frac{x}{y})$ est différentiable en $(1, 1)$ et calculer sa différentielle en $(1, 1)$.

Soient $\alpha : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \mapsto xy$ et $\beta : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \mapsto \frac{x}{y}$.

On dispose de U un voisinage de $(1, 1)$ et V un voisinage de 1 tel que $\alpha(U) \subset V$ et $\beta(U) \subset V$. $\alpha : U \rightarrow V$ et $\beta : U \rightarrow V$ sont différentiables en $(1, 1)$.

Le théorème de composition s'applique : $f \circ \alpha$ et $f \circ \beta$ sont différentiables en $(1, 1)$, donc φ aussi, avec

$$\begin{aligned}
 d\varphi((1, 1))(h_1, h_2) &= d(f \circ \alpha)(1, 1)(h_1, h_2) + d(f \circ \beta)(1, 1)(h_1, h_2) \\
 &= (yh_1 + xh_2)f'(1) + \left(-\frac{y}{x^2}h_1 + \frac{h_2}{x}\right)g'(1)
 \end{aligned}$$

Exercice 1.18

Déterminer toutes les fonctions f de classe C^2 sur $\mathbb{R} \setminus \{-1, 1\}$ qui vérifient $\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} = \frac{y}{x^3}$ où $Z(x, y) = f(\frac{y}{x})$

?

Exercice 1.19

Soient E et F deux espaces de Banach. Soit $f : E \rightarrow F$ de classe C^2 telle que

$$\forall t \in \mathbb{R}, \forall x \in E, f(tx) = t^2 f(x)$$

Montrer que pour tout $x \in E$, $d^2 f(0)(x, x) = 2f(x)$.

On rappelle que $\mathcal{L}_c(E, \mathcal{L}_c(E, F))$ s'identifie à l'espace des applications bilinéaires $\mathcal{L}_c(E \times E, F)$.

L'énoncé demande en réalité de montrer que pour tout $x \in E$,

$$d^2 f(0)(x)(x) = 2f(x)$$

Soit $x \in E$ fixé.

Posons $\alpha : \mathbb{R} \rightarrow E, t \mapsto tx$ et $\beta : \mathbb{R} \rightarrow F, t \mapsto t^2 f(x)$. \mathbb{R} étant de dimension finie, toute application linéaire de \mathbb{R} dans E est continue. α est clairement différentiable en tout $t \in \mathbb{R}$ de différentielle $h \mapsto hx$.

Pour $t \in \mathbb{R}$ et $h \in \mathbb{R}$, $\beta(t+h) = \beta(t) + 2thf(x) + h^2 f(x)$ avec

$$\frac{\|h^2 f(x)\|_F}{|h|} = |h| \|f(x)\|_F \xrightarrow{|h| \rightarrow 0} 0$$

Donc β est différentiable en t de différentielle $h \mapsto 2thf(x)$

En différentiant l'égalité $f \circ \alpha = \beta$ en $t \in \mathbb{R}$ on a pour tout $h \in \mathbb{R}$, $hdf(tx)(x) = 2thf(x)$ et donc

$$df(tx)(x) = 2tf(x) \quad (*)$$

ceci étant vrai pour tout $t \in \mathbb{R}$.

Soit $\Pi : \mathcal{L}_c(E, F) \rightarrow F, L \mapsto L(x)$. Pour $L \in \mathcal{L}_c(E, F)$ et $H \in \mathcal{L}_c(E, F)$, $\Pi(L+H) = (L+H)(x) = \Pi(x) + H(x)$.

Le candidat pour la différentielle en L est donc $H \mapsto H(x)$. Il suffit de montrer que cette application est continue.

Soit $\|\cdot\|_{op}$ la norme d'opérateur sur $\mathcal{L}_c(E, F)$ qui dérive naturellement de $\|\cdot\|_E$ et $\|\cdot\|_F$.

Alors

$$\frac{\|H(x)\|_F}{\|H\|_{op}} \leq \frac{\|H\|_{op} \|x\|_E}{\|H\|_{op}} \leq \|x\|_E$$

D'où la continuité.

Soit $\gamma : \mathbb{R} \rightarrow F, t \mapsto 2tf(x)$. On montre facilement que γ est différentiable en tout $t \in \mathbb{R}$ de différentielle $h \mapsto 2hf(x)$.

L'égalité (*) se réécrit $\Pi \circ df \circ \alpha = \gamma$. Pour $t \in \mathbb{R}$ et $h \in \mathbb{R}$,

$$\begin{aligned} d(\Pi \circ df \circ \alpha)(t)(h) &= d\Pi(df \circ \alpha(t))(d(df \circ \alpha)(t)(h)) \\ &= d(df \circ \alpha)(t)(h)(x) \\ &= d(df)(tx)(hx)(x) \\ &= hd^2f(tx)(x)(x) \end{aligned}$$

On a donc pour tout $h \in \mathbb{R}$, $hd^2f(tx)(x)(x) = 2hf(x)$, donc

$$d^2f(tx)(x)(x) = 2f(x)$$

ceci étant vrai pour tout $t \in \mathbb{R}$. En $t = 0$ on a

$$d^2f(0)(x)(x) = 2f(x)$$

comme voulu.

2. Applications de la notion de différentielle

3. Equations différentielles

4. Ensembles convexes

Exercice 4.1

Trouver K un convexe fermé et f une application affine telle que $f(K)$ soit un ouvert.

On considère simplement $\text{Id} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$.

Exercice 4.2

Soit C un convexe non réduit à un point.

1. Montrer l'équivalence des deux propositions suivantes :
 - (a) $x_0 \in \text{Ri}(C)$
 - (b) $\forall x \in C, \exists y, x_0 \in [x, y[$
2. Montrer que si C n'est pas convexe, alors la réciproque est fausse.

?

Exercice 4.3

Soit $K \subset \mathbb{R}^n$ convexe de cardinal $n + 2$. Montrer qu'il existe une partition de K en $K_1 \cup K_2$ telles que les enveloppes convexes de K_1 et K_2 ne sont pas disjointes.

L'hypothèse K convexe est superflue. Ecrivons $K = \{a_1, \dots, a_{n+2}\}$ et considérons la matrice A à $n+1$ lignes et $n+2$ colonnes

$$A = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ a_1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} & \dots & \begin{pmatrix} \vdots \\ a_{n+2} \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

Elle n'est pas inversible donc il existe $(\alpha_1, \dots, \alpha_{n+2})$ un élément non nul de $\ker A$, ce qu'on peut encore écrire

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n+2} \alpha_i a_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^{n+2} \alpha_i &= 0 \end{aligned}$$

Soit $I \subset \llbracket 1, n+2 \rrbracket$ l'ensemble des indices tels que $\alpha_i > 0$ et $J \subset \llbracket 1, n+2 \rrbracket$ l'ensemble des indices tels que $\alpha_j \leq 0$. I et J sont non vides car $(\alpha_1, \dots, \alpha_{n+2}) \neq (0, \dots, 0)$ et $\sum_{i=1}^{n+2} \alpha_i = 0$.

On a $\sum_{i \in I} \alpha_i a_i = \sum_{j \in J} (-\alpha_j) a_j$ et $\sum_{i \in I} \alpha_i = \sum_{j \in J} (-\alpha_j)$.

Posons $S = \sum_{i \in I} \alpha_i$ qui est non nul. Alors

$$\sum_{i \in I} \frac{\alpha_i}{S} a_i = \sum_{j \in J} \frac{(-\alpha_j)}{S} a_j$$

avec

$$\sum_{i \in I} \frac{\alpha_i}{S} = \sum_{j \in J} \frac{(-\alpha_j)}{S} = 1$$

$K_1 = (a_i)_{i \in I}$ et $K_2 = (a_j)_{j \in J}$ est donc une partition convenant.

Exercice 4.4

Soit K une partie convexe de E et M une variété affine de E telle que $M \cap \text{Ri}(K) \neq \emptyset$. On suppose M fermée.

1. Montrer que $\text{Ri}(M \cap K) = M \cap \text{Ri}(K)$
2. Montrer que $\overline{M \cap K} = \overline{M} \cap \overline{K}$

?

Exercice 4.5

Montrer que toute section plane d'un ensemble convexe est convexe.

Tout hyperplan est convexe (en tant que sous-espace vectoriel) et l'intersection de deux convexes est convexe, donc toute section plane d'un convexe est convexe.

Exercice 4.6

Donner un exemple de fermé A d'un evn tel que $\text{co } A$ ne soit pas fermée.

On rappelle que $\text{co } A$ fait référence à l'enveloppe convexe de A . On se place dans \mathbb{R}^2 et on pose $A = (\{0\} \times [0, 1]) \cup ([0, \infty) \times \{0\})$ qui est fermé comme union de deux fermés.

Cependant $\text{co } A = ([0, \infty) \times [0, 1]) \cup \{(0, 1)\}$ (évident sur un dessin) qui n'est pas fermé.

Exercice 4.7

Soit X un fermé d'un evn E . Montrer l'équivalence des propositions suivantes

1. X convexe
2. $\forall x, y \in X, \frac{x+y}{2} \in X$

Donner un contre-exemple si X n'est pas fermé.

\implies Trivial.

\impliedby Soient $x, y \in X$ fixés. Montrons par récurrence sur $n \geq 1$ que

$$\forall k \in [0, 2^n], \frac{k}{2^n}x + \left(1 - \frac{k}{2^n}\right)y \in X$$

• Pour $n = 1$, c'est une conséquence l'hypothèse $\forall x, y \in X, \frac{x+y}{2} \in X$.

• Supposons le résultat vrai pour $n \geq 1$ et prouvons le pour $n + 1$.

On remarque que

$$\frac{k'}{2^n}x + \left(1 - \frac{k'}{2^n}\right)y = \frac{2k'}{2^{n+1}}x + \left(1 - \frac{2k'}{2^{n+1}}\right)y$$

ce qui prouve le résultat pour tout k pair dans $\llbracket 0, 2^{n+1} \rrbracket$

Soit $k \in \llbracket 0, 2^{n+1} - 1 \rrbracket$ impair. Ecrivons $k = 2k' + 1$ où $k' \in \llbracket 0, 2^n - 1 \rrbracket$. Alors

$$\begin{aligned} \frac{k}{2^{n+1}}x + \left(1 - \frac{k}{2^{n+1}}\right)y &= \frac{2k' + 1}{2^{n+1}}x + \left(1 - \frac{2k' + 1}{2^{n+1}}\right)y \\ &= \frac{1}{2} \left[\underbrace{\frac{k'}{2^n}x + \left(1 - \frac{k'}{2^n}\right)y}_{\in C} + \underbrace{\frac{k' + 1}{2^n}x + \left(1 - \frac{k' + 1}{2^n}\right)y}_{\in C} \right] \end{aligned}$$

Ceci achève la récurrence.

Soit $\lambda \in [0, 1]$. La suite $\frac{\lfloor 2^n \lambda \rfloor}{2^n}$ converge vers λ , de sorte que la suite des

$$\frac{\lfloor 2^n \lambda \rfloor}{2^n}x + \left(1 - \frac{\lfloor 2^n \lambda \rfloor}{2^n}\right)y$$

est une suite d'éléments de C qui converge vers $\lambda x + (1 - \lambda)y$. Comme C est fermé, $\lambda x + (1 - \lambda)y \in C$. Ceci étant vrai pour tout x, y, λ , C est convexe.

Dans le cas où C n'est pas fermé, \mathbb{Q} fournit un contre-exemple évident à la réciproque.

Exercice 4.8

Soient A et B deux parties d'un evn E .
Montrer que $\text{co } A + \text{co } B = \text{co}(A + B)$.

\supset On montre facilement que si C et C' sont deux convexes de E , $C + C'$ est convexe. $\text{co } A$ et $\text{co } B$ étant convexes, $\text{co } A + \text{co } B$ est convexe. Par ailleurs, $A \subset \text{co } A$ et $B \subset \text{co } B$ donc $A + B \subset \text{co } A + \text{co } B$.
 $\text{co } A + \text{co } B$ est donc un convexe contenant $A + B$, donc $\text{co}(A + B) \subset \text{co } A + \text{co } B$.

\subset Soit $a + b \in \text{co } A + \text{co } B$. Il existe n et $p \in \mathbb{N}$, $\alpha_i, \beta_j \in \mathbb{R}$, $a_i \in A$, $b_j \in B$ tels que $a = \sum_{i=1}^n \alpha_i a_i$, $b = \sum_{j=1}^p \beta_j b_j$, $\sum_{i=1}^n \alpha_i = \sum_{j=1}^p \beta_j = 1$.

Pour $1 \leq j \leq p$ on pose $c_j = b_j + \sum_{i=1}^n \alpha_i a_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i (a_i + b_j) \in \text{co}(A + B)$.

$$\text{Alors } \underbrace{\sum_{j=1}^p \beta_j c_j}_{\in \text{co}(\text{co}(A+B))} = \sum_{j=1}^p \beta_j (b_j + \sum_{i=1}^n \alpha_i a_i) = \sum_{j=1}^p \beta_j b_j + \sum_{i=1}^n \alpha_i a_i = a + b$$

Comme $\text{co}(A+B)$ est convexe, $\text{co}(\text{co}(A+B)) = \text{co}(A+B)$, donc $a+b \in \text{co}(A+B)$.

Exercice 4.9

On dit qu'un point $x \in A$ est un point exposé de A s'il existe un hyperplan d'appui H à A tel que $H \cap A = \{x\}$.

On note $\exp A$ l'ensemble des points exposés de A .

1. Montrer que si C est convexe, on a $\exp C \subset \text{ext } C$.
2. Donner un exemple de convexe C pour lequel $\exp C \subsetneq \text{ext } C$.
3. Donner un exemple dans \mathbb{R}^3 qui vérifie $\exp C \subsetneq \text{ext } C \subsetneq \overline{\exp C}$

1. Soit C un convexe. On rappelle que $\text{ext } C$ désigne l'ensemble des points extrémaux de C .

Soit $x^* \in \exp C$. Soit H l'hyperplan d'appui à C tel que $H \cap C = \{x^*\}$. Il existe $\ell \in \mathcal{L}_c(E, \mathbb{R})$ une forme linéaire continue non-triviale et un réel α tels que $H = \{x \in E \mid \ell(x) = \alpha\}$. On suppose sans perte de généralité que $C \subset H^+ = \{x \in E \mid \ell(x) \geq \alpha\}$.

Comme $x^* \in H$, on a $\ell(x^*) = \alpha$. Si $x \in C$ est tel que $\ell(x) = \alpha$, alors $x \in C \cap H$ et donc $x = x^*$.

Si $x \in C$ et $x \neq x^*$ on a donc $\ell(x) > \alpha$.

Supposons par l'absurde que $x^* \notin \text{ext } C$. On dispose alors de $a, b \in C$ et $\lambda \in]0, 1[$ tels que $x^* = (1 - \lambda)a + \lambda b$.

Alors $\ell(x^*) = (1 - \lambda)\ell(a) + \lambda\ell(b)$.

Comme $\lambda \in]0, 1[$, $(1 - \lambda)\ell(a) + \lambda\ell(b) > \min(\ell(a), \ell(b))$. Comme $a \neq x^*$ et $b \neq x^*$, $\min(\ell(a), \ell(b)) > \alpha$.

Donc $\ell(x^*) = (1 - \lambda)\ell(a) + \lambda\ell(b) > \alpha$ ce qui contredit $\ell(x^*) = \alpha$.

2. Dans \mathbb{R}^2 on considère l'ensemble A formé d'un demi arc de cercle au dessous duquel on colle une sorte de carré, comme sur la figure ci dessous.

Formellement $A = \{(x, y) \mid x^2 + y^2 = 1 \text{ et } y \geq 0\} \cup \{(-1, y) \mid y \in [0, -2]\} \cup \{(1, y) \mid y \in [0, -2]\} \cup \{(x, -2) \mid x \in [-1, 1]\}$. Le seul hyperplan d'appui contenant B est la droite $x = 1$ qui contient aussi $\{(1, y) \mid y \in [0, -2]\}$. Donc B n'est pas exposé.

Pourtant B est extrémal.

3. ?



Exercice 4.10

Soit C un convexe compact de \mathbb{R}^n .

1. Pour $a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ on considère $\varphi : C \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 2\langle a, x \rangle$. Montrer que φ admet un maximum sur C atteint en un point x_0 .
2. Soit $H_a = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \langle a, x \rangle = \langle a, x_0 \rangle\}$. Montrer que $H_a \cap C$ est un convexe non vide.

1. φ est continue sur \mathbb{R}^n (car linéaire à partir d'un espace de dimension finie), donc elle admet un maximum sur le compact C .

2. H_a contient x_0 . Montrons que H_a est convexe. Soit $x, y \in H_a$ et $\lambda \in [0, 1]$. Alors $\langle a, \lambda x + (1-\lambda)y \rangle = \lambda \langle a, x \rangle + (1-\lambda) \langle a, y \rangle = \lambda \langle a, x_0 \rangle + (1-\lambda) \langle a, x_0 \rangle = \langle a, x_0 \rangle$ donc $\lambda x + (1-\lambda)y \in H_a$ et H_a est convexe.

$H_a \cap C$ est donc convexe comme intersection de deux convexes et non vide car il contient x_0 .

Exercice 4.11

Soient H un espace de Hilbert et C une partie convexe fermée non vide de H .

1. On considère $f : H \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $f(x) = (d(x, C))^2$. Montrer que f est différentiable en tout point et calculer la différentielle de f en un point x de H . (On considérera le projecteur P de meilleure approximation sur C).
2. Soit $\varphi : H \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $\varphi(x) = \langle Ax, x \rangle + \langle f, x \rangle$ où $f \in H$ et $A \in \mathcal{L}_c(H, H)$ auto-adjointe. Déterminer le gradient de φ en x .

1. On rappelle que la projection sur un convexe fermé d'un Hilbert est unique

et on notera $p_C(x)$ le projeté de x sur C . On rappelle que p_C est 1-lipschitzienne.

Soit $x \in H$ fixé et $h \in H$. On a le développement

$$\begin{aligned} d(x+h, C)^2 &= \|x+h - p_C(x+h)\|^2 \\ &= \|x - p_C(x) + h + p_C(x) - p_C(x+h)\|^2 \\ &= d(x, C)^2 + 2\langle x - p_C(x), h \rangle + 2\langle x - p_C(x), p_C(x) - p_C(x+h) \rangle + \|p_C(x) - p_C(x+h) + h\|^2 \\ &= d(x, C)^2 + 2\langle x - p_C(x), h \rangle + 2\langle p_C(x) - p_C(x+h), h + x - p_C(x) \rangle + \|p_C(x) - p_C(x+h)\|^2 + \|h\|^2 \end{aligned}$$

Le candidat naturel pour la différentielle de f en x est donc $h \mapsto 2\langle x - p_C(x), h \rangle$. Sachant que p_C est 1-lipschitzienne il est facile de montrer que $\|p_C(x) - p_C(x+h)\|^2 + \|h\|^2 = o(\|h\|)$.

Cependant il est **remarquablement difficile** de prouver par des moyens élémentaires que $\langle p_C(x) - p_C(x+h), h + x - p_C(x) \rangle = o(\|h\|)$. (On peut montrer facilement que c'est un $O(\|h\|)$ mais c'est insuffisant).

On adopte une approche différente :

Lemme : Soit $f, g_1, g_2 : H \rightarrow \mathbb{R}$ trois fonctions différentiables en $x \in H$ avec U un voisinage de x et

$$\forall y \in U, g_1(y) \leq f(y) \leq g_2(y)$$

et $g_1(x) = g_2(x)$.

Alors $dg_1(x) = dg_2(x)$, f est différentiable en x et $df(x) = dg_1(x)$.

Preuve : Pour $h \in U - x$ on a $g_1(x+h) \leq g_2(x+h)$. On dispose de deux fonctions ε_1 et $\varepsilon_2 : H \rightarrow \mathbb{R}$ nulles et continues en 0 telles que

$$g_1(x) + dg_1(x)(h) + \|h\|\varepsilon_1(h) \leq g_2(x) + dg_2(x)(h) + \|h\|\varepsilon_2(h)$$

ie

$$dg_2(x)(h) - dg_1(x)(h) + \|h\|(\varepsilon_2(h) - \varepsilon_1(h)) \geq 0$$

Pour $t > 0$ on remplace h par th et on obtient

$$t(dg_2(x)(h) - dg_1(x)(h)) + t\|h\|(\varepsilon_2(th) - \varepsilon_1(th)) \geq 0$$

En simplifiant par t puis en faisant $t \rightarrow 0$,

$$dg_2(x)(h) - dg_1(x)(h) \geq 0$$

En remplaçant h par $-h$ dans la dernière inégalité,

$$dg_2(x)(h) - dg_1(x)(h) \leq 0$$

donc $dg_2(x)(h) = dg_1(x)(h)$, ceci étant vrai pour tout $h \in H$, donc $dg_2(x) = dg_1(x)$.

Posons $dg(x) := dg_1(x)$ et réécrivons l'inégalité $g_1(x+h) \leq f(x+h) \leq g_2(x+h)$:

$$f(x) + dg(x)(h) + \|h\|\varepsilon_1(h) \leq f(x+h) \leq f(x) + dg(x)(h) + \|h\|\varepsilon_2(h)$$

donc

$$\varepsilon_1(h) \leq \frac{f(x+h) - f(x) - dg(x)(h)}{\|h\|} \leq \varepsilon_2(h)$$

Par encadrement, on a pour $\|h\| \rightarrow 0$, $\frac{f(x+h) - f(x) - dg(x)(h)}{\|h\|} \rightarrow 0$.

□

Revenons au problème. Soit $x \in H \setminus C$ fixé. Posons $x^* = p_C(x)$, $e = \frac{x-x^*}{\|x-x^*\|}$ et \mathcal{H} l'hyperplan d'appui en x^* de normale e , de sorte que

$$\mathcal{H} = \{y \in H, \langle y, e \rangle = \langle x^*, e \rangle\}$$

Lemme : On note $p_{\mathcal{H}}$ la projection orthogonale sur \mathcal{H} (qui est un sev fermé). Soit $y \in \mathcal{H}^+$ et $z \in \mathcal{H}^-$. Alors $\|y - p_{\mathcal{H}}(y)\| \leq \|y - z\|$.

Preuve : C'est géométriquement évident (faire un dessin). Formellement, comme $\|y - z\|^2 = \|y - p_{\mathcal{H}}(y) + p_{\mathcal{H}}(y) - z\|^2$

$$= \|y - p_{\mathcal{H}}(y)\|^2 + \|p_{\mathcal{H}}(y) - z\|^2 - 2\langle y - p_{\mathcal{H}}(y), z - p_{\mathcal{H}}(y) \rangle$$

il suffit de prouver que $\langle y - p_{\mathcal{H}}(y), z - p_{\mathcal{H}}(y) \rangle \leq 0$ (ce qui est encore une évidence géométrique).

Comme $y - p_{\mathcal{H}}(y) \in \mathcal{H}^\perp$ (cf théorème de la projection orthogonale sur un sev fermé), et que $\mathcal{H}^\perp = \text{Vect}(e)$ on peut écrire

$$y - p_{\mathcal{H}}(y) = \lambda e \text{ d'où } \langle y - p_{\mathcal{H}}(y), e \rangle = \lambda \|e\|^2 = \lambda$$

$$= \langle y, e \rangle - \langle p_{\mathcal{H}}(y), e \rangle$$

$$\geq \langle x^*, e \rangle - \langle p_{\mathcal{H}}(y), e \rangle \quad \text{car } y \in \mathcal{H}^+$$

$$= \langle x^*, e \rangle - \langle x^*, e \rangle \quad \text{car } p_{\mathcal{H}}(y) \in \mathcal{H}$$

$$= 0$$

donc $\lambda \geq 0$.

$$\text{Finalement, } \langle y - p_{\mathcal{H}}(y), z - p_{\mathcal{H}}(y) \rangle = \lambda \langle e, z - p_{\mathcal{H}}(y) \rangle$$

$$= \lambda (\langle e, z \rangle - \langle e, p_{\mathcal{H}}(y) \rangle)$$

$$\leq \lambda (\langle e, x^* \rangle - \langle e, x^* \rangle) \quad \text{car } \lambda \geq 0, z \in \mathcal{H}^-, p_{\mathcal{H}}(y) \in \mathcal{H}$$

$$= 0$$

comme souhaité.

□

Dans notre problème on dispose d'un voisinage de x noté U tel que $U \subset \mathcal{H}^+$. Pour $y \in U$, comme $p_C(y) \in C \subset \mathcal{H}^-$, le lemme donne $(d(y, \mathcal{H}))^2 \leq (d(y, C))^2$. On a aussi la majoration triviale $(d(y, C))^2 \leq \|y - x^*\|^2$. En bref

$$(d(y, \mathcal{H}))^2 \leq (d(y, C))^2 \leq \|y - x^*\|^2$$

Par ailleurs $(d(y, \mathcal{H}))^2$ se réécrit simplement

$$\langle y - p_{\mathcal{H}}(y), e \rangle^2 = \langle y - x^*, e \rangle^2 = \langle y - x^*, \frac{x - x^*}{\|x - x^*\|} \rangle^2$$

D'où l'encadrement

$$\underbrace{\langle y - x^*, \frac{x - x^*}{\|x - x^*\|} \rangle^2}_{:=g_1(y)} \leq (d(y, C))^2 \leq \underbrace{\|y - x^*\|^2}_{:=g_2(y)}$$

On a bien $g_1(x) = g_2(x)$, g_1 différentiable en x et g_2 différentiable en x de différentielle $h \mapsto 2\langle h, x - x^* \rangle$ (application linéaire continue par Cauchy-Schwarz). D'après le lemme, f est différentiable en x de différentielle $h \mapsto 2\langle h, x - x^* \rangle$.

Il reste à traiter le cas où $x \in C$. Il suffit de noter qu'alors

$$(d(x + h, C))^2 \leq \|(x + h) - x\|^2 = \|h\|^2$$

Donc f est différentiable de différentielle nulle.

2. Pour $x \in H$ on a le développement

$$\begin{aligned} \varphi(x + h) &= \varphi(x) + \langle Ax, h \rangle + \langle Ah, x \rangle + \langle f, h \rangle + \langle Ah, h \rangle \\ &= \varphi(x) + \langle Ax, h \rangle + \langle h, Ax \rangle + \langle f, h \rangle + \langle Ah, h \rangle \quad \text{car } A \text{ auto-adjointe} \\ &= \varphi(x) + \langle h, 2Ax + f \rangle + \langle Ah, h \rangle \end{aligned}$$

$h \mapsto \langle h, 2Ax + f \rangle$ est linéaire et continue (par Cauchy-Schwarz). Par ailleurs,

$$\frac{|\langle Ah, h \rangle|}{\|h\|} \leq \|Ah\| \leq \|A\|_{op} \|h\| \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} 0$$

φ est donc différentiable en x , de gradient $2Ax + f$.

Exercice 4.12

Soit C un convexe de \mathbb{R}^n . Pour $0 \geq b \geq a$, montrer que

$$aC - bC = (a - b)C + b(C - C)$$

⊂ Soit $ac - bc' \in aC - bC$. Alors

$$ac - bc' = (a - b)c + b(c - c') \in (a - b)C + b(C - C)$$

⊃ Soit $(a - b)c + b(c' - c'') \in (a - b)C + b(C - C)$. On a

$$\begin{aligned} (a - b)c + b(c' - c'') &= -((b - a)c + (-b)(c' - c'')) \\ &= - \left((-a) \underbrace{\left[\left(1 - \frac{b}{a}\right)c + \frac{b}{a}c' \right]}_{\in C} + bc'' \right) \\ &= a \left[\left(1 - \frac{b}{a}\right)c + \frac{b}{a}c' \right] - bc'' \\ &\in aC - bC \end{aligned}$$

Exercice 4.13

Soit C un fermé de \mathbb{R}^n tel que $\forall x, y \in C,]x, y[\cap C \neq \emptyset$.
Montrer que C est convexe.

Supposons par l'absurde que C n'est pas convexe : on dispose alors de $x, y \in C$ et $\alpha \in]0, 1[$ tel que $(1 - \alpha)x + \alpha y \notin C$.

Considérons $\mu = \inf\{\lambda \geq \alpha \mid (1 - \lambda)x + \lambda y \in C\}$. On dispose de λ_n une suite qui décroît vers μ avec pour tout n , $(1 - \lambda_n)x + \lambda_n y \in C$ et $\lambda_n \geq \alpha$. En passant à la limite, comme C est fermé, on a $(1 - \mu)x + \mu y \in C$ et $\mu \geq \alpha$. Comme $(1 - \alpha)x + \alpha y \notin C$, l'inégalité est stricte : $\mu > \alpha$.

De même, on pose $\nu = \sup\{\lambda \leq \alpha \mid (1 - \lambda)x + \lambda y \in C\}$. On a encore $(1 - \nu)x + \nu y \in C$ et $\nu < \alpha$.

Posons $a = (1 - \mu)x + \mu y$ et $b = (1 - \nu)x + \nu y$. Alors $]a, b[\cap C \neq \emptyset$: on dispose de $\gamma \in]0, 1[$ tel que $(1 - \gamma)b + \gamma a \in C$.

Or $(1 - \gamma)b + \gamma a = (1 - [(1 - \gamma)\nu + \gamma\mu])x + [(1 - \gamma)\nu + \gamma\mu]y$ avec

$$(1 - \gamma)\nu + \gamma\mu \in]\nu, \mu[$$

Ceci contredit la définition de ν , absurde.

Exercice 4.14

Soit X un fermé de \mathbb{R}^n et $x \in X$. On dit que $v \in \mathbb{R}^n$ est une direction asymptotique de X en x si

$$\forall a \geq 0, x + av \in X$$

On note $K(X, x)$ l'ensemble des directions asymptotiques de X en x .

1. Montrer que $\forall x \in X, K(X, x)$ est un cône.
2. Si X est convexe, montrer que $K(X, x)$ est convexe et que si $x, x' \in X$, alors $K(X, x) = K(X, x')$.

1. Soit $x \in X, v \in K(X, x)$ et $\lambda \geq 0$. Montrons que $\lambda v \in K(X, x)$. Pour $a \geq 0, a\lambda \geq 0$ donc $x + a\lambda v \in X$, donc $\lambda v \in K(X, x)$.

2. On suppose X convexe. Montrons que $K(X, x)$ est convexe. Pour $v, v' \in K(X, x), \lambda \in [0, 1]$ et $a \geq 0$

$$x + a[(1 - \lambda)v + \lambda v'] = (1 - \lambda)\underbrace{(x + av)}_{\in X} + \lambda\underbrace{(x + av')}_{\in X} \in X$$

Donc $(1 - \lambda)v + \lambda v' \in K(X, x)$ et $K(X, x)$ est convexe.

Soient $x, x' \in X$. Montrons que $K(X, x) \subset K(X, x')$. Soit $v \in K(X, x)$ et $a \geq 0$. On remarque que

$$x' + av = \lim_n \left(\underbrace{\left(\left(1 - \frac{1}{n}\right)x' + \frac{1}{n}\underbrace{(x + nav)}_{\in X} \right)}_{\in X} \right)$$

Comme X est fermé, $x' + av \in X$ donc $x' \in K(X, x)$ et $K(X, x) \subset K(X, x')$. On a l'inclusion inverse par symétrie.

Exercice 4.15

□

Exercice 4.16

Soit X un convexe de \mathbb{R}^n et A un convexe de \mathbb{R}^+ qui contient 0. Montrer que $\bigcup_{a \in A} aX$ est convexe.

Soient $x, y \in \bigcup_{a \in A} aX$. On dispose de $a, b \in A$ et $x_1, x_2 \in X$ tels que $x = ax_1$ et $y = bx_2$. Soit $\lambda \in [0, 1]$.

Il s'agit de montrer que $(1 - \lambda)ax_1 + \lambda bx_2 \in \bigcup_{a \in A} aX$.

Si $a = 0$ ou $b = 0$, en supposant par exemple que $a = 0$, il suffit de prouver que $\lambda bx_2 \in \bigcup_{a \in A} aX$. Comme $\lambda b = (1 - \lambda)0 + \lambda b$, on a $\lambda bx_2 \in (\lambda b)X$.

Si $a \neq 0$ et $b \neq 0$, on remarque qu'on a l'égalité

$$\underbrace{(\lambda a + (1 - \lambda)b)}_{\in A} \underbrace{\left[\left(1 - \frac{(1 - \lambda)b}{\lambda a + (1 - \lambda)b}\right) x_1 + \frac{(1 - \lambda)b}{\lambda a + (1 - \lambda)b} x_2 \right]}_{\in C} = (1 - \lambda)ax_1 + \lambda bx_2$$

ce qui prouve le résultat.

Exercice 4.17

1. Soit X une partie de \mathbb{R}^n à N éléments ($N > n + 1$). Montrer qu'il est possible de partitionner X en deux parties X_1 et X_2 tels que

$$\text{co}(X_1) \cap \text{co}(X_2) \neq \emptyset$$

2. Soit $(X_i)_{i \in \llbracket 1, N \rrbracket}$ N parties convexes fermées de \mathbb{R}^n avec $N > n$. Montrer par récurrence sur N le théorème de Helly : si toute sous-famille de (X_i) à $n + 1$ éléments a une intersection non vide, alors les N convexes de la famille (X_i) sont d'intersection non vide.

1. On adapte facilement la preuve du 4.3 avec $N \geq n + 2$ au lieu de $N = n + 2$.

2. On procède par récurrence sur $N \geq n + 1$, n étant fixé dans toute la preuve. L'initialisation est immédiate. Supposons le résultat vrai pour $N - 1$ et prouvons le pour N . Supposons par l'absurde que toute sous-famille de (X_i) à $n + 1$ éléments a une intersection non vide mais que X_1, \dots, X_N sont d'intersection vide.

D'après l'hypothèse de récurrence appliquée à chaque sous-famille à $N - 1$ éléments des (X_i) , on dispose pour chaque $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$ de $x_i \in \bigcap_{j \neq i} X_j \setminus X_i$.

Posons $A = \{x_1, \dots, x_N\}$. D'après le résultat du 1., il existe une partition de A en $A_1 \cup A_2$ avec $\text{co}(A_1) \cap \text{co}(A_2) \neq \emptyset$.

Considérons $x \in \text{co}(A_1) \cap \text{co}(A_2)$ et montrons que $x \in \bigcap_{i=1}^N X_i$. Soit $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$. Si $x_i \in A_1$, A_2 ne contient que des x_j où $j \in \llbracket 1, N \rrbracket \setminus \{i\}$, donc $A_2 \subset X_i$. Or X_i est convexe, donc $\text{co}(A_2) \subset X_i$, donc $x \in X_i$. On procède similairement lorsque $x_i \in A_2$.

Donc $x \in \bigcap_{i=1}^N X_i$ ce qui est absurde.

Exercice 4.18

Montrer que l'ensemble suivant est convexe :

$$C = \{(a, b, c) \in \mathbb{R}^3 \mid a > 0, b^2 - 4ac < 0\}$$

Soient $(a, b, c), (a', b', c') \in C$ et $\lambda \in [0, 1]$.

Il s'agit de montrer que $(1 - \lambda)(a, b, c) + \lambda(a', b', c') \in C$.

Considérons les polynômes $P(X) = aX^2 + bX + c$ et $Q(X) = a'X^2 + b'X + c'$.

Comme $(a, b, c) \in C$, P est un polynôme strictement positif, au sens où

$$\forall x \in \mathbb{R}, P(x) > 0$$

De même, Q est strictement positif.

Or, pour deux réels strictement positifs $x > 0$ et $y > 0$, on a pour tout $\lambda \in [0, 1]$, $(1 - \lambda)x + \lambda y > 0$.

On en déduit que $(1 - \lambda)P + \lambda Q$ est un polynôme strictement positif dont les coefficients sont $((1 - \lambda)a + \lambda a', (1 - \lambda)b + \lambda b', (1 - \lambda)c + \lambda c')$.

Ceci implique $((1 - \lambda)a + \lambda a', (1 - \lambda)b + \lambda b', (1 - \lambda)c + \lambda c') \in C$, soit encore

$$(1 - \lambda)(a, b, c) + \lambda(a', b', c') \in C$$

5. Fonctions convexes

Exercice 5.1

Soient E un evn et $f : E \rightarrow \mathbb{R}$ convexe et impaire.

1. Montrer que $\forall x \in E, \forall \lambda \in]0, 1[, f(\lambda x) \leq \lambda f(x)$.
2. En déduire que $\forall x \in E, \forall \lambda \in]0, 1[, f(\lambda x) = \lambda f(x)$.
3. En déduire que f est linéaire.

1. On note que par imparité $f(0) = f(-0) = -f(0)$ donc $2f(0) = 0$ et $f(0) = 0$.
Pour $x \in E$ et $\lambda \in]0, 1[$ on a

$$f(\lambda x) = f(\lambda x + (1 - \lambda) \cdot 0) \leq \lambda f(x) + (1 - \lambda)f(0) = \lambda f(x)$$

2. Pour $x \in E$ et $\lambda \in]0, 1[, -f(\lambda x) = f(\lambda(-x)) \leq \lambda f(-x) = -\lambda f(x)$ donc $f(\lambda x) \geq \lambda f(x)$. En combinant avec l'inégalité de 1. on a l'égalité $f(\lambda x) = \lambda f(x)$.

3. Il suffit de prouver que pour $\lambda > 1, f(\lambda x) = \lambda f(x)$.
On remarque que pour $\lambda > 1, \frac{1}{\lambda} < 1$ et

$$\begin{aligned} f\left(\frac{1}{\lambda}(\lambda x)\right) &= \frac{1}{\lambda} f(\lambda x) \\ \implies f(\lambda x) &= \lambda f(x) \end{aligned}$$

comme souhaité.

Exercice 5.2

Soit $f > 0$ positivement homogène sur C convexe. Montrer que f est convexe si et seulement si $B = \{x \in C \mid f(x) \leq 1\}$ est convexe.

Pour que f soit homogène, il faut pouvoir définir $f(\lambda x)$ pour tout $\lambda \geq 0$, ce qui nécessite une structure additionnelle sur C . On supposera donc que C est un \mathbb{R} -evn. Par positivement homogène l'énoncé veut dire homogène de degré 1.

\Leftarrow Supposons B convexe et montrons que $\text{epi } f$ est convexe. On rappelle que

$$\text{epi } f = \{(x, y) \in C \times \mathbb{R} \mid y \geq f(x)\}$$

Soient $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ dans $\text{epi } f$ et $\lambda \in [0, 1]$. f étant homogène de degré 1 et strictement positive, les inégalités $y_1 \geq f(x_1) > 0$ et $y_2 \geq f(x_2) > 0$ se réécrivent $1 \geq f(\frac{1}{y_1}x_1)$ et $1 \geq f(\frac{1}{y_2}x_2)$ donc $\frac{x_1}{y_1}$ et $\frac{x_2}{y_2}$ sont dans B .

B étant convexe et $\frac{\lambda y_2}{(1-\lambda)y_1 + \lambda y_2}$ étant dans $[0, 1]$, on a

$$f\left(\left(1 - \frac{\lambda y_2}{(1-\lambda)y_1 + \lambda y_2}\right) \frac{x_1}{y_1} + \frac{\lambda y_2}{(1-\lambda)y_1 + \lambda y_2} \frac{x_2}{y_2}\right) \leq 1$$

ce qui se réécrit

$$f((1-\lambda)x_1 + \lambda x_2) \leq (1-\lambda)y_1 + \lambda y_2$$

ce qui équivaut à $((1-\lambda)x_1 + \lambda x_2, (1-\lambda)y_1 + \lambda y_2) \in \text{epi } f$.

Donc $\text{epi } f$ est convexe, donc f est convexe.

\Rightarrow On suppose f convexe. Montrons que B est convexe.

Soit $x, y \in C$ tel que $f(x) \leq 1$ et $f(y) \leq 1$ et $\lambda \in [0, 1]$. Alors

$$f((1-\lambda)x + \lambda y) \leq (1-\lambda)f(x) + \lambda f(y) \leq 1$$

Donc B convexe.

Exercice 5.3

□

Exercice 5.4

Soient $x_i > 0$, $\alpha_i \geq 0$ et $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$. Montrer que

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \geq \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i}$$

Par concavité du log et l'inégalité de Jensen on a

$$\ln\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i\right) \geq \sum_{i=1}^n \alpha_i \ln(x_i)$$

et on a l'inégalité voulue en passant à l'exponentielle.

Exercice 5.5

Soit I un intervalle contenu dans \mathbb{R}_+^* et $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ 2 fois dérivable.

Montrer que si $g : x \mapsto f(\frac{1}{x})$ est convexe dans I , alors $h : x \mapsto xf(x)$ est aussi convexe et réciproquement.

Il me semble nécessaire d'ajouter l'hypothèse $x \in I \implies \frac{1}{x} \in I$.

On note que

$$g''(x) = \frac{f''(\frac{1}{x}) + 2xf'(\frac{1}{x})}{x^4}$$

donc

$$g''(\frac{1}{x}) = x^3(xf''(x) + 2f'(x)) = x^3h''(x)$$

Pour $x \in I$, $g''(\frac{1}{x})$ et $h''(x)$ ont donc même signe. g est donc convexe si et seulement si h l'est.

Exercice 5.6

Soit $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ bornée.
 On définit $\varphi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ par $\varphi(t) = \inf_{x \in [a, b]} (-xt - f(x))$
 Montrer que φ est concave.

Montrons que $\psi : t \mapsto \sup_{x \in [a, b]} (xt + f(x))$ est convexe.

Soient $t, t' \in \mathbb{R}$ et $\lambda \in [0, 1]$. Pour $x \in [a, b]$, $xt + f(x) \leq \psi(t)$ et $xt' + f(x) \leq \psi(t')$
 donc

$$\begin{aligned} (1 - \lambda)(xt + f(x)) + \lambda(xt' + f(x)) &\leq (1 - \lambda)\psi(t) + \lambda\psi(t') \\ x((1 - \lambda)t + \lambda t') + f(x) &\leq (1 - \lambda)\psi(t) + \lambda\psi(t') \end{aligned}$$

ceci étant vrai pour tout $x \in [a, b]$. En passant au sup on obtient

$$\psi((1 - \lambda)t + \lambda t') \leq (1 - \lambda)\psi(t) + \lambda\psi(t')$$

ψ est donc convexe, donc $\varphi = -\psi$ est concave.

Exercice 5.7

Soient $t \in [a, b]$, $x \in \mathbb{R}^n$ et $f : \mathbb{R}^n \times [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, $(x, t) \mapsto f(x, t)$ telle que
 f est convexe en x et continue en t .
 Montrer que $g : x \mapsto \int_a^b f(x, t)dt$ est convexe.

Soient $x, y \in \mathbb{R}^n$ et $\lambda \in [0, 1]$. Pour $t \in [a, b]$, par convexité de f en la première variable, $f((1 - \lambda)x + \lambda y, t) \leq (1 - \lambda)f(x, t) + \lambda f(y, t)$.

En intégrant cette inégalité selon t on trouve

$$g((1 - \lambda)x + \lambda y) \leq (1 - \lambda)g(x) + \lambda g(y)$$

donc g est convexe.

Exercice 5.8

Soit A une partie fermée non vide d'un evn E .
 Montrer que A est convexe si et seulement si $x \mapsto d(A, x)$ est convexe de E dans \mathbb{R} .

\Rightarrow Supposons A convexe et montrons que $x \mapsto d(A, x)$ est convexe. Soient $x, y \in E$ et $\lambda \in]0, 1[$.

Soit x', y' deux éléments quelconques de A . On a l'inégalité

$$(1-\lambda)\|x-x'\| + \lambda\|y-y'\| \geq \|(1-\lambda)x + \lambda y - \underbrace{((1-\lambda)x' + \lambda y')}_{\in A}\| \geq d(A, (1-\lambda)x + \lambda y)$$

donc

$$\|x - x'\| \geq \frac{1}{1-\lambda} (d(A, (1-\lambda)x + \lambda y) - \lambda\|y - y'\|)$$

Le membre de droite est indépendant de x' , donc au passant à l'inf sur x' on a

$$d(A, x) \geq \frac{1}{1-\lambda} (d(A, (1-\lambda)x + \lambda y) - \lambda\|y - y'\|)$$

soit encore

$$(1-\lambda)d(A, x) \geq d(A, (1-\lambda)x + \lambda y) - \lambda\|y - y'\|$$

qui devient

$$\lambda\|y - y'\| \geq d(A, (1-\lambda)x + \lambda y) - (1-\lambda)d(A, x)$$

Un raisonnement similaire (passage à l'inf sur y') donne

$$\lambda d(A, y) \geq d(A, (1-\lambda)x + \lambda y) - (1-\lambda)d(A, x)$$

soit

$$d(A, (1-\lambda)x + \lambda y) \leq (1-\lambda)d(A, x) + \lambda d(A, y)$$

Donc $x \mapsto d(A, x)$ est convexe.

\Leftarrow On suppose que $x \mapsto d(A, x)$ est convexe. Soient $x, y \in A$ et $\lambda \in [0, 1]$.

On a $d(A, (1-\lambda)x + \lambda y) \leq (1-\lambda)d(A, x) + \lambda d(A, y) = (1-\lambda) \cdot 0 + \lambda \cdot 0 = 0$.

Donc $d(A, (1-\lambda)x + \lambda y) = 0$ et comme A est fermé, $(1-\lambda)x + \lambda y \in A$, donc A convexe.

Exercice 5.9

Soit $f_n :]0, 1[\rightarrow \mathbb{R}$ une suite de fonctions convexes qui converge simplement vers $f :]0, 1[\rightarrow \mathbb{R}$.

1. Montrer que f est convexe.
2. Montrer que f_n converge vers f uniformément sur tout compact de $]0, 1[$.

1. Soient $x, y \in]0, 1[$ et $\lambda \in [0, 1]$. Pour tout n ,

$$f_n((1 - \lambda)x + \lambda y) \leq (1 - \lambda)f_n(x) + \lambda f_n(y)$$

et en passant à la limite sur n on a la convexité de f .

2. Etant donné K un compact de $]0, 1[$, montrons que la famille des (f_n) est uniformément lipschitzienne, c'est-à-dire qu'il existe $A \geq 0$ tel que

$$\forall n \geq 1, \forall x, y \in K, |f_n(x) - f_n(y)| \leq A|x - y|$$

K étant compact il est inclus dans un segment $[a, b]$ avec $0 < a < b < 1$. Considérons $c < c' \in]0, a[$ et $d < d' \in]b, 1[$.

Soient $x, y \in K$ et $n \geq 1$ quelconques. Par convexité de f ,

$$\frac{f_n(c') - f_n(c)}{c' - c} \leq \frac{f_n(y) - f_n(x)}{y - x} \leq \frac{f_n(d') - f_n(d)}{d' - d}$$

$\left(\frac{f_n(c') - f_n(c)}{c' - c}\right)_n$ et $\left(\frac{f_n(d') - f_n(d)}{d' - d}\right)_n$ convergent, donc sont bornées. On dispose donc de m et M des réels tels que

$$m \leq \frac{f_n(c') - f_n(c)}{c' - c} \leq \frac{f_n(y) - f_n(x)}{y - x} \leq \frac{f_n(d') - f_n(d)}{d' - d} \leq M$$

Pour tout $n \geq 1$ et $x, y \in K$ on a donc

$$m \leq \frac{f_n(y) - f_n(x)}{y - x} \leq M$$

En posant $A = \max(|m|, |M|)$ on a

$$\forall n \geq 1, \forall x, y \in K, |f_n(x) - f_n(y)| \leq A|x - y|$$

□

En passant à la limite sur n dans l'inégalité précédente, on montre facilement que f est A -lipschitzienne.

Montrons que f_n converge vers f uniformément sur K .

Soit $\varepsilon > 0$.

Posons $N = \lfloor \frac{3A}{\varepsilon} \rfloor + 1$ et $x_k = \frac{k}{N}$ pour $k \in \llbracket 1, N - 1 \rrbracket$.

Par convergence simple des f_n on dispose de N' tel que

$$n \geq N' \implies \forall k \in \llbracket 1, N - 1 \rrbracket, |f(x_k) - f_n(x_k)| \leq \frac{\varepsilon}{3}$$

Posons $N'' = \max(N, N')$ et considérons $n \geq N''$ et $x \in K$.

Par construction il existe $i \in \llbracket 1, N - 1 \rrbracket$ tel que $|x - x_i| \leq \frac{\varepsilon}{3A}$, de sorte que

$$\begin{aligned} |f(x) - f_n(x)| &\leq |f(x) - f(x_i)| + |f(x_i) - f_n(x_i)| + |f_n(x_i) - f_n(x)| \\ &\leq A|x - x_i| + \frac{\varepsilon}{3} + A|x - x_i| \\ &\leq \varepsilon \end{aligned}$$

On a donc montré que $\forall n \geq N'', \forall x \in K, |f(x) - f_n(x)| \leq \varepsilon$, d'où la convergence uniforme.

Exercice 5.10

Soit f_1, \dots, f_n des fonctions convexes de $[a, b]$ dans \mathbb{R} et $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, convexe et croissante en chaque variable.
 Montrer que $F : x \mapsto g(f_1(x), \dots, f_n(x))$ est convexe sur $[a, b]$.

Soient $x, y \in [a, b]$ et $\lambda \in [0, 1]$. On a

$$F((1 - \lambda)x + \lambda y) = g(f_1((1 - \lambda)x + \lambda y), \dots, f_n((1 - \lambda)x + \lambda y))$$

La convexité de chaque f_i et la croissance de g en chaque argument donne

$$\begin{aligned} F((1 - \lambda)x + \lambda y) &\leq g((1 - \lambda)f_1(x) + \lambda f_1(y), \dots, (1 - \lambda)f_n(x) + \lambda f_n(y)) \\ &= g((1 - \lambda)(f_1(x), \dots, f_n(x)) + \lambda(f_1(y), \dots, f_n(y))) \\ &\leq (1 - \lambda)g(f_1(x), \dots, f_n(x)) + \lambda g(f_1(y), \dots, f_n(y)) \quad \text{par convexité de } g \\ &= (1 - \lambda)F(x) + \lambda F(y) \end{aligned}$$

Donc F convexe.

Exercice 5.11

Soit $n \geq 1$ et $f : (\mathbb{R}_+^*)^n \rightarrow \mathbb{R}$ définie par

$$f(x_1, \dots, x_n) = \left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{1/n}$$

Montrer que f est concave.

f admet clairement des dérivées partielles à l'ordre 1 données par

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n) = \left(\prod_{j \neq i} x_j \right)^{1/n} \cdot \frac{1}{n} \cdot x_i^{1/n-1} = \frac{1}{n} \frac{f(x_1, \dots, x_n)}{x_i}$$

f admet alors clairement des dérivées partielles d'ordre 2 données par

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(x_1, \dots, x_n) = \begin{cases} \frac{f(x_1, \dots, x_n)}{n^2} \frac{1}{x_i x_j} & \text{si } i \neq j \\ -\frac{n-1}{n^2} f(x_1, \dots, x_n) \frac{1}{x_i^2} & \text{si } i = j \end{cases}$$

Chacune de ces fonctions est clairement continue, donc f est C^2 .

Soit $(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ fixé dans la suite. La Hessienne de f en (x_1, \dots, x_n) est donnée par

$$H(f)(x_1, \dots, x_n) = \frac{f(x_1, \dots, x_n)}{n^2} \begin{pmatrix} -\frac{n-1}{x_1^2} & & & \\ & \ddots & & \\ & & \frac{1}{x_i x_j} & \\ & & & \ddots \\ & \frac{1}{x_i x_j} & & & -\frac{n-1}{x_n^2} \end{pmatrix}$$

En posant $y = \begin{pmatrix} \frac{1}{x_1} \\ \vdots \\ \frac{1}{x_n} \end{pmatrix}$ et $J = \begin{pmatrix} \frac{1}{x_1^2} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{1}{x_n^2} \end{pmatrix} = \text{diag}(\frac{1}{x_1^2}, \dots, \frac{1}{x_n^2})$
on réécrit simplement

$$H(f)(x_1, \dots, x_n) = \underbrace{\frac{f(x_1, \dots, x_n)}{n^2}}_{\text{constante positive}} (yy^T - nJ)$$

Il suffit de prouver que $yy^T - nJ$ est semi-définie négative. Considérons $v \in \mathbb{R}^n$.
On a

$$\begin{aligned} v^T (yy^T - nJ) v &= (y^T v)^T y^T v - n v^T J v \\ &= \left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{x_i} \right)^2 - n \sum_{i=1}^n \frac{v_i^2}{x_i^2} \end{aligned}$$

Or, par Cauchy-Schwarz dans \mathbb{R}^n muni du produit scalaire euclidien canonique,

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{x_i} &= \sum_{i=1}^n 1 \cdot \frac{v_i}{x_i} \\ &\leq \sqrt{\sum_{i=1}^n 1^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{v_i^2}{x_i^2}} \end{aligned}$$

En passant au carré on obtient

$$\left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{x_i} \right)^2 - n \sum_{i=1}^n \frac{v_i^2}{x_i^2} \leq 0$$

donc

$$v^T (yy^T - nJ) v \leq 0$$

d'où $H(f)(x_1, \dots, x_n)$ semi-définie négative, et ceci pour tout $(x_1, \dots, x_n) \in (\mathbb{R}_+^*)^n$ donc f concave.

Exercice 5.12

Soit $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \mapsto x^2 + y^2 + xy$.

1. Montrer que f est convexe.
2. On pose $x = r \cos(\alpha)$ et $y = r \sin(\alpha)$.
Exprimer $\frac{\partial f}{\partial x}$ et $\frac{\partial f}{\partial y}$ en fonction de $\frac{\partial f}{\partial r}$ et $\frac{\partial f}{\partial \alpha}$

1. f est C^2 de Hessienne

$$H(f)(x, y) = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Son déterminant est 3, les deux valeurs propres sont donc de même signe et non nulles. Sa trace est 4, les deux valeurs propres sont donc strictement positives. Donc $H(f)(x, y)$ est symétrique définie positive, et ceci pour tout $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ donc f est convexe.

2. Avec la formule de calcul des dérivées partielles d'une composée,

$$\frac{\partial f}{\partial r} = \cos(\alpha) \frac{\partial f}{\partial x} + \sin(\alpha) \frac{\partial f}{\partial y}$$

et

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = -r \sin(\alpha) \frac{\partial f}{\partial x} + r \cos(\alpha) \frac{\partial f}{\partial y}$$

Exercice 5.13

Pour $x > 0$ et $y > 1$ on pose $F(x, y) = x^\alpha (\ln y)^\beta$ où α et β sont deux paramètres donnés.

1. Calculer les dérivées partielles d'ordre 1 et 2 de F .
2. Montrer que si F est concave alors $\alpha \in [0, 1]$ et $\beta \geq 0$.
3. Montrer que si $\alpha \in [0, 1]$ et $\beta \geq 0$ alors F est concave sur l'ensemble

$$C = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2, x > 0 \text{ et } \ln y > \frac{\beta}{1-\alpha} - 1\}$$

4. Plus généralement, pour I et J deux intervalles ouverts de \mathbb{R} , $f \in C^2(I, \mathbb{R})$ et $g \in C^2(J, \mathbb{R})$ on considère

$$F : I \times J \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \mapsto f(x)g(y)$$

- (a) Montrer que si F est concave avec $f > 0$ et $g > 0$ alors f et g sont concaves.
- (b) Montrer que si $f > 0$, $g > 0$ avec f^2 et g^2 concaves, alors F est concave.

1. F est clairement C^2 , de dérivées partielles

$$\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) &= \alpha x^{\alpha-1} (\ln y)^\beta \\ \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) &= \beta \frac{x^\alpha (\ln y)^{\beta-1}}{y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial^2 x}(x, y) &= \alpha(\alpha-1) x^{\alpha-2} (\ln y)^\beta \\ \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}(x, y) &= \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x, y) = \alpha \beta \frac{x^{\alpha-1} (\ln y)^{\beta-1}}{y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial^2 y}(x, y) &= \frac{\beta x^\alpha (\ln y)^{\beta-2}}{y^2} (\beta - 1 - \ln y)\end{aligned}$$

La Hessienne de F en (x, y) s'écrit donc

$$H(F)(x, y) = \underbrace{x^{\alpha-2} (\ln y)^{\beta-2}}_{\text{constante positive}} \begin{pmatrix} \alpha(\alpha-1)(\ln y)^2 & \frac{\alpha\beta x \ln y}{y} \\ \frac{\alpha\beta x \ln y}{y} & \frac{\beta x^2}{y^2} (\beta - 1 - \ln y) \end{pmatrix}$$

2. On suppose F concave, donc $H(F)(x, y)$ est semi-définie négative pour tout (x, y) . Comme $x^{\alpha-2} (\ln y)^{\beta-2}$ est une constante positive, la matrice

$$\begin{pmatrix} \alpha(\alpha-1)(\ln y)^2 & \frac{\alpha\beta x \ln y}{y} \\ \frac{\alpha\beta x \ln y}{y} & \frac{\beta x^2}{y^2} (\beta - 1 - \ln y) \end{pmatrix}$$

est semi-définie négative.

Son déterminant, qui est donc ≥ 0 , vaut

$$\frac{\alpha\beta x^2 (\ln y)^2 ((1-\alpha) \ln y + 1 - \alpha - \beta)}{y^2}$$

Ceci implique $\forall y > 1$, $\alpha\beta((1-\alpha) \ln y + 1 - \alpha - \beta) \geq 0$

Par des considérations asymptotiques, le facteur devant le log doit être ≥ 0 ie $\alpha\beta(1-\alpha) \geq 0$.

On a aussi

$$(1, 0) \cdot \begin{pmatrix} \alpha(\alpha-1)(\ln y)^2 & \frac{\alpha\beta x \ln y}{y} \\ \frac{\alpha\beta x \ln y}{y} & \frac{\beta x^2}{y^2} (\beta - 1 - \ln y) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \leq 0$$

qui s'écrit $\alpha(\alpha-1)(\ln y)^2 \leq 0$, donc $\alpha(\alpha-1) \leq 0$, donc $\alpha \in [0, 1]$.

Par ailleurs, l'inégalité $\alpha\beta(1-\alpha) \geq 0$ devient $\beta \geq 0$.

3. On suppose $\alpha \in [0, 1]$ et $\beta \geq 0$. Montrons que F est concave sur C . Comme C est un convexe ouvert, il suffit de montrer que $H(F)(x, y)$ est semi-définie

négative pour tout (x, y) dans C .

On rappelle le lemme très pratique en dimension 2 :

Lemme : (Conditions de Monge)

Soit $A = \begin{pmatrix} r & s \\ s & t \end{pmatrix}$ une matrice symétrique.

Si $rt - s^2 \geq 0$ et $r \geq 0$ alors A est semi-définie positive.

Si $rt - s^2 \geq 0$ et $r \leq 0$ alors A est semi-définie négative.

Preuve : A étant symétrique, elle est semblable à $D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$. La condition $rt - s^2 \geq 0$ est équivalente à $\det A \geq 0$, ie $\lambda_1 \lambda_2 \geq 0$ donc λ_1 et λ_2 de même signe. On a par ailleurs $rt \geq s^2 \geq 0$ donc r et t ont même signe. Or $\text{Tr}(A) = r + t = \lambda_1 + \lambda_2$. Le signe de λ_1 est donc celui de r ce qui achève la preuve.

Dans notre cas, la condition $\ln y > \frac{\beta}{1-\alpha} - 1$ implique $(1-\alpha) \ln y + 1 - \alpha - \beta > 0$, donc $\alpha\beta((1-\alpha) \ln y + 1 - \alpha - \beta) \geq 0$ d'où $\det(H(F)(x, y)) \geq 0$ pour tout $(x, y) \in C$.

Enfin, $H(F)(x, y)_{11} = x^{\alpha-2}(\ln y)^{\beta-2} \underbrace{\alpha(\alpha-1)}_{\leq 0} (\ln y)^2 \leq 0$ et d'après le lemme,

$H(F)(x, y)$ est semi-définie négative.

4. a) On suppose F concave. On a

$$H(F)(x, y) = \begin{pmatrix} f''(x)g(y) & f'(x)g'(y) \\ f'(x)g'(y) & f(x)g''(y) \end{pmatrix}$$

Comme $H(F)(x, y)$ est semi-définie négative,

$$(1, 0) \cdot H(F)(x, y) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \leq 0$$

ie $f''(x)g(y) \leq 0$. Comme $g > 0$, $f''(x) \leq 0$ et ceci pour tout $x \in I$. Donc f concave.

De même on prouve que g est concave.

b) f^2 et g^2 étant concaves et C^2 sur des intervalles ouverts, on a $(f^2)'' = 2(f'^2 + ff'') \leq 0$ ie $0 \leq f'^2 \leq ff''$ et $0 \leq g'^2 \leq gg''$. En multipliant ces deux dernières inégalités entre elles on a

$$\forall (x, y) \in I \times J, (f''(x)g(y))(f(x)g''(y)) \geq (f'(x)g'(y))^2$$

ie $\det(H(F)(x, y)) \geq 0$.

Par ailleurs, $f'^2(x) \leq f(x)f''(x)$ implique $f(x)f''(x) \leq -f'^2(x) \leq 0$ et comme $f > 0$, on a $f''(x) \leq 0$. Donc

$$H(F)(x, y)_{11} = f''(x)g(y) \leq 0 \quad \text{car } g > 0$$

D'après le lemme, $H(F)(x, y)$ est semi-définie négative, et ceci pour tout $(x, y) \in I \times J$ (qui est un ouvert convexe), donc F est concave sur $I \times J$.

Exercice 5.14

Soient $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ convexe et $\varphi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$.

1. φ étant à support compact, montrer que $F : x \mapsto \int_{-\infty}^{\infty} f(x-t)\varphi(t)dt$ est convexe.
2. On suppose $f > 0$ croissante et C^1 sur $[a, b]$.
Montrer que l'on peut prolonger f à $]-\infty, b]$ de manière à ce que la fonction prolongée soit encore convexe, croissante, strictement positive, C^1 , et constante sur un intervalle de la forme $]-\infty, \alpha]$.
3. Soient f, g convexes, strictement positives, croissantes et C^1 sur $[a, b]$. Montrer que fg est convexe sur $[a, b]$.

1. Soient $x, y \in \mathbb{R}$ et $\lambda \in [0, 1]$. Pour $t \in \mathbb{R}$ on a par convexité de f ,

$$f((1-\lambda)x + \lambda y - t) = f((1-\lambda)(x-t) + \lambda(y-t)) \leq (1-\lambda)f(x-t) + \lambda f(y-t)$$

En intégrant cette inégalité suivant t on obtient le résultat voulu.

2.

Correction proposée par Yannick Guyonvarch

On définit pour tout y

$$f'_+(y) = \lim_{x \rightarrow y, x \geq y} \frac{f(x) - f(y)}{x - y}$$

$$f'_-(y) = \lim_{x \rightarrow y, x \leq y} \frac{f(x) - f(y)}{x - y}$$

Si $f'_+(a) = 0$, le résultat est immédiat car en posant $f(x) = f(a)$ pour tout $x \in]-\infty, a]$ on a construit un prolongement C^1 de f qui vérifie toutes les contraintes du problème.

Nous nous intéressons donc au cas où $f'_+(a) > 0$. Posons $g : x \mapsto e(x - \alpha)^2 + d$ avec $\alpha < a$ le point à déterminer tel que pour tout $x \leq \alpha$, on prolonge f par $h : x \mapsto g(\alpha) = d$. Nous devons donc trouver un triplet (e, α, d) qui satisfait au contraintes du problème, à savoir

$$g \text{ croissante et } C^1, \quad g'(\alpha) = 0, \quad g'(a) = f'(a), \quad 0 < g(\alpha) < f(a), \quad g(a) = f(a), \quad \alpha < a$$

g est bien C^1 et $g'(\alpha) = 0$. Par ailleurs

$$g'(a) = f'(a) \iff 2e(a - \alpha) = f'(a) \iff e = \frac{f'(a)}{2(a - \alpha)}$$

$$g(a) = f(a) \iff e(a - \alpha)^2 + d = f(a) \iff d = f(a) - \frac{f'(a)(a - \alpha)}{2}$$

e respecte la contrainte $e > 0$ (pour avoir g croissante) dès que $\alpha < a$. De la même manière $d < f(a)$ à la même condition.

Trouvons $\alpha < a$ tel que $0 < d$

$$d > 0 \iff \alpha > a - \frac{2f(a)}{f'(a)}$$

Ainsi en prenant $\alpha \in]a - \frac{2f(a)}{f'(a)}, a[$ on a bien construit un prolongement C^1 de f qui vérifie toutes les conditions.

3. *Correction proposée par Yannick Guyonvarch*
 Pour tout $x \in [a, b]$, $f(x)g(x) > 0$ et $h : x \mapsto f(x)g(x)$ admet une dérivée $h'(x) = f'(x)g(x) + f(x)g'(x)$.
 Soit $x_1 \leq x_2$.

$$\begin{aligned} h'(x_1) &= f'(x_1)g(x_1) + f(x_1)g'(x_1) \\ &\leq f'(x_1)g(x_2) + f(x_2)g'(x_1) \text{ car } f \text{ et } g \text{ sont croissantes} \\ &\leq f'(x_2)g(x_2) + f(x_2)g'(x_2) \text{ car } f \text{ et } g \text{ de dérivée croissante} \\ &= h'(x_2) \end{aligned}$$

h' est donc croissante sur $[a, b]$ donc $f \times g$ est convexe sur $[a, b]$.

Exercice 5.15

Soit K un convexe fermé de \mathbb{R}^n et P la projection sur K .
 Montrer que $\varphi : x \mapsto \|x - P(x)\|$ est convexe.

Soient $x, y \in K$ et $\lambda \in [0, 1]$.

Comme K est convexe, $(1 - \lambda)P(x) + \lambda P(y) \in K$, donc par définition de P ,

$$\begin{aligned} \varphi((1 - \lambda)x + \lambda y) &= \|(1 - \lambda)x + \lambda y - P((1 - \lambda)x + \lambda y)\| \\ &\leq \|(1 - \lambda)x + \lambda y - [(1 - \lambda)P(x) + \lambda P(y)]\| \\ &= \|(1 - \lambda)(x - P(x)) + \lambda(y - P(y))\| \\ &\leq (1 - \lambda)\|x - P(x)\| + \lambda\|y - P(y)\| \\ &= (1 - \lambda)\varphi(x) + \lambda\varphi(y) \end{aligned}$$

Donc φ convexe.

Exercice 5.16

Soient $f, g : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathbb{R}$ définies par $f(x, y) = x^\alpha + y^\beta$ et $g(x, y) = x^\alpha y^\beta$
Etudier la concavité et la convexité de f et g .

f est clairement C^2 de Hessienne $H(f)(x, y) = \begin{pmatrix} \alpha(\alpha-1)x^{\alpha-2} & 0 \\ 0 & \beta(\beta-1)y^{\beta-2} \end{pmatrix}$

Cette matrice est diagonale.

f est concave $\iff H(f)(x, y)$ semi-définie négative pour tout (x, y)
 $\iff \alpha(\alpha-1) \leq 0$ et $\beta(\beta-1) \leq 0$ (car $x > 0$ et $y > 0$)
 $\iff \alpha \in [0, 1]$ et $\beta \in [0, 1]$

f est convexe $\iff H(f)(x, y)$ semi-définie positive pour tout (x, y)
 $\iff \alpha(\alpha-1) \geq 0$ et $\beta(\beta-1) \geq 0$ (car $x > 0$ et $y > 0$)
 $\iff \alpha \notin]0, 1[$ et $\beta \notin]0, 1[$

g est clairement C^2 de Hessienne $H(g)(x, y) = x^{\alpha-2}y^{\beta-2} \begin{pmatrix} \alpha(\alpha-1)y^2 & \alpha\beta xy \\ \alpha\beta xy & \beta(\beta-1)x^2 \end{pmatrix}$

Posons donc $A(x, y) = \begin{pmatrix} \alpha(\alpha-1)y^2 & \alpha\beta xy \\ \alpha\beta xy & \beta(\beta-1)x^2 \end{pmatrix}$ de sorte que $H(g)(x, y)$ est semi-définie positive/négative si et seulement si $A(x, y)$ l'est (car $x^{\alpha-2}y^{\beta-2} \geq 0$).

Le lemme du 5.13 (qui admet une réciproque facile à montrer) permet d'affirmer que

g est concave $\iff H(g)(x, y)$ semi-définie négative pour tout (x, y)
 $\iff A(x, y)$ semi-définie négative pour tout (x, y)
 $\iff \det A \geq 0$ et $A(x, y)_{11} \leq 0$ pour tout (x, y)
 $\iff \alpha\beta(1-\alpha-\beta) \geq 0$ et $\alpha(\alpha-1) \leq 0$
 $\iff \alpha \in [0, 1]$ et $\beta \in [0, 1-\alpha]$

g est convexe $\iff H(g)(x, y)$ semi-définie positive pour tout (x, y)
 $\iff A(x, y)$ semi-définie positive pour tout (x, y)
 $\iff \det A \geq 0$ et $A(x, y)_{11} \geq 0$ pour tout (x, y)
 $\iff \alpha\beta(1-\alpha-\beta) \geq 0$ et $\alpha(\alpha-1) \geq 0$
 $\iff \begin{cases} \alpha \leq 0 \\ \beta \leq 0 \end{cases} \text{ ou } \begin{cases} \alpha \leq 0 \\ \beta \geq 1-\alpha \end{cases} \text{ ou } \begin{cases} \alpha \geq 1 \\ 1-\alpha \leq \beta \leq 0 \end{cases}$

Exercice 5.17

Soit $P \in \mathbb{R}[X]$. On suppose que P est convexe sur \mathbb{R} . Montrer que P admet au plus deux racines réelles.

On suppose par l'absurde que P admet 3 racines réelles distinctes : $a < b < c$.
D'après le théorème de Rolle, il existe $\xi \in]a, b[$ et $\zeta \in]b, c[$ tels que $P'(\xi) =$

$P'(\zeta) = 0$. Or P est convexe sur \mathbb{R} , donc P' est croissante, donc $P'(x) = 0$ pour tout $x \in [\xi, \zeta]$. P' est donc un polynôme qui admet une infinité de racines, absurde.

Exercice 5.18

Soit $f : \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \rightarrow \sqrt{xy}$

1. Montrer que f est quasi-concave sur $\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+$
2. Montrer que f est strictement quasi-concave.
3. Montrer que f est concave.

1. Montrons que les upper-contour sets de f sont convexes ie que pour tout $a \in \mathbb{R}$, $S(a) := \{(x, y) \in \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}_+, f(x, y) \geq a\}$ est convexe.

Soit $a \in \mathbb{R}$. Si $a < 0$, $S(a) = \emptyset$. Si $a = 0$, $S(a) = (\mathbb{R}_+)^2$.

Si $a > 0$, $S(a) = \{(x, y) \in \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}_+^*, y \geq \frac{a^2}{x^2}\}$ Il s'agit de l'épigraphe de la fonction convexe $x \mapsto \frac{a}{x^2}$, donc $S(a)$ est convexe.

2. On peut reprendre le cheminement du 1. de l'exercice 5.19 : montrer que $\ln f$ est strictement concave, puis composer par exp.

3. f est C^2 sur tout ouvert de \mathbb{R}^2 inclus dans $\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+$, de Hessienne

$$H(f)(x, y) = \begin{pmatrix} -\frac{y^2}{4(xy)^{3/2}} & \frac{1}{2\sqrt{xy}} - \frac{xy}{4(xy)^{3/2}} \\ \frac{1}{2\sqrt{xy}} - \frac{xy}{4(xy)^{3/2}} & -\frac{x^2}{4(xy)^{3/2}} \end{pmatrix}$$

Son déterminant est 0 et $H(f)(x, y)_{11} \leq 0$. Le lemme du 5.13 permet de conclure que f est concave sur tout ouvert de \mathbb{R}^2 inclus dans $\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+$, donc concave sur l'intérieur de $\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+$.

On obtient la concavité aux points de la frontière en les approchant par des points de l'intérieur et en utilisant la continuité de f sur $\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+$.

Exercice 5.19

Etudier la concavité et la quasi-concavité (stricte ou non) des fonctions suivantes sur \mathbb{R}^n

1. $f(x) = \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i}$ où $\alpha_i > 0$
2. $f(x) = \min(\frac{x_i}{\alpha_i})$ où $\alpha_i > 0$

1. On introduit quelques notions adéquates :

- On dit que $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est strictement concave si pour tout $x, y \in \mathbb{R}^n$ avec $x \neq y$, pour tout $\lambda \in]0, 1[$, $f((1 - \lambda)x + \lambda y) > (1 - \lambda)f(x) + \lambda f(y)$.

• **Lemme 1** : Si $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est strictement concave et $\varphi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ est strictement croissante, alors $\varphi \circ f$ est strictement quasi-concave.

Preuve : Soient $x, y \in \mathbb{R}^n$ avec $x \neq y$ et $\lambda \in]0, 1[$. Par stricte concavité de f , $f((1-\lambda)x + \lambda y) > (1-\lambda)f(x) + \lambda f(y)$ et en composant par φ ,

$$\varphi(f((1-\lambda)x + \lambda y)) > \varphi((1-\lambda)f(x) + \lambda f(y)) > \varphi(\min(f(x), f(y))) = \min(\varphi(f(x)), \varphi(f(y)))$$

donc $\varphi \circ f$ strictement quasi-concave.

• **Lemme 2** : Soit U un ouvert de \mathbb{R}^n et $f : U \rightarrow \mathbb{R}$. Si $H(f)(x)$ est définie négative pour tout $x \in U$, alors f est strictement concave sur U .

Preuve : Résultat classique qu'on trouvera dans n'importe quel livre d'analyse convexe.

• Revenons au problème. On se limite d'abord à l'étude sur $(\mathbb{R}_+^*)^n$.

On va montrer que $\ln f$ est strictement concave. Par le lemme 1, on aura f strictement quasi-concave. La Hessienne de $\ln f$ est très facile à calculer :

$$H(\ln f)(x) = \text{diag}\left(-\frac{\alpha_1}{x_1^2}, \dots, -\frac{\alpha_n}{x_n^2}\right)$$

Les valeurs propres sont < 0 , donc $H(\ln f)(x)$ est définie négative pour tout $x \in (\mathbb{R}_+^*)^n$ et d'après le lemme 2, $\ln f$ est strictement concave. f est donc strictement quasi-concave sur $(\mathbb{R}_+^*)^n$.

Le résultat tombe en défaut sur \mathbb{R}^n : on considère $x = (0, \dots, 0)$, $y = (0, \dots, 0, 1)$ et $\lambda = \frac{1}{2}$. Alors

$$f\left(\frac{1}{2}x + \frac{1}{2}y\right) = f\left(0, \dots, 0, \frac{1}{2}\right) = 0 = f(x) = f(y)$$

• On étudie ensuite la concavité de f sur $(\mathbb{R}_+^*)^n$.

On calcule

$$\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x_i}(x) = \alpha_i(\alpha_i - 1) \frac{f(x)}{x_i^2}$$

et

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(x) = \alpha_i \alpha_j \frac{f(x)}{x_i x_j}$$

Posons $y = \begin{pmatrix} \frac{\alpha_1}{x_1} \\ \vdots \\ \frac{\alpha_n}{x_n} \end{pmatrix}$ et $D = \begin{pmatrix} \frac{\alpha_1}{x_1} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{\alpha_n}{x_n} \end{pmatrix} = \text{diag}\left(\frac{\alpha_1}{x_1}, \dots, \frac{\alpha_n}{x_n}\right)$, de sorte que

$$H(f)(x) = f(x)(yy^T - D)$$

et pour tout $v \in \mathbb{R}^n$,

$$\begin{aligned} v^T H(f)(x) v &= f(x)[(y^T v)^T (y^T v) - v^T D v] \\ &= f(x) \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i v_i}{x_i} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i v_i^2}{x_i^2} \right] \end{aligned}$$

Or, par Cauchy-Schwarz dans \mathbb{R}^n ,

$$\left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i v_i}{x_i} \right)^2 = \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{\alpha_i} \frac{\sqrt{\alpha_i} v_i}{x_i} \right)^2 \leq \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i v_i^2}{x_i^2} \right)$$

Donc

$$v^T H(f)(x) v \leq f(x) \left[\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \right) - 1 \right] \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i v_i^2}{x_i^2}$$

Par conséquent, si $\sum_{i=1}^n \alpha_i \leq 1$, $v^T H(f)(x) v \leq 0$ pour tout $v \in \mathbb{R}^n$ et $x \in (\mathbb{R}_+^*)^n$, donc f est concave.

- Pour $n = 1$, f est clairement convexe si $\alpha_1 \geq 1$ et concave si $\alpha_1 \leq 1$.
- Il reste à prouver que f n'est ni concave ni convexe lorsque $n \geq 2$ et $\sum_{i=1}^n \alpha_i > 1$.

On suppose par l'absurde que f est convexe ou concave. Notons $\mathbf{1} = (1, \dots, 1) \in \mathbb{R}^n$. Alors pour tout $x \in \mathbb{R}^n$, on a

$$f(x) \text{ ? } f(\mathbf{1}) + df(\mathbf{1})(x - \mathbf{1})$$

où le signe ? dénote \geq ou \leq selon que f est convexe ou concave, respectivement. En notant que $\nabla(f)(x) = f(x)(\frac{\alpha_1}{x_1}, \dots, \frac{\alpha_n}{x_n})$, on réécrit

$$f(x) \text{ ? } f(\mathbf{1}) + \langle \nabla(f)(\mathbf{1}), x - \mathbf{1} \rangle$$

ie

$$f(x) \text{ ? } 1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (x_i - 1)$$

En évaluant en $x = 0$,

$$0 \text{ ? } 1 - \sum_{i=1}^n \alpha_i$$

Avec l'hypothèse qu'on a faite sur $\sum_{i=1}^n \alpha_i$, on en déduit que ? doit être remplacé par \geq , de sorte qu'on a pour tout $x \in \mathbb{R}^n$,

$$f(x) \geq 1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (x_i - 1)$$

En évaluant pour $x = (a, 0, \dots, 0)$,

$$0 \geq 1 + \alpha_1 (a - 1)$$

Avec $a \rightarrow \infty$ on obtient une contradiction. Donc f n'est ni concave, ni convexe.

2. f étant un minimum de fonctions concaves, elle est concave, donc quasi-concave.

f n'est pas strictement quasi-concave. Il suffit de considérer $x = (0, \dots, 0)$, $y = (0, \dots, 0, 1)$ et $\lambda = \frac{1}{2}$.

Exercice 5.20

Soient C un convexe de \mathbb{R}^n et $f : C \rightarrow \mathbb{R}$.

1. Montrer que f est concave si et seulement si

$$K := \{(x, z) \in C \times \mathbb{R}, z < f(x)\}$$

est convexe dans \mathbb{R}^{n+1} .

2. On suppose f concave et x_0 un point intérieur à C . Montrer qu'il existe $L \in \mathcal{L}_c(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$ tel que pour tout $x \in C$,

$$f(x) - f(x_0) \leq L(x - x_0)$$

1. \implies On suppose f concave. Soient $(x_1, z_1), (x_2, z_2) \in K$ et $\lambda \in [0, 1]$. Par concavité de f ,

$$\begin{aligned} f((1-\lambda)x_1 + \lambda x_2) &\geq (1-\lambda)f(x_1) + \lambda f(x_2) \\ &> (1-\lambda)z_1 + \lambda z_2 \end{aligned}$$

Donc $((1-\lambda)x_1 + \lambda x_2, (1-\lambda)z_1 + \lambda z_2) \in K$ ie $(1-\lambda)(x_1, z_1) + \lambda(x_2, z_2) \in K$.
Donc K convexe.

\Leftarrow On suppose K convexe. Soient $x, y \in C$ et $\lambda \in [0, 1]$. Considérons z_1 et z_2 des réels tels que $f(x) > z_1$ et $f(y) > z_2$, de sorte que (x, z_1) et $(y, z_2) \in K$. Par convexité de K on a

$$f((1-\lambda)x + \lambda y) > (1-\lambda)z_1 + \lambda z_2$$

En faisant $z_1 \nearrow f(x_1)$ et $z_2 \nearrow f(x_2)$, on obtient

$$f((1-\lambda)x + \lambda y) \geq (1-\lambda)f(x_1) + \lambda f(x_2)$$

Donc f concave.

2. On rappelle deux théorèmes importants qu'on va utiliser dans la suite :

Théorème 1 : Soit K un convexe de \mathbb{R}^n . Alors $\overset{\circ}{\bar{K}} = \overset{\circ}{K}$.

Théorème 2 : Soit K un convexe fermé de \mathbb{R}^n et x_0 un point de la frontière de K . Alors il existe un hyperplan d'appui à K en x_0 . Plus précisément, il existe

$e \in \mathbb{R}^n$ tel que $K \subset \{x \in \mathbb{R}^n, \langle e, x - x_0 \rangle \geq 0\}$

Par continuité de f en x_0 (qui est bien intérieur à C), on montre facilement que $(x_0, f(x_0)) \notin \overset{\circ}{K}$. Par ailleurs, on a $(x_0, f(x_0)) \in K$. Donc

$$(x_0, f(x_0)) \in K \setminus \overset{\circ}{K} \subset \overline{K} \setminus \overset{\circ}{K}$$

Par le théorème 1 on a

$$(x_0, f(x_0)) \in \overline{K} \setminus \overset{\circ}{K}$$

Or $\overline{K} \setminus \overset{\circ}{K}$ est précisément la frontière de \overline{K} , qui est un convexe fermé.

Par le théorème 2, on dispose donc de $(u^*, \alpha) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ tel que

$$\overline{K} \subset \{(x, z) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}, \langle (u^*, \alpha), (x, z) - (x_0, f(x_0)) \rangle \geq 0\}$$

ce qu'on réécrit

$$\overline{K} \subset \{(x, z) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}, \langle u^*, x - x_0 \rangle \geq \alpha(f(x_0) - z)\}$$

Soit $x \in C$ fixé. Considérons $z \in \mathbb{R}$ tel que $z < f(x)$, de sorte que $(x, z) \in K \subset \overline{K}$.

On a donc $\langle u^*, x - x_0 \rangle \geq \alpha(f(x_0) - z)$ (*)

Choisissons z tel que $z < \min(f(x), f(x_0))$, de sorte que $f(x_0) - z > 0$ et $(x, z) \in K$.

Si $\alpha \geq 0$, (*) implique $\langle u^*, x - x_0 \rangle \geq 0$, ceci étant vrai pour tout $x \in K$.

Comme $x_0 \in \overset{\circ}{K}$, l'inégalité reste vraie sur un voisinage de x_0 , de sorte que pour $t > 0$ suffisamment petit on a

$$\langle u^*, (x_0 - tu^*) - x_0 \rangle \geq 0$$

ie $-\|u^*\|^2 \leq 0$, donc $\|u^*\| = 0$ et $u^* = 0$.

(*) donne alors $0 \geq \alpha(f(x_0) - z)$, donc $z \geq f(x_0)$, en contradiction avec la définition de z .

Donc $\alpha < 0$. On considère $z \in \mathbb{R}$ tel que $z < f(x)$ et on réécrit alors (*) sous la forme

$$\langle \frac{u^*}{\alpha}, x - x_0 \rangle \leq f(x_0) - z$$

En faisant $z \xrightarrow{<} f(x)$, on a

$$\langle \frac{u^*}{\alpha}, x - x_0 \rangle \leq f(x_0) - f(x)$$

donc

$$\langle -\frac{u^*}{\alpha}, x - x_0 \rangle \geq f(x) - f(x_0)$$

En posant $L : x \mapsto \langle -\frac{u^*}{\alpha}, x \rangle$, on a le résultat.

Exercice 5.21

Soit $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ convexe. On suppose qu'il existe $a \in \mathbb{R}$ tel que pour tout $x \in \mathbb{R}$, $f(x) \leq a$. Montrer que f est constante.

Supposons par l'absurde que f n'est pas constante. On dispose alors de a et b tel que $f(a) < f(b)$. Sans perte de généralité on suppose que $a < b$. Par croissance des pentes on a pour tout $x > b$,

$$\frac{f(x) - f(a)}{x - a} \geq \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$

donc

$$f(x) \geq (x - a) \frac{f(b) - f(a)}{b - a} + f(a)$$

Le membre de droite tends vers ∞ lorsque $x \rightarrow \infty$, absurde.

Exercice 5.22

Soit f définie sur $(\mathbb{R}_+)^n$ par

$$f(x) = \left(\sum_{i=1}^n x_i^p \right)^{1/p}$$

A quelle condition f est-elle convexe, concave ?

Dans la suite on notera $S = \sum_{i=1}^n x_i^p$.

f est clairement C^2 en tout point de $(\mathbb{R}_+^*)^n$, de dérivées partielles

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial^2 x_i}(x_1, \dots, x_n) &= S^{1/p-2}(1-p)x_i^{2p-2} + S^{1/p-1}(p-1)x_i^{p-2} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(x_1, \dots, x_n) &= S^{1/p-2}(1-p)x_i^{p-1}x_j^{p-1} \end{aligned}$$

En posant $y = \begin{pmatrix} x_1^{p-1} \\ \vdots \\ x_n^{p-1} \end{pmatrix}$ et $D = \begin{pmatrix} x_1^{p-2} & & \\ & \ddots & \\ & & x_n^{p-2} \end{pmatrix} = \text{diag}(x_1^{p-2}, \dots, x_n^{p-2})$,

la Hessienne de f s'écrit $S^{1/p-2}(1-p)yy^T + S^{1/p-1}(p-1)D$. On a, pour $v \in \mathbb{R}^n$,

$$\begin{aligned} v^T(S^{1/p-2}(1-p)yy^T + S^{1/p-1}(p-1)D)v &= S^{1/p-2}(p-1) [Sv^T Dv - (y^T v)^T (y^T v)] \\ &= S^{1/p-2}(p-1) \left[\sum_{i=1}^n x_i^p \sum_{i=1}^n x_i^{p-2} v_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i^{p-1} v_i \right)^2 \right] \end{aligned}$$

Or, par Cauchy-Schwarz dans \mathbb{R}^n ,

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^n x_i^{p-1} v_i \right)^2 &= \left(\sum_{i=1}^n (x_i^{p/2-1} v_i) x_i^{p/2} \right)^2 \\ &\leq \left(\sum_{i=1}^n x_i^{p-2} v_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i^p \right) \end{aligned}$$

Donc

$$v^T (S^{1/p-2} (1-p) y y^T + S^{1/p-1} (p-1) D) v$$

a même signe que

$$S^{1/p-2} (p-1)$$

Or $S^{1/p-2}$ est ≥ 0 , donc $v^T (S^{1/p-2} (1-p) y y^T + S^{1/p-1} (p-1) D) v$ a le signe de $p-1$, quel que soit v .

En conclusion, f est convexe sur $(\mathbb{R}_+^*)^n$ si et seulement si $p-1 \geq 0$ et concave sur $(\mathbb{R}_+^*)^n$ si et seulement si $p-1 \leq 0$.

La convexité/concavité au bord s'obtient dans les deux cas en approchant par des éléments de $(\mathbb{R}_+^*)^n$ puis en utilisant la continuité de f .

Exercice 5.23

Soient $A, B \in M_n(\mathbb{R})$. On définit $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \|Ax\|^2 + 2\|Bx\|^{3/2}$. Montrer que f est convexe.

Il suffit de remarquer que $x \mapsto \|Ax\|$ est convexe (conséquence directe de l'inégalité triangulaire). On utilise ensuite le lemme

Lemme : Si $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est convexe et $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ est convexe et croissante, alors $g \circ f$ est convexe.

Preuve : Soient $x, y \in \mathbb{R}^n$ et $\lambda \in [0, 1]$. L'inégalité de convexité $f((1-\lambda)x + \lambda y) \leq (1-\lambda)f(x) + \lambda f(y)$ composée par g donne

$$g(f((1-\lambda)x + \lambda y)) \leq g((1-\lambda)f(x) + \lambda f(y)) \leq (1-\lambda)g(f(x)) + \lambda g(f(y))$$

Donc $g \circ f$ convexe.

Ici on compose avec $g : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2$ qui est convexe, donc $x \mapsto \|Ax\|^2$ est convexe.

Pour les mêmes raisons, $x \mapsto 2\|Bx\|^{3/2}$ est convexe, donc f est convexe, comme somme de deux fonctions convexes.

Exercice 5.24

Soit $A \in M_n(\mathbb{R})$ et $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \langle x, Ax \rangle$. Montrer que si f est quasi-convexe, alors f est convexe.

Exercice 5.25

Soit $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, convexe, continue, strictement monotone sur $[a, b]$.
Que de la convexité/concavité de f^{-1} ?

Correction proposée par Yannick Guyonvarch

Ici on ne suppose pas a priori la dérivabilité de f .

Par convexité, on a pour tout $(x_1, x_2) \in [a, b]^2$ et tout $\lambda \in]0, 1[$

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2)$$

On pose $y_1 = f(x_1)$, $y_2 = f(x_2)$, $x_1 = f^{-1}(y_1)$ et $x_2 = f^{-1}(y_2)$ (N.B : ceci est possible car f est continue strictement croissante, donc elle vérifie $x = f^{-1}(f(x))$ pour tout x).

Ainsi

$$f(\lambda f^{-1}(y_1) + (1 - \lambda)f^{-1}(y_2)) \leq \lambda y_1 + (1 - \lambda)y_2$$

f continue strictement croissante sur $[a, b] \implies f^{-1}$ continue, strictement croissante sur $[f(a), f(b)]$. En appliquant f^{-1} à l'inégalité, on en préserve le sens et on obtient

$$\lambda f^{-1}(y_1) + (1 - \lambda)f^{-1}(y_2) \leq f^{-1}(\lambda y_1 + (1 - \lambda)y_2)$$

$\implies f^{-1}$ concave.

6. Compléments

7. Optimisation dans \mathbb{R}^n

Exercice 7.1

Etudier les extrema locaux de $f : x \mapsto x^2 + \lambda x + \mu$ sur $[a, b]$

On distingue plusieurs cas :

- Si $\frac{-\lambda}{2} \geq b$: f est strictement décroissante sur $[a, b]$ donc admet un maximum global strict en a et un minimum global strict en b . Il n'y pas d'autres extrema locaux.
- Si $\frac{-\lambda}{2} \leq a$: f est strictement croissante sur $[a, b]$ donc admet un maximum global strict en b et un minimum global strict en a . Il n'y pas d'autres extrema locaux.
- Si $a < \frac{-\lambda}{2} < b$, f admet un minimum global strict en $\frac{-\lambda}{2}$, f est strictement décroissante sur $[a, \frac{-\lambda}{2}]$ et strictement croissante sur $[\frac{-\lambda}{2}, b]$ donc f admet un maximum local strict en a et b . Il n'y a pas d'autres extremas locaux.

Exercice 7.2

Quels sont les extrema locaux de $f : (x, y) \mapsto \frac{x}{1 + x^2 + y^2}$?

On cherche d'abord les points critiques de f . Le gradient de f en (x, y) est donné par

$$\left(-\frac{x^2 - y^2 - 1}{(x^2 + y^2 + 1)^2}, -\frac{2xy}{(x^2 + y^2 + 1)^2} \right)$$

Il est nul si et seulement si $(x, y) \in \{(-1, 0), (1, 0)\}$.

On rappelle la démarche : si f admet un extremum local, c'est un point critique. Les (**éventuels**) extrema locaux de f se trouvent donc parmi les points critiques. On utilise ensuite les conditions du deuxième ordre pour caractériser les points critiques qu'on a trouvés.

La Hessienne de f en (x, y) est donnée par $H(f)(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{2x(x^2 - 3y^2 - 3)}{(x^2 + y^2 + 1)^3} & \frac{2y(3x^2 - y^2 - 1)}{(x^2 + y^2 + 1)^3} \\ \frac{2y(3x^2 - y^2 - 1)}{(x^2 + y^2 + 1)^3} & -\frac{2x(x^2 - 3y^2 + 1)}{(x^2 + y^2 + 1)^3} \end{pmatrix}$.

En $(1, 0)$, $H(f)(1, 0) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} \end{pmatrix}$ qui est symétrique définie négative. Donc $(1, 0)$ est un maximum local strict de f .

En $(-1, 0)$, $H(f)(-1, 0) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$ qui est symétrique définie positive. Donc $(-1, 0)$ est un minimum local strict de f .

Conclusion : f admet un unique maximum local en $(1, 0)$ et unique minimum local en $(-1, 0)$.

Exercice 7.3

Quels sont les extrema $f : (x, y) \mapsto x^3 + y^3 - 3xy$?

- Le gradient de f en (x, y) est donné par $(3(x^2 - y), -3(x - y^2))$ et les points critiques par $\{(0, 0), (1, 1)\}$.

La Hessienne de f en (x, y) est donnée par $\begin{pmatrix} 6x & -3 \\ -3 & 6y \end{pmatrix}$.

En $(0, 0)$, elle vaut $\begin{pmatrix} 0 & -3 \\ -3 & 0 \end{pmatrix}$ dont le déterminant est $9 < 0$. Elle n'est donc ni semi-définie positive, ni semi-définie négative, donc $(0, 0)$ n'est pas un extremum local (c'est un point-selle en vérité).

En $(1, 1)$, elle vaut $\begin{pmatrix} 6 & -3 \\ -3 & 6 \end{pmatrix}$ dont le déterminant est $27 > 0$ et la trace $12 > 0$. Elle est donc définie positive. $(1, 1)$ est donc un minimum local strict de f .

- Par ailleurs, $f(n, 0) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$ donc f n'admet pas de maximum global.

De même $f(-n, 0) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} -\infty$ donc f n'admet pas de minimum global.

Conclusion : f admet un unique minimum local en $(1, 1)$ et aucun maximum local. Elle n'admet aucun extremum global.

Exercice 7.4

Quels sont les extrema $f : (x, y) \mapsto x(y^2 + \ln^2(x))$?

- Le gradient de f en (x, y) est donné par $(\log^2(x) + 2\log(x) + y^2, 2xy)$ et les points critiques par $\{(1, 0), (e^{-2}, 0)\}$.

La Hessienne de f en (x, y) est donnée par $\begin{pmatrix} \frac{2(\log(x)+1)}{x} & 2y \\ 2y & 2x \end{pmatrix}$.

En $(1, 0)$ elle vaut $\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ qui est définie positive. Donc $(1, 0)$ est un minimum local strict de f .

En $(e^{-2}, 0)$ elle vaut $\begin{pmatrix} -2e^2 & 0 \\ 0 & \frac{2}{e^2} \end{pmatrix}$ qui n'est ni semi-définie positive, ni semi-définie négative. Donc $(e^{-2}, 0)$ n'est pas un extremum local.

- Par ailleurs, $f(n, 0) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$ donc f n'admet pas de maximum global.

Comme x est astreint à être > 0 , on a $f(x, y) \geq 0$ pour tout (x, y) dans le domaine, donc $(1, 0)$ est un minimum global.

Conclusion : f admet un unique minimum local en $(1, 0)$. Elle n'admet pas de maximum local. Elle admet un minimum global atteint en $(1, 0)$. Elle n'admet pas de maximum global.

Exercice 7.5

Etudier les extrema des fonctions suivantes :

1. $f : (x, y) \mapsto x \sin(y) + \cos(x)$
2. l'énoncé manuscrit n'est pas clair
3. $h : (x, y) \mapsto x(\ln^2(x) + y^2)$
4. $\varphi : (x, y, z) \mapsto \frac{x^2}{2} + xyz + y + z$

1. • Le gradient de f en (x, y) est donné par $(\sin(y) - \sin(x), x \cos(y))$ et l'ensemble des points critiques est donné par

$$\{(0, y), \sin(y) = 0\} \cup \{(x, y), \sin(x) = 1 \text{ et } \cos(y) = 0\}$$

La Hessienne de f en (x, y) est donnée par $\begin{pmatrix} -\cos(x) & \cos(y) \\ \cos(y) & -x \sin(y) \end{pmatrix}$.

★ Si $x = 0$ et $\sin(y) = 0$, elle vaut $\begin{pmatrix} -1 & \pm 1 \\ \pm 1 & 0 \end{pmatrix}$ dont le déterminant est -1 . Elle n'est ni semi-définie positive, ni semi-définie négative, donc les éléments de $\{(0, y), \sin(y) = 0\}$ ne sont pas des extrema locaux de f .

★ Si $\sin(x) = 1$ et $\cos(y) = 0$, la Hessienne vaut $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \pm x \end{pmatrix}$. Elle est **semi**-définie positive ou négative selon le signe de $\pm x$, donc on ne peut a priori rien déduire concernant le fait que (x, y) soit un extremum local. En (x, y) , f vaut $\pm x$. On distingue plusieurs cas :

○ si $\sin(y) = 1$: dans ce cas $f(x, y) = x$ et

$$\begin{aligned} f\left(x + \frac{1}{n}, y\right) &= x + \frac{1}{n} + \cos\left(x + \frac{1}{n}\right) \\ &= x + \frac{1}{n} + \cos(x) - \frac{\sin(x)}{n} - \frac{\cos(x)}{2n^2} + \frac{\sin(x)}{6n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right) \\ &= x + \frac{1}{6n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right) \end{aligned}$$

Donc $f\left(x + \frac{1}{n}, y\right) - f(x, y) \sim \frac{1}{6n^3}$, donc $f\left(x + \frac{1}{n}, y\right) - f(x, y) > 0$ à partir d'un certain rang.

Un calcul similaire donne

$$f\left(x + \frac{1}{n}, y\right) = x - \frac{1}{6n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right)$$

Donc $f(x + \frac{1}{n}, y) - f(x, y) < 0$ à partir d'un certain rang.

Tout voisinage de (x, y) contient donc des points (x', y') et (x'', y'') où $f(x, y) < f(x', y')$ et $f(x'', y'') < f(x, y)$, donc (x, y) n'est pas un extremum local.

○ si $\sin(y) = -1$: dans ce cas $f(x, y) = -x$ et

$$\begin{aligned} f(x + \frac{1}{n}, y) &= -x - \frac{1}{n} + \cos\left(x + \frac{1}{n}\right) \\ &= -x - \frac{1}{n} + \cos(x) - \frac{\sin(x)}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right) \\ &= -x - \frac{2}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right) \end{aligned}$$

Donc $f(x + \frac{1}{n}, y) - f(x, y) \sim -\frac{2}{n}$, donc $f(x + \frac{1}{n}, y) - f(x, y) < 0$ à partir d'un certain rang. De même $f(x - \frac{1}{n}, y) - f(x, y) \sim \frac{2}{n}$, donc $f(x - \frac{1}{n}, y) - f(x, y) > 0$ à partir d'un certain rang. Par le même argument que précédemment, (x, y) n'est pas un extremum local.

• Par ailleurs, $f(n, \frac{\pi}{2}) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$ et $f(-n, \frac{\pi}{2}) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} -\infty$ donc f n'admet pas ni maximum global ni minimum global.

Conclusion : f n'admet ni minimum local, ni maximum local, ni minimum global, ni maximum global.

3. A déjà été traité dans 7.4

4. • Le gradient de φ en (x, y) est donné par $(x + yz, xz + 1, xy + 1)$ et les points critiques par $\{(-1, 1, 1)\}$. La Hessienne de φ en (x, y) est donnée par

$$\begin{pmatrix} 1 & z & y \\ z & 0 & x \\ y & x & 0 \end{pmatrix}.$$

En $(-1, 1, 1)$ elle vaut $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$. Ses valeurs propres sont (après calcul

du polynôme caractéristique) $1, \sqrt{3}$ et $-\sqrt{3}$. Elle n'est donc ni semi-définie positive, ni semi-définie négative, donc $(-1, 1, 1)$ n'est pas un extremum local.

• Par ailleurs $\varphi(n, 0, 0) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$ et $\varphi(0, 0, -n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} -\infty$ donc f n'admet ni maximum global, ni minimum global.

Conclusion : f n'admet ni minimum local, ni maximum local, ni minimum global, ni maximum global.

Exercice 7.6

Trouver la plus petite distance entre $(0, 1)$ et la parabole d'équation $x^2 = 2y$.

Le problème à résoudre est le suivant

$$\min_{(x,y) \in \mathbb{R}^2} \|(x,y) - (0,1)\| \quad \text{s.c. } y = \frac{x^2}{2}$$

qu'on peut réécrire, en passant au carré,

$$\min_{x \in \mathbb{R}} \|(x, \frac{x^2}{2}) - (0,1)\|^2$$

ie

$$\min_{x \in \mathbb{R}} x^2 + (\frac{x^2}{2} - 1)^2$$

ie

$$\min_{x \in \mathbb{R}} x^4 + 1$$

Le min est atteint en $x = 0$, où la distance à la parabole vaut 1.

Exercice 7.7

Soit $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_n$ les valeurs propres d'une matrice symétrique A .
Déterminer $\max_{\|x\|=1} x^T A x$ et $\min_{\|x\|=1} x^T A x$.

A étant symétrique, elle est diagonalisable dans une base orthonormée : on dispose de (e_1, \dots, e_n) une famille orthonormée de vecteurs propres de A associés respectivement aux valeurs propres $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_n$.

En écrivant $x = \sum_{i=1}^n x_i e_i$, on a $x^T A x = \langle x, A x \rangle = \langle \sum_{i=1}^n x_i e_i, A \left(\sum_{j=1}^n x_j e_j \right) \rangle$

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_j x_i x_j \langle e_i, e_j \rangle \\ &= \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i^2 \end{aligned}$$

Donc $\lambda_n \|x\|^2 \leq x^T A x \leq \lambda_1 \|x\|^2$. Lorsque $\|x\| = 1$, on obtient $\lambda_n \leq x^T A x \leq \lambda_1$. Ces bornes sont atteintes lorsque $x = e_1$ et $x = e_n$, donc $\max_{\|x\|=1} x^T A x = \lambda_1$ et $\min_{\|x\|=1} x^T A x = \lambda_n$.

Exercice 7.8

Soit $L : \mathbb{R}^n \times R \rightarrow \mathbb{R}_+$, $(x_1, \dots, x_n, \theta) \rightarrow L(x_1, \dots, x_n, \theta)$.

On suppose L de classe C^2 par rapport à θ . On cherche $\hat{\theta}$ tel que $L(x_1, \dots, x_n, \hat{\theta}) = \max_{\theta} L(x_1, \dots, x_n, \theta)$.

1. Montrer que $\hat{\theta}$ est solution du système

$$\frac{\partial \log L}{\partial \theta} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial^2 \log L}{\partial \theta^2} < 0$$

2. Déterminer $\hat{\theta}$ dans les cas suivants :

- (a) $L(x, \theta) = \binom{n}{x} \theta^x (1 - \theta)^{n-x}$ où $x \in \llbracket 0, n \rrbracket$.
- (b) $L(x_1, \dots, x_n, \theta) = e^{-n\theta} \frac{\theta^{\sum_{i=1}^n x_i}}{\prod_{i=1}^n x_i!}$ où $x_i \in \mathbb{N}$.
- (c) $L(x_1, \dots, x_n, \theta) = \frac{1}{\theta^n} \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} e^{-\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{2\theta^2}}$ où $m \in \mathbb{R}$.

1. Sans hypothèse de concavité en θ sur L , tout ce qu'on peut affirmer est que si $\frac{\partial \log L}{\partial \theta}(\hat{\theta}) = 0$ et $\frac{\partial^2 \log L}{\partial \theta^2}(\hat{\theta}) < 0$, alors $\hat{\theta}$ est un maximum local de $\log L$, donc un maximum local de L .

2. a) Pour $x \in \llbracket 0, n \rrbracket$ fixé, on cherche $\max_{\theta \in [0,1]} L(x, \theta)$. Il suffit de chercher $\max_{\theta \in]0,1[} \log L(x, \theta)$ (par continuité de $L(x, \cdot)$, le maximum obtenu majorera aussi les bords).

On a $\log L(x, \theta) = \ln \binom{n}{x} + x \ln(\theta) + (n - x) \ln(1 - \theta)$, de sorte que

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \theta} = \frac{x}{\theta} - \frac{n - x}{1 - \theta}$$

qui est > 0 si et seulement si $\theta < \frac{x}{n}$ et nul en $\frac{x}{n}$. $\log L$ admet donc un maximum global en $\hat{\theta} = \frac{x}{n}$.

Donc $L(x, \cdot)$ a un maximum global en $\hat{\theta} = \frac{x}{n}$.

b) Pour $x_1, \dots, x_n \in \mathbb{N}$ fixés, on cherche $\max_{\theta > 0} L(x_1, \dots, x_n, \theta)$. On a

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = \frac{\theta^{\sum_{i=1}^n x_i - 1} (\sum_{i=1}^n x_i - n\theta)}{\prod_{i=1}^n x_i!}$$

Donc $\frac{\partial L}{\partial \theta} > 0$ si et seulement si $\theta < \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ avec égalité en $\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$.

La fonction admet donc un maximum global en $\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$.

c) Pour $x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}$ fixés, on cherche $\max_{\theta > 0} L(x_1, \dots, x_n, \theta)$. Il suffit de cher-

cher $\max_{\theta > 0} \log L(x, \theta)$. On a

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \theta} = -\frac{n}{\theta} + \frac{1}{\theta^3} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2$$

$$\text{et } \frac{\partial \ln L}{\partial \theta} > 0 \iff \theta < \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n}}.$$

La fonction admet donc un maximum global en $\hat{\theta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n}}$.

Exercice 7.9

Soit $L : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}_+^*$, $(x, \theta) \mapsto L(x, \theta)$ C^2 par rapport à θ .

On cherche $\hat{\theta} \in \mathbb{R}^p$ tel que $L(x, \hat{\theta}) \geq L(x, \theta) \forall \theta \in \mathbb{R}^p$.

1. Montrer que $\hat{\theta}$ est solution du système

$$\frac{\partial \log L}{\partial \theta_i} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 \log L}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \text{ est définie négative}$$

2. Posons $\theta = (m, \sigma^2)$ et $L(x, m, \sigma^2) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} \sigma^2} e^{-\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{2\sigma^2}}$
Déterminer $\hat{\theta}$.

1. Sans hypothèse de concavité en θ sur L , tout ce qu'on peut affirmer est que si $\hat{\theta}$ est solution du système de l'énoncé, alors $\hat{\theta}$ est un maximum local de $\log L$, donc un maximum local de L .

2. Etant donné $x \in \mathbb{R}^n$, on cherche $\max_{\delta > 0, m \in \mathbb{R}} L(x, m, \delta) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} \delta} e^{-\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{2\delta}}$.

Posons $\psi : (m, \delta) \mapsto -\ln(\delta) - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{2\delta}$. Le problème précédent est équivalent à chercher $\max_{\delta > 0, m \in \mathbb{R}} \left(-\ln(\delta) - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{2\delta} \right)$.

Le gradient de ψ en (m, δ) est donné par

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)}{\delta}, -\frac{1}{\delta} + \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{2\delta^2} \right)$$

et l'ensemble des points critiques par $\left\{ \left(\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(x_i - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right] \right)^2 \right) \right\}$.

La Hessienne de ψ en (m, δ) est donnée par

$$\frac{1}{\delta} \begin{pmatrix} -n & -\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)}{\delta} \\ -\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)}{\delta} & \frac{1}{\delta} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{\delta} \right) \end{pmatrix}$$

Au point critique $(\hat{m}, \hat{\delta})$, cette matrice devient $\frac{1}{\hat{\delta}} \begin{pmatrix} -n & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\hat{\delta}} \end{pmatrix}$ qui est définie négative, donc $(\hat{m}, \hat{\delta})$ est un maximum local.

Pour déduire que c'est un maximum global, il faudrait que ψ soit concave, ie que sa Hessienne soit définie négative en tout point. Or ce n'est pas vrai : le déterminant de la Hessienne est donné par

$$\frac{1}{\delta^2} \left(\frac{-n}{\delta} + \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 - (\sum_{i=1}^n (x_i - m))^2}{\delta^2} \right)$$

qui est ≥ 0 si et seulement si

$$\frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 - (\sum_{i=1}^n (x_i - m))^2}{\delta} \geq n$$

Or à m fixé, lorsque $\delta \rightarrow \infty$, le membre de gauche tend vers 0.

La concavité est donc une impasse.

Exercice 7.10

Soient $y \in M_{n,1}(\mathbb{R})$, $\beta \in M_{p,1}(\mathbb{R})$ et $X \in M_{n,p}(\mathbb{R})$. On suppose $X^T X$ inversible. Résoudre $\min_{\beta} (y - X\beta)^T (y - X\beta)$.

Comme $(y - X\beta)^T (y - X\beta) = \|y - X\beta\|^2$, le problème revient à chercher la distance de y à $\text{Im } X$.

On sait que cette distance est réalisée pour la projection orthogonale de y sur $\text{Im } X$. Soit $x, z \in M_{p,1}(\mathbb{R})$. On a

$$\begin{aligned} \langle Xz, y - Xx \rangle &= \langle Xz, y \rangle - \langle Xz, Xx \rangle \\ &= z^T X^T y - z^T X^T X x \\ &= z^T (X^T y - X^T X x) \end{aligned}$$

La quantité précédente est nulle quel que soit z dès lors que $X^T y - X^T X x = 0$.

Il suffit donc de poser $x = (X^T X)^{-1} X^T y$.

Avec le calcul précédent et la caractérisation de la projection orthogonale, le β cherché est $(X^T X)^{-1} X^T y$ et la distance minimale vaut

$$\|y - X(X^T X)^{-1} X^T y\|^2$$

Exercice 7.11

Pour $y \in \mathbb{R}$, étudier $f : x \mapsto \frac{e^{y-x}}{(1 + e^{y-x})^2}$.

La dérivée de f en x est donnée par $\frac{e^{x+y} (e^y - e^x)}{(e^x + e^y)^3}$.

Elle est > 0 tant $x < y$, < 0 lorsque $x > y$ et nulle en $x = y$. f admet donc un maximum global en y . Comme sa limite en $\pm\infty$ est 0, elle n'admet pas de minimum local ou global.

Exercice 7.12

Soient x_1, \dots, x_n des réels. Résoudre $\max_{\theta} e^{-\sum_{i=1}^n x_i} \mathbb{1}_{\theta \leq \inf_i x_i}$

La fonction objectif vaut $e^{-\sum_{i=1}^n x_i}$ tant que $\theta \leq \min_i x_i$ et 0 si $\theta > \min_i x_i$. Son maximum est donc $e^{-\sum_{i=1}^n x_i}$.

Exercice 7.13

□

Très calculatoire. On trouvera des calculs similaires dans les exercices 1.15 et 1.16.

Exercice 7.14

□

Il s'agit du maximum de vraisemblance de la loi normale multivariée. Le calcul est classique mais difficile à mener sans les outils adéquats. On trouvera les détails dans Magnus, *Matrix Differential Calculus with Applications in Statistics and Econometrics* au Chapitre 15.

Exercice 7.15

Soient $p, q > 0$ tels que $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$.

1. Montrer que pour tout $y \in \mathbb{R}^n$,

$$\frac{1}{q} \|y\|_2^q = \max_{x \in \mathbb{R}^n} \left(\langle x, y \rangle - \frac{1}{p} \|x\|_2^p \right)$$

2. Soit $a \in \mathbb{R}^n$. Discuter selon que $\langle a, y \rangle$ est ≥ 0 ou ≤ 0 de la solution du problème

$$\max_{\langle a, x \rangle \leq 0} \left(\langle x, y \rangle - \frac{1}{p} \|x\|_2^p \right)$$

1. Soit $y \in \mathbb{R}^n$ fixé. Posons $f : x \mapsto \langle x, y \rangle - \frac{1}{p} \|x\|_2^p$. f est concave comme combinaison à coefficients positifs de deux fonctions concaves : $x \mapsto \langle x, y \rangle$ est linéaire donc concave et $x \mapsto \|x\|_2^p$ est convexe :

$$\begin{aligned} \|(1-\lambda)x + \lambda y\|_2^p &\leq ((1-\lambda)\|x\|_2 + \lambda\|y\|_2)^p \quad \text{par inégalité triangulaire et croissance de } x^p \\ &\leq (1-\lambda)\|x\|_2^p + \lambda\|y\|_2^p \quad \text{par convexité de } x^p \text{ sur } \mathbb{R}_+ \text{ pour } x \geq 0 \end{aligned}$$

de sorte que $x \mapsto -\|x\|_2^p$ est concave.

En composant $\delta : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \|x\|_2^2$ et $\gamma : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^{p/2}$, la fonction $x \mapsto \|x\|_2^p$ est différentiable sur $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ et son gradient est donné par $px\|x\|_2^{p-2}$.

Le gradient de $x \mapsto \langle x, y \rangle$ est donné par y , de sorte que le gradient de f en $x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ est donné par

$$\nabla f(x) = y - x\|x\|_2^{p-2}$$

On note que

$$\nabla f(x) = 0 \implies y = x\|x\|_2^{p-2} \implies \|y\|_2 = \|x\|_2^{p-1} \implies \|x\|_2 = \|y\|_2^{\frac{1}{p-1}}$$

- Si $y = 0$, le problème est trivial.
- Si $y \neq 0$, $\left(\|y\|_2^{\frac{2-p}{p-1}} y\right)$ est un point $\neq 0$ qui annule le gradient. Par concavité de f , c'est un maximum local, donc un maximum global. Par ailleurs,

$$f(\|y\|_2^{\frac{2-p}{p-1}} y) = \frac{1}{q} \|y\|_2^q$$

comme voulu.

2. Dans cette question on occulte le fait que f n'est a priori pas différentiable en 0 (on peut par exemple supposer que $p \geq 2$, auquel cas $x \mapsto x^{p/2}$ est dérivable en 0).

Soit $a \in \mathbb{R}^n$. Le problème posé s'écrit $\max_{x \in \mathbb{R}^n} f(x) \quad \text{s.c. } \langle a, x \rangle \leq 0$.

f est concave et la contrainte est affine : on a qualification en tout x et toute solution du système KKT est un maximum de f sur l'ensemble des contraintes.

$$\text{Le système en } (x, \lambda) \text{ s'écrit } \begin{cases} \lambda \geq 0 \\ \langle a, x \rangle \leq 0 \\ \lambda \langle a, x \rangle = 0 \\ y - x\|x\|_2^{p-2} - \lambda a = 0 \end{cases}$$

1. Si $\lambda = 0$:

On retombe sur le problème non contraint, donc $x = \|y\|_2^{\frac{2-p}{p-1}} y$.

Alors $\langle a, x \rangle \leq 0 \iff \langle a, y \rangle \leq 0$. Par conséquent, si $\langle a, y \rangle \leq 0$,

$(x, \lambda) = (\|y\|_2^{\frac{2-p}{p-1}} y, 0)$ est solution du système.

2. Si $\langle a, x \rangle = 0$:

De $y - x\|x\|_2^{p-2} - \lambda a = 0$ on tire $\langle y, a \rangle = \lambda\|a\|_2^2$

(a) Si $a = 0$: On retombe sur le problème non contraint et $\langle a, x \rangle \leq 0$ est satisfaite. $(\|y\|_2^{\frac{2-p}{p-1}}y, \lambda)$ où λ est ≥ 0 quelconque est alors solution du système.

(b) Si $a \neq 0$: On a $\lambda = \frac{\langle y, a \rangle}{\|a\|_2^2}$

i. Si $\langle y, a \rangle < 0$: $\lambda < 0$ et le système n'admet pas de solution.

ii. Si $\langle y, a \rangle \geq 0$: on a $x\|x\|_2^{p-2} = y - \frac{\langle y, a \rangle}{\|a\|_2^2}a$. Le membre de droite est la projection orthogonale de y sur $\text{Vect}(a)^\perp$, on le note $p_a(y)$.

Alors $x = \|p_a(y)\|_2^{\frac{2-p}{p-1}}p_a(y)$ et $\lambda = \frac{\langle y, a \rangle}{\|a\|_2^2}$.

Conclusion :

Si $\langle y, a \rangle \leq 0$: le maximum cherché est atteint en $\|y\|_2^{\frac{2-p}{p-1}}y$ et vaut $\frac{1}{q}\|y\|_2^q$.

Si $\langle y, a \rangle \geq 0$: le maximum cherché est atteint en $\|p_a(y)\|_2^{\frac{2-p}{p-1}}p_a(y)$ et vaut $\frac{1}{q}\|p_a(y)\|_2^q$

On remarque que ces quantités coïncident lorsque $\langle y, a \rangle = 0$.

Exercice 7.16

Soit $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ convexe.

1. Montrer que si f est majorée sur \mathbb{R}^n , alors f est constante.
2. Montrer qu'une fonction f définie sur K un compact convexe de \mathbb{R}^n et à valeurs dans \mathbb{R} , convexe sur K , atteint son maximum en un point extrême de K .

1. Si f est majorée sur \mathbb{R}^n , alors pour tout $v \in \mathbb{R}^n$, la fonction $t \mapsto f(tv)$ est convexe de \mathbb{R} dans \mathbb{R} . Comme elle est majorée, d'après l'exercice 5.21, elle est constante. Il existe alors C_v telle que pour tout $t \in \mathbb{R}$, $f(tv) = C_v$.

Pour $v, v' \in \mathbb{R}$, $C_v = f(0 \cdot v) = f(0) = f(0 \cdot v') = C_{v'}$. Donc f est constante sur \mathbb{R}^n .

2. f étant continue sur le compact K , elle admet un maximum, atteint en x_0 . Supposons par l'absurde que x_0 n'est pas un point extrême. Alors on dispose de $y, z \in K$ et $\lambda \in]0, 1[$ tels que $x_0 = (1 - \lambda)y + \lambda z$. Donc

$$f(x_0) = f((1 - \lambda)y + \lambda z) \leq (1 - \lambda)f(y) + \lambda f(z) < \max(f(y), f(z))$$

ce qui contredit la maximalité de $f(x_0)$.

Tous les points où f atteint son maximum sont donc extrêmes.

8. Optimisation sous contraintes

Exercice 8.1

Résoudre

1. $\max x + y$ s.c. $y \leq 0, y \geq x^3$
2. $\max x + 2yx + 2y - \frac{x^2}{2} - \frac{y^2}{2}$ s.c. $x \geq 0, y \geq 0, x + y \leq 1$
3. $\min x^3 + y^2$ s.c. $x^2 + y^2 \leq \left(\frac{5}{4}\right)^2, 2x + y + \frac{5}{4} \geq 0$
4. $\min x$ s.c. $x \leq 0, y \geq 0, y \leq (1+x)^3$
5. $\max xy - x^2 - y^2$ s.c. $2x + y \geq 5, y \geq 3$

1. Soit (x, y) tel que $y \leq 0$ et $y \geq x^3$. Alors $x^3 \leq 0$ donc $x \leq 0$ et $x + y \leq 0$. Cette borne est atteinte en $(0, 0)$ par exemple. Le maximum cherché est donc 0.

2. On note $f : (x, y) \mapsto x + 2yx + 2y - \frac{x^2}{2} - \frac{y^2}{2}$ et $K = \{(x, y), x \geq 0, y \geq 0, x + y \leq 1\}$. f est continue, K est borné (inclus dans $[0, 1]^2$) et fermé (intersection de fermés), donc compact. Ceci fournit l'existence du maximum cherché. Les contraintes sont affines, on a donc qualification en tout point. Par conséquent, tout maximum local de f sur K est solution du système KKT.

$$\text{Le système s'écrit } \begin{cases} \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \geq 0 \\ x \geq 0 \\ y \geq 0 \\ x + y \leq 1 \\ \lambda_1 x = 0 \\ \lambda_2 y = 0 \\ \lambda_3(1 - x - y) = 0 \\ 1 + 2y - x + \lambda_1 - \lambda_3 = 0 \\ 2x + 2 - y + \lambda_2 - \lambda_3 = 0 \end{cases}$$

1. Si $\lambda_1 = 0$:

$$\lambda_3 = 1 + 2y - x \text{ et } \lambda_2 = \lambda_3 - 2x - 2 + y = -3x + 3y - 1$$

(a) Si $\lambda_2 = 0$:

$$\text{Alors } x = y - \frac{1}{3}$$

i. Si $\lambda_3 = 0$:

$$x = 2y + 1 \text{ donc } y - \frac{1}{3} = 2y + 1 \text{ ie } y = -\frac{4}{3} \quad \text{NON}$$

ii. Si $1 - x - y = 0$:

$$x = 1 - y \text{ donc } y - \frac{1}{3} = 1 - y \text{ ie } y = \frac{2}{3} \text{ et } x = \frac{1}{3}, \text{ ce qui donne } \lambda_3 = 2. \text{ Réciproquement, on vérifie que ce 5-uplet est bien solution.}$$

(b) Si $y = 0$:

$$\lambda_3 = 1 - x \text{ et } \lambda_2 = -3x - 1$$

- i. Si $\lambda_3 = 0$:
 $x = 1$ et $\lambda_2 = -4$ NON
- ii. Si $1 - x = 0$:
 $x = 1$ et $\lambda_2 = -4$ NON
- 2. Si $x = 0$:
 - (a) Si $\lambda_2 = 0$:
 $\lambda_3 = \lambda_1 + 2y + 1$ et $\lambda_3 = 2 - y$
 - i. Si $\lambda_3 = 0$:
 $y = 2$ donc $\lambda_1 = -5$ NON
 - ii. Si $1 - y = 0$:
 $y = 1$ donc $\lambda_3 = 1$ et $\lambda_1 = -2$ NON
 - (b) Si $y = 0$:
 $\lambda_3 = 0$ donc $\lambda_1 = -1$ NON

Conclusion : Le système admet une unique solution : $x = \frac{1}{3}$, $y = \frac{2}{3}$, $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$, $\lambda_3 = 2$. f admet donc un unique maximum local sur K , qui est donc aussi le maximum global de f sur K . On a $f(\frac{1}{3}, \frac{2}{3}) = \frac{11}{6}$.

3. Posons $f : (x, y) \mapsto x^3 + y^2$, $g_1 : (x, y) \mapsto x^2 + y^2 - (\frac{5}{4})^2$, $g_2 : (x, y) \mapsto -2x - y - \frac{5}{4}$ et $K = \{(x, y), g_1(x, y) \leq 0, g_2(x, y) \leq 0\}$.

f est continue, K est fermé (intersection de fermés) et borné (inclus dans le disque centré en 0 de rayon $5/4$) donc compact. f admet donc un minimum global sur K .

g_1 est convexe (trivial après calcul de la Hessienne) et g_2 est affine donc convexe. Par ailleurs, au point $(-\frac{5}{8}, \frac{5}{8})$, g_1 vaut $\frac{25}{64} + \frac{25}{64} - \frac{25}{16} < 0$ et g_2 vaut $-\frac{5}{8} < 0$. Les conditions de Slater sont donc satisfaites, donc la contrainte est qualifiée est en tout point de K . Tout minimum local de f sur K est donc solution du système KKT.

$$\text{Le système s'écrit } \begin{cases} \lambda_1, \lambda_2 \geq 0 \\ x^2 + y^2 \leq (\frac{5}{4})^2 \\ 2x + y + \frac{5}{4} \geq 0 \\ \lambda_1(x^2 + y^2 - (\frac{5}{4})^2) = 0 \\ \lambda_2(2x + y + \frac{5}{4}) = 0 \\ 3x^2 + 2\lambda_1x - 2\lambda_2 = 0 \\ 2y + 2\lambda_1y - \lambda_2 = 0 \end{cases}$$

- 1. Si $\lambda_1 = 0$:
 Alors $3x^2 = 2\lambda_2$ et $\lambda_2 = 2y$ donc $3x^2 = 4y$.
 - (a) Si $\lambda_2 = 0$:
 Alors $x = y = 0$. Réciproquement, on vérifie que ce quadruplet est bien solution du système.

- (b) Si $2x + y + \frac{5}{4} = 0$:
 $y = -2x - \frac{5}{4}$ donc $3x^2 = -8x - 5$ donc $x \in \{-1, -\frac{5}{3}\}$.
 Pour $x = -1$, on a $y = \frac{3}{4}$, $\lambda_2 = \frac{3}{2}$. Réciproquement, on vérifie que ce quadruplet est bien solution du système.
 Pour $x = -\frac{5}{3}$, on a $y = \frac{25}{12}$ et on vérifie que $g_1(-\frac{5}{3}, \frac{25}{12}) > 0$ NON
2. Si $x^2 + y^2 = (\frac{5}{4})^2$:
- (a) Si $\lambda_2 = 0$:
 $2y(1 + \lambda_1) = 0$ donc $y = 0$ donc $x \in \{\frac{5}{4}, -\frac{5}{4}\}$.
 De $3x^2 + 2\lambda_1 x = 0$ on a $x \leq 0$ donc $x = -\frac{5}{4}$.
 Alors $g_2(-\frac{5}{4}, 0) = \frac{5}{4} > 0$ NON
- (b) Si $2x + y + \frac{5}{4} = 0$:
 $y = -2x - \frac{5}{4}$ donc $x^2 + (2x + \frac{5}{4})^2 = (\frac{5}{4})^2$ ie $x \in \{-1, 0\}$.
 Si $x = -1$, alors $y = \frac{3}{4}$, $\lambda_1 = 0$ et $\lambda_2 = \frac{3}{2}$ (solution qui a déjà été trouvée).
 Si $x = 0$, alors $y = -\frac{5}{4}$, $\lambda_2 = 0$ et $\lambda_1 = -1$ NON

Conclusion : Le système admet deux solutions : $x = y = \lambda_1 = \lambda_2 = 0$ et $x = -1$, $y = \frac{3}{4}$, $\lambda_1 = 0$ et $\lambda_2 = \frac{3}{2}$. On sait que parmi ces deux solutions se trouve celle qui réalise le minimum global de f sur K . Or on a $f(0, 0) = 0 > f(-1, \frac{3}{4}) = -\frac{7}{16}$. Le minimum cherché vaut donc $-\frac{7}{16}$ et est atteint en $(-1, \frac{3}{4})$.

4. Soit (x, y) tel que $x \leq 0$, $y \geq 0$ et $y \leq (1 + x)^3$. Alors $(1 + x)^3 \geq 0$, donc $1 + x \geq 0$ donc $x \geq -1$. Cette borne est atteinte en $(-1, 0)$ qui vérifie par ailleurs toutes les contraintes. Le minimum cherché est donc -1 .

5. Posons $f : (x, y) \mapsto xy - x^2 - y^2$ et $K = \{(x, y) \mid 2x + y \geq 5, y \geq 3\}$.
 f est continue et K est fermé. Par ailleurs, f est négativement coercive, au sens où $f(x, y) \xrightarrow{\|(x, y)\| \rightarrow \infty} -\infty$. En effet,

$$f(x, y) = -(x^2 + y^2) + xy \leq -(x^2 + y^2) + \frac{x^2 + y^2}{2} = -\frac{x^2 + y^2}{2} \xrightarrow{\|x\| \rightarrow \infty} -\infty$$

f admet donc un maximum global sur K .

Les contraintes sont affines, donc il y a qualification en tout point de K . Tout maximum local de f sur K est donc solution du système KKT.

$$\text{Le système s'écrit } \begin{cases} \lambda_1, \lambda_2 \geq 0 \\ 2x + y \geq 5 \\ y \geq 3 \\ \lambda_1(2x + y - 5) = 0 \\ \lambda_2(y - 3) = 0 \\ y - 2x + 2\lambda_1 = 0 \\ x - 2y + \lambda_2 = 0 \end{cases}$$

1. Si $\lambda_1 = 0$:
On a $y = 2x$.
 - (a) Si $\lambda_2 = 0$:
 $x = 2y$ donc $y = 4y$ ie $y = 0$ NON
 - (b) Si $y = 3$:
Alors $x = \frac{3}{2}$ et $\lambda_2 = 2y - x = \frac{9}{2}$. Réciproquement on vérifie que le quadruplet est solution du système.
2. Si $2x + y = 5$:
 - (a) Si $\lambda_2 = 0$:
 $x = 2y$ donc $y = 5 - 4y$ ie $y = 1$ NON
 - (b) Si $y = 3$:
 $x = 1$ donc $\lambda_1 = -\frac{1}{2}$ NON

Conclusion : Le système admet une unique solution $x = \frac{3}{2}$, $y = 3$, $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = \frac{9}{2}$. f admet donc un unique maximum local, qui aussi le maximum global de f sur K , réalisé en $x = \frac{3}{2}$, $y = 3$. Par ailleurs, $f(\frac{3}{2}, 3) = -\frac{27}{4}$.