T.D. XI - Fonctions de plusieurs variables

I - Extremums libres

Solution de l'exercice 1.

1. $\nabla f(x,y) = \begin{pmatrix} 2x-y \\ 2y-x \end{pmatrix}$. Ainsi, le seul point critique est $(0,0)$.

La hessienne de f vaut $H(f)(x,y) = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}$. Comme $2^2-(-1)^2 > 0$ et $2 > 0$, d'après le résultat de Monge, f atteint un minimum local en $(0,0)$.

Comme $\begin{pmatrix} h_1 & h_2 \end{pmatrix} H(f)(x,y) \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} = 2h_1^2 + 2h_2^2 \geqslant 0$, pour tout $(x,y) \in \mathbb{R}^2$ et pour tout $(h_1,h_2) \in \mathbb{R}^2$, la fonction f est convexe et le minimum est un minimum global.

2. $\nabla f(x,y) = \begin{pmatrix} 8xy+6x^2-4y+2 \\ 4x^2-4x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.

- Soit $x=0$ et $y=1/2$.
- Soit $x=1$ et $y=-2$.

De plus,

$$H(f)(x,y) = \begin{pmatrix} 8y+12x & 8x-4 \\ 8x-4 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r & s \\ s & t \end{pmatrix}.$$

- En $(0,1/2)$, $rt-s^2 = -16 < 0$. Ainsi, $(0,1/2)$ est un point selle.
- En $(1,-2)$, $rt-s^2 = -16 < 0$. Ainsi, $(1,-2)$ est un point selle.

3. $\nabla f(x,y) = \begin{pmatrix} 3x^2+6x \\ -3y^2-6y \end{pmatrix}$. Ainsi, (x,y) est un point critique si et seulement si $\begin{cases} x(x+2) &= 0 \\ y(y+2) &= 0 \end{cases}$.

On obtient ainsi 4 points critiques de coordonnées : $(0,0)$, $(0,-2)$, $(-2,0)$, $(-2,-2)$.

De plus, la hessienne de f vaut

$$H(f)(x,y) = 6\begin{pmatrix} x+1 & 0 \\ 0 & -y-1 \end{pmatrix}.$$

- Si $(x,y)=(0,0)$, la hessienne est vaut $\begin{pmatrix} 6 & 0 \\ 0 & -6 \end{pmatrix}$. Les notations de Monge montrent que f atteint un point selle en $(0,0)$.
- Si $(x,y)=(-2,-2)$, la hessienne vaut $\begin{pmatrix} -6 & 0 \\ 0 & 6 \end{pmatrix}$. Les notations de Monge montrent que f atteint un point selle en $(-2,-2)$.
- Si $(x,y)=(0,-2)$, la hessienne vaut $\begin{pmatrix} 6 & 0 \\ 0 & 6 \end{pmatrix}$. Comme $rt-s^2>0$ et $r>0$, les notations de Monge assurent que f atteint un minimum local en $(0,-2)$.
- Si $(x,y) = (-2,0)$, la hessienne vaut $\begin{pmatrix} -6 & 0 \\ 0 & -6 \end{pmatrix}$. Comme $rt-s^2>0$ et $r<0$, les notations de Monge assurent que f atteint un maximum local en $(-2,0)$.

Comme $\lim_{x\to+\infty} f(x,0) = +\infty$, alors f n'admet pas de maximum global.
Comme $\lim_{x\to-\infty} f(x,0) = -\infty$, alors f n'admet pas de minimum global.

□

Solution de l'exercice 2.

1. $\nabla f(x,y,z) = \begin{pmatrix} 2z \\ 2-6y \\ 2x-6z \end{pmatrix}$. Ainsi, le seul point critique est $a_\star = (0,1/3,0)$.

De plus, $H(f)(x,y,z) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 \\ 0 & -6 & 0 \\ 2 & 0 & -6 \end{pmatrix}$. Alors,

$$\begin{aligned} q_{(x,y,z)}(f)(h) &= h^T H(f)(x,y,z)h \\ &= 4h_1h_3 - 6h_2^2 - 6h_3^2 \\ &= -6\left(h_3 - \frac{2}{3}h_1h_3\right) - 6h_2^2 \\ &= -6\left(h_3 - \frac{1}{3}h_1\right)^2 + \frac{2}{3}h_1^2 - 6h_2^2. \end{aligned}$$

Comme $q_{a_\star}(h,0,h/3) > 0$ et $q_{a_\star}(0,h,0) < 0$, alors f n'atteint pas d'extremum en $a_\star$.

2. Le gradient vaut $\nabla f(x,y,z) = \begin{pmatrix} y+z-yz \\ x+z-xz \\ y+x-xy \end{pmatrix}$.

Soit (x,y,z) un point critique. Si $z=1$, la première équation donne $1=0$, ce qui est impossible. Ainsi, $z \neq 1$ et

$$\begin{cases} y & = -\frac{z}{1-z} \\ x & = -\frac{z}{1-z} \\ -2\frac{z}{1-z} - \left(\frac{z}{1-z}\right)^2 & = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y & = -\frac{z}{1-z} \\ x & = -\frac{z}{1-z} \\ -\frac{z}{1-z}\left(2+\frac{z}{1-z}\right) & = 0 \end{cases}$$

Ainsi, si $z=0$, alors $x=y=0$. Sinon, $2+\frac{z}{1-z}=0$, soit $z=2$ et alors $x=y=2$. Il y a donc deux points critiques : $(0,0,0)$ et $(2,2,2)$.
La hessienne de f vaut

$$H(f)(x,y,z) = \begin{pmatrix} 0 & 1-z & 1-y \\ 1-z & 0 & 1-x \\ 1-y & 1-x & 0 \end{pmatrix}.$$

* Si $a_\star = (0,0,0)$, alors $H(f)(a_\star) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$. Ainsi, $q_{a_\star}(h) = 2(h_1h_2 + h_1h_3 + h_2h_3)$.
  * $\star$ $q_{a_\star}(h,h,0) = 2h^2 > 0$.
  * $\star$ $q_{a_\star}(-h,h,0) = -2h^2 < 0$.

  Ainsi, f ne présente pas d'extremum en $(0,0,0)$.
* Si $a_\star = (2,2,2)$. Alors $H(f)(a_\star) = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$. On conclut comme précédemment.

□

Solution de l'exercice 3.

1. a) (x,y) est un point critique de f si et seulement si

$$\begin{cases} 2x-6 & = 0 \\ 2y-14 & = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x & = 3 \\ y & = 7 \end{cases}.$$

Ainsi, $M(3,7)$ est l'unique point critique de f.

b) Comme $H(f)(x,y) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$, alors $rt - s^2 > 0$ et $r > 0$. Ainsi, la fonction f admet un minimum local en $(3,7)$.

2. a) Soit $h = (h_1,h_2) \in \mathbb{R}^2$ non nul. Alors,

$$q_{(x,y)}(h_1,h_2) = 2h_1^2 + 2h_2^2 > 0.$$

Ainsi, f est strictement convexe sur $\mathbb{R}^2$.

b) Comme f est strictement convexe et $(2,7)$ est un point critique de f, alors f atteint un minimum global en $(2,7)$.

3. a) D'après la définition de la distance,

$$\|(x,y)-(2,7)\|^2 = (x-2)^2 + (y-7)^2 = x^2 + y^2 - 2x - 14y + 53.$$

b) D'après la question précédente, $f(x,y) \geqslant 0$. De plus, $f(x,y) = 0$ si et seulement si $(x,y) = (2,7)$. On obtient bien que $(2,7)$ est un minimum global de f. □

II - Extremums sous contraintes

Solution de l'exercice 5.

1. On se ramène à l'étude de $\varphi : x \mapsto (x+1)\ln(x+1)$. Comme $\varphi'(x) = \ln(x+1)+1$, alors φ est décroissante sur $]-1, \mathrm{e}^{-1}-1]$ puis croissante sur $[\mathrm{e}^{-1}-1, +\infty[$.
Le minimum de f sous contrainte est donc atteint en $\left(\mathrm{e}^{-1}-1, \mathrm{e}^{-1}\right)$.

2. On se ramène à l'étude de $\varphi : x \mapsto 2x\,\mathrm{e}^x$. Comme $\varphi'(x) = 2(x+1)\,\mathrm{e}^x$, alors φ est décroissante sur $]-\infty,-1]$ puis croissante sur $[-1,+\infty[$.
Le minimum de f sous contrainte est donc atteint en $(-1,-1)$.

3. Comme $x^2 = \frac{3-y^2}{2}$, on se ramène à l'étude de $\varphi : y \mapsto \frac{3-y^2}{2}y$ où $y \in \left[-\sqrt{3}, \sqrt{3}\right]$. Comme $\varphi'(x) = 3\frac{1-y^2}{2}$, alors φ est décroissante sur $[-\sqrt{3},-1]$, croissante sur $[-1,1]$ puis décroissante sur $[1,\sqrt{3}]$.
De plus, $\varphi(1) = 1$ et $\varphi(-1) = -1$.
Comme $\varphi(-\sqrt{3}) = \varphi(\sqrt{3}) = 0$, φ ne possède pas d'extremum global en $-\sqrt{3}$ et $\sqrt{3}$.

Le minimum de f sous contrainte est donc atteint en $(1,-1)$ et $(-1,-1)$.
Le maximum de f sous contraine est donc atteint en $(1,1)$ et $(-1,1)$.

On remarque que si (x,y) est proche de $(0,\sqrt{3})$, alors $f(x,y)=x^2y\geqslant 0=f(0,\sqrt{3})$ donc f atteint un minimum local en $(0,\sqrt{3})$.
Enfin, si (x,y) est proche de $(0,-\sqrt{3})$, alors $f(x,y)=x^2y\leqslant 0=f(0,-\sqrt{3})$ donc f atteint un maximum local en $(0,-\sqrt{3})$. □

Solution de l'exercice 6.

1. Contrainte de qualification : La jacobienne $\begin{pmatrix}1&1&1&-1\\2&-1&1&1\end{pmatrix}$ est de rang 2 car ses deux premières colonnes sont linéairement indépendantes.
Condition du premier ordre : il existe x, y, z, t, λ_1, $\lambda_2\in\mathbb{R}$ tels que

$$\begin{cases}2x-\lambda_1-2\lambda_2&=0\\2y-\lambda_1+\lambda_2&=0\\2z-\lambda_1-\lambda_2&=0\\2t+\lambda_1-\lambda_2&=0\\x+y+z-t&=3\\2x-y+z+t&=-6\end{cases}\Leftrightarrow\begin{cases}x&=-1\\y&=2\\z&=0\\t&=-2\\\lambda_1&=2\\\lambda_2&=-2\end{cases}$$

Comme la hessienne réduite du lagrangien est $\begin{pmatrix}2&0&0\\0&2&0\\0&0&2\end{pmatrix}$, alors $h^T\widetilde{H}h=2(h_1^2+h_2^2+h_3^2)>0$ pour tout vecteur h non nul et f atteint sous contrainte un minimum en $(-1,2,0)$.

2. Contrainte de qualification : la jacobienne $\begin{pmatrix}2x&2y\end{pmatrix}$ est de rang 1 sauf en $(0,0)$ qui n'appartient pas au domaine étudié.
Condition du premier ordre :

$$\begin{cases}\frac{1}{x-y}-2\lambda x&=0\\-\frac{1}{x-y}-2\lambda y&=0\\x^2+y^2-2&=0\end{cases}$$

Ainsi, $2\lambda(x+y)=0$.

* Si $\lambda=0$, alors $\frac{1}{x-y}=0$, ce qui est impossible.
* Si $x=-y$, comme $x^2+y^2=2$, alors $x^2\in\{-1,1\}$. On obtient ainsi les points $(-1,1)$ et $(1,-1)$. Comme $-1-1=-2<0$, alors f n'est pas définie en $(-1,1)$.
Ainsi, le seul point à étudier est le point $(1,-1)$ avec $\lambda=\frac{1}{2x(x-y)}=\frac{1}{4}$.

$$H_\star=\begin{pmatrix}-\frac{1}{(x-y)^2}-2\lambda&\frac{1}{(x-y)^2}\\\frac{1}{(x-y)^2}&-\frac{1}{(x-y)^2}-2\lambda\end{pmatrix}.$$

En $a_\star=(1,-1)$. Alors,

$$H_\star=\frac{1}{4}\begin{pmatrix}-3&1\\1&-3\end{pmatrix}\text{ et }J_\star=\begin{pmatrix}2&-2\end{pmatrix}$$

soit $\operatorname{Ker}J_\star=\operatorname{Vect}\left\{\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}\right\}$. Ainsi, pour $h=h_1\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}$ non nul,

$$h^TH_\star h=\frac{h^2}{4}(-4)=-h^2<0.$$

Ainsi, f atteint un maximum sous contrainte en $(1,-1)$.

□

Solution de l'exercice 7.

1. $P(x,y)=x+3y-C(x,y)$. La hessienne vaut $\begin{pmatrix}-10&2\\2&-10\end{pmatrix}$. Comme $q_a(P)(h)=-10h_1^2+4h_1h_2-10h_2^2=-10\left(h_1-\frac{1}{5}h_2\right)^2-\frac{48}{5}h_2^2\leqslant 0$, le profit est une fonction concave.

2. L'entreprise peut fabriquer 20 jouets par jour, soit la condition $x+y=20$.
Condition de qualification : la jacobienne $\begin{pmatrix}1&1\end{pmatrix}$ est de rang 1.
Conditions du premier ordre :

$$\begin{cases}-10x+2y+3-\lambda&=0\\-10y+2x+3-\lambda&=0\\x+y&=20\end{cases}\Leftrightarrow\begin{cases}x&=10\\y&=10\\\lambda&=-77\end{cases}$$

Comme la contrainte est linéaire, $H_\star=H(P)$. Comme P est concave, alors P atteint un maximum sous contrainte en $(10,10)$.

Ainsi, le profit sera maximal en produisant 10 camions et 10 voitures par jour. □

Solution de l'exercice 8.

1. Comme U_1, U_2 et U_3 sont sans biais,

$$\begin{aligned}\mathbf{E}[T_1] &= \frac{c+c+c}{3} = c,\\ \mathbf{E}[T_2] &= c,\\ \mathbf{E}[T_3] &= \frac{3c+c+c}{5} = c.\end{aligned}$$

Ainsi, T_1, T_2 et T_3 sont sans biais.

2. D'après les hypothèses, en notant σ_1^2 la variance de l'estimateur U_1, alors $\sigma_2^2 = 4\sigma_1^2$ et $\sigma_3^2 = 9\sigma_1^2$. Comme les estimateurs sont indépendants,

$$\begin{aligned}\mathbf{V}(T_1) &= \frac{\sigma_1^1 + 4\sigma_1^2 + 9\sigma_1^2}{9} = \frac{14}{9}\sigma_1^2,\\ \mathbf{V}(T_2) &= \sigma_1^2,\\ \mathbf{V}(T_2) &= \frac{9+4+9}{25}\sigma_1^2 = \frac{22}{25}\sigma_1^2.\end{aligned}$$

Comme $\frac{22}{25} < 1 < \frac{14}{9}$, c'est le troisième estimateur qui est le meilleur.

3. D'une part, $\mathbf{E}[T] = (\alpha+\beta+\gamma)c$. Comme le coût moyen est non nul (sinon le coût, quantité positive, serait nul et on n'aurait pas besoin de cabinets d'étude pour s'en apercevoir,...) et T est sans biais, alors $\alpha+\beta+\gamma = 1$.
D'autre par, en utilisant l'indépendance des estimateurs, $\mathbf{V}(T) = (\alpha^2 + 4\beta^2 + 9\gamma^2)\sigma_1^2$.
On cherche donc à optimiser $f(\alpha,\beta,\gamma) = \alpha^2 + 4\beta^2 + 9\gamma^2$ sous la contrainte $\alpha+\beta+\gamma = 1$.
Condition de qualification : la jacobienne vaut

$$J(g)(\alpha,\beta,\gamma) = \begin{pmatrix}1 & 1 & 1\end{pmatrix},$$

qui est bien de rang 1.

Conditions du premier ordre : il existe $\lambda \in \mathbb{R}$ tel que

$$\begin{cases}2\alpha - \lambda &= 0\\ 8\beta - \lambda &= 0\\ 18\gamma - \lambda &= 0\\ \alpha+\beta+\gamma &= 1\end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases}2\alpha - \lambda &= 0\\ 8\beta - \lambda &= 0\\ 18\gamma - \lambda &= 0\\ \left(\frac{1}{2}+\frac{1}{8}+\frac{1}{18}\right)\lambda &= 1 \quad {\scriptstyle L_4 \leftarrow L_4 - \left(\frac{1}{2}L_1 + \frac{1}{8}L_2 + \frac{1}{18}L_3\right)}\end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases}\alpha &= \frac{36}{49}\\ \beta &= \frac{9}{49}\\ \gamma &= \frac{4}{49}\\ \lambda &= \frac{72}{49}\end{cases}$$

La hessienne de f est égale à $H = \begin{pmatrix}2 & 0 & 0\\ 0 & 2 & 0\\ 0 & 0 & 2\end{pmatrix}$ et pour tout vecteur h non nul, $h^T H h = 2(h_1^2 + h_2^2 + h_3^2) > 0$.
Ainsi, f est convexe et la contrainte est linéaire donc f atteint un minimum sous contrainte en (α,β,γ).
L'estimateur linéaire sans biais de variance minimale est donc :

$$T = \frac{36U_1 + 9U_2 + 4U_3}{49}.$$

□

Solution de l'exercice 9.

1. La condition de qualification est triviale car la jacobienne est une matrice ne contenant que des 1.
Les premières conditions de premier ordre donnent $x_i = \frac{\lambda}{2}$. Or, $\sum_{i=1}^{n} x_i = 1$, donc $\lambda = \frac{2}{n}$. Ainsi, $x_i = \frac{1}{n}$.
Comme f est convexe et la contrainte est linéaire, f atteint un minimum.

2. L'estimateur T est de la forme $\sum_{i=1}^{n} x_i X_i$. Comme T est sans biais, alors $\sum_{i=1}^{n} x_i\lambda = \lambda$ soit $\sum_{i=1}^{n} x_i = 1$.

Comme les variables sont indépendantes, $\mathbf{V}(T) = \sum_{i=1}^{n} \lambda x_i^2$. Ainsi, détermienr l'estimateur de variance minimale revient à optimiser $\sum_{i=1}^{n} x_i^2$ sous

la contrainte $\sum_{i=1}^{n} x_i = 1$.
D'après la question précédente, l'estimateur recherché est donc $T = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i$. C'est l'estimateur usuel de la moyenne empirique. $\square$

Solution de l'exercice 10.

1. Comme $x^3 = y^2$, alors x est à valeurs positives. Ainsi, le minimum de f est atteint pour $x = 0$ et vaut 0.

2. Les conditions du premier ordre s'écrivent :

$$\begin{cases} 1 - 3\lambda x^2 & = 0 \\ -2\lambda y & = 0 \\ x^3 - y^2 & = 0 \end{cases}$$

En utilisant la seconde équation,

* soit $y = 0$ et $x = 0$ et la première équation est impossible.
* soit $\lambda = 0$ et la première équation est impossible.

Ainsi, les conditions du premier ordre ne permettent pas d'obtenir une solution.

3. Il n'y a pas de solution aux conditions du premier ordre et pourtant le problème d'optimisation admet une solution.
On constate que la jacobienne vaut $\begin{pmatrix} 0 & 0 \end{pmatrix}$ au point $(0, 0)$. La condition de qualification n'est pas satisfaite et le théorème ne s'applique pas. $\square$