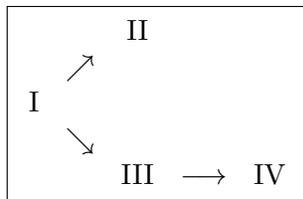


L'objet de ce problème est la minimisation sur un sous-domaine $K \subset \mathbb{R}^n$ d'une fonction f définie sur \mathbb{R}^n . Nous proposons plusieurs approches pour trouver des conditions nécessaires d'optimalité, et obtenir des approximations des minimiseurs de f dans des cas particuliers. Les dépendances entre les parties du problème sont données par le schéma suivant :



NOTATIONS ET DÉFINITIONS

Pour tout entier $k \in \mathbb{N}^*$, on désignera le produit scalaire usuel sur \mathbb{R}^k par $\langle \cdot, \cdot \rangle$, et la norme euclidienne sur \mathbb{R}^k par $\|\cdot\|$.

Dans tout le sujet, on se place sur \mathbb{R}^n , où $n \in \mathbb{N}^*$.

— On dit qu'une fonction $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est **convexe** si pour tous $x, y \in \mathbb{R}^n$ et tout $\lambda \in [0, 1]$,

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

— On dit qu'une fonction $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est **coercive** si $\lim_{\|x\| \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$, autrement dit :

$$\forall M > 0, \exists R > 0, \forall x \in \mathbb{R}^n, \|x\| > R \Rightarrow f(x) > M$$

I - PRÉLIMINAIRES

Fonctions convexes

I.1. On considère une fonction $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$.

(a) Pour tous $x, y \in \mathbb{R}^n$, soit $\varphi_{x,y} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ la fonction définie par

$$\forall t \in \mathbb{R}, \varphi_{x,y}(t) = f(x + t(y - x))$$

Montrer que f est convexe si et seulement si pour tous $x, y \in \mathbb{R}^n$, $\varphi_{x,y}$ est convexe.

(b) On suppose que f est différentiable sur \mathbb{R}^n . Montrer que pour tous $x, y \in \mathbb{R}^n$, la fonction $\varphi_{x,y}$ est dérivable, et montrer que

$$\forall t \in \mathbb{R}, \varphi'_{x,y}(t) = \langle \nabla f(x + t(y - x)), y - x \rangle$$

(c) En déduire que si f est différentiable sur \mathbb{R}^n , alors f est convexe si et seulement si pour tous $x, y \in \mathbb{R}^n$,

$$f(y) \geq f(x) + \langle \nabla f(x), y - x \rangle$$

(d) Montrer que si $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est différentiable sur \mathbb{R}^n , alors f est convexe si et seulement si pour tous $x, y \in \mathbb{R}^n$,

$$\langle \nabla f(y) - \nabla f(x), y - x \rangle \geq 0$$

I.2. Soient $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction convexe et différentiable sur \mathbb{R}^n , et $x^* \in \mathbb{R}^n$. Montrer que si $\nabla f(x^*) = 0$ alors f admet un minimum global en x^* .

Définition. Soit $\alpha \in \mathbb{R}_+^*$. On dit que $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ différentiable sur \mathbb{R}^n est **α -convexe** si pour tous $x, y \in \mathbb{R}^n$,

$$f(y) \geq f(x) + \langle \nabla f(x), y - x \rangle + \frac{\alpha}{2} \|y - x\|^2$$

I.3. On considère un réel $\alpha > 0$ et une fonction $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ différentiable sur \mathbb{R}^n .

(a) On considère la fonction $g_\alpha : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ définie par

$$\forall x \in \mathbb{R}^n, g_\alpha(x) = f(x) - \frac{\alpha}{2} \|x\|^2$$

Calculer $\nabla g_\alpha(x)$ pour tout $x \in \mathbb{R}^n$, et montrer que f est α -convexe si et seulement si g_α est convexe.

(b) En déduire que f est α -convexe si et seulement si pour tous $x, y \in \mathbb{R}^n$,

$$\langle \nabla f(y) - \nabla f(x), y - x \rangle \geq \alpha \|y - x\|^2$$

Fonctions coercives

I.4. Soit $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue et coercive. Montrer que si K est un fermé non vide de \mathbb{R}^n , alors il existe $x^* \in K$ tel que $f(x^*) = \inf_{x \in K} f(x)$.

I.5. Soit $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction différentiable sur \mathbb{R}^n et α -convexe où $\alpha \in \mathbb{R}_+^*$. Montrer que si K est un convexe fermé non vide de \mathbb{R}^n , alors f admet un unique minimum sur K .

Projection sur un convexe fermé

I.6. Soient C un convexe fermé non vide de \mathbb{R}^n et $x \in \mathbb{R}^n$.

(a) Montrer qu'il existe un unique point $P_C(x) \in C$ tel que $\|P_C(x) - x\| = \inf_{y \in C} \|y - x\|$.

(b) Soit $\bar{x} \in C$. Montrer que $\bar{x} = P_C(x)$ si et seulement si

$$\forall y \in C, \langle x - \bar{x}, y - \bar{x} \rangle \leq 0$$

Indication : on pourra considérer la fonction $\psi_y : t \in \mathbb{R} \mapsto \|x - (\bar{x} + t(y - \bar{x}))\|^2$ où $y \in C$.

(c) En déduire que si $x, y \in \mathbb{R}^n$, $\|P_C(y) - P_C(x)\| \leq \|y - x\|$.

Une première condition nécessaire d'optimalité

Soit $K \subset \mathbb{R}^n$. On dit qu'un vecteur $h \in \mathbb{R}^n$ est K -admissible au point $x \in K$ s'il existe

- une suite $(t_k)_{k \in \mathbb{N}}$ de réels strictement positifs vérifiant $\lim_{k \rightarrow +\infty} t_k = 0$,

- une suite $(h_k)_{k \in \mathbb{N}}$ de vecteurs de \mathbb{R}^n vérifiant $\lim_{k \rightarrow +\infty} h_k = h$,

telles que pour tout $k \in \mathbb{N}$,

$$x + t_k h_k \in K$$

On appelle cône K -admissible au point $x \in K$ l'ensemble

$$\mathcal{A}_K(x) := \{h \in \mathbb{R}^n, h \text{ est un vecteur } K \text{ admissible au point } x\}$$

I.7. Décrire $\mathcal{A}_K(x)$ dans le cas où x est dans l'intérieur de K .

I.8. Montrer que si $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est différentiable en $x^* \in K$ et admet un minimum local sur K en x^* , alors

$$\forall h \in \mathcal{A}_K(x^*), \langle \nabla f(x^*), h \rangle \geq 0$$

Qu'exprime ce résultat dans le cas particulier où x^* est dans l'intérieur de K ?

II - PÉNALISATION

Dans le but d'approcher un minimum d'une fonction f sur $K \subset \mathbb{R}^n$, on cherche à se ramener à la minimisation d'une fonction sur \mathbb{R}^n tout entier. Pour ce faire, on propose d'ajouter à f un terme de « pénalisation », qui prend de grandes valeurs en dehors de K , et de minimiser la nouvelle fonction pénalisée sur \mathbb{R}^n tout entier. Cette partie a pour but de justifier cette approche dans un cas particulier.

Dans toute cette partie, on considère une fonction $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ différentiable sur \mathbb{R}^n et α -convexe, où $\alpha \in \mathbb{R}_+^*$. On pose

$$K = \{x \in \mathbb{R}^n, g_1(x) \leq 0, \dots, g_p(x) \leq 0\}$$

où $p \in \mathbb{N}^*$ et g_1, \dots, g_p sont des fonctions convexes de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} , différentiables sur \mathbb{R}^n . On suppose de plus que l'ensemble K est non vide.

II.1. Montrer qu'il existe un unique élément $x^* \in K$ tel que $f(x^*) = \inf_{x \in K} f(x)$.

Pour tout $k \in \mathbb{N}$, on introduit la fonction $f_k : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ définie par

$$\forall x \in \mathbb{R}^n, f_k(x) = f(x) + k\Psi(x)$$

où $\Psi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est la fonction définie par

$$\forall x \in \mathbb{R}^n, \Psi(x) = \sum_{i=1}^p \max(0, g_i(x))^2$$

II.2. Pour tout $x \in \mathbb{R}^n$, calculer $\lim_{k \rightarrow +\infty} f_k(x)$.

II.3. Montrer que pour tout $k \in \mathbb{N}$, il existe un unique $x_k \in \mathbb{R}^n$ tel que $f_k(x_k) = \inf_{x \in \mathbb{R}^n} f_k(x)$.

Indication : on pourra commencer par montrer que si $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est une fonction convexe, et $h : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ est une fonction convexe croissante, alors $h \circ g$ est convexe.

II.4. Montrer que pour tout $k \in \mathbb{N}$, $f(x_k) \leq f(x^*)$.

II.5. On considère une sous-suite $(x_{\varphi(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ de $(x_k)_{k \in \mathbb{N}}$ qui converge vers $\bar{x} \in \mathbb{R}^n$.

(a) Montrer que $\bar{x} \in K$.

(b) En déduire que $\bar{x} = x^*$.

II.6. En déduire que la suite $(x_k)_{k \in \mathbb{N}}$ converge vers x^* .

II.7. Montrer que la suite $(f_k(x_k))_{k \in \mathbb{N}}$ converge vers $f(x^*)$.

III - THÉORÈME DE KARUSH-KUHN-TUCKER

Le but de cette partie est d'établir une condition nécessaire d'optimalité dans le cas où le domaine K est décrit par des contraintes de type inégalité.

Lemme de Farkas

Soient $m \in \mathbb{N}^*$ et (u_1, \dots, u_m) une famille de vecteurs de \mathbb{R}^n . On note

$$C = \left\{ \sum_{i=1}^m \mu_i u_i, \forall i \in \llbracket 1, m \rrbracket \mu_i \geq 0 \right\}$$

On cherche à démontrer le résultat suivant.

Lemme 1. Si $v \in \mathbb{R}^n$, alors une et une seule des deux assertions suivantes est vérifiée :

- (i) $v \in C$,
- (ii) il existe $w \in \mathbb{R}^n$ tel que $\langle v, w \rangle < 0$ et $\forall i \in \llbracket 1, m \rrbracket$, $\langle u_i, w \rangle \geq 0$.

III.1. Le but de cette question est de montrer que C est un convexe fermé de \mathbb{R}^n .

- (a) Montrer que C est convexe.
- (b) Montrer que si (u_1, \dots, u_m) est une famille libre, alors C est fermé.
- (c) Pour tout $I \subset \llbracket 1, m \rrbracket$, on pose $C_I = \{\sum_{i \in I} \mu_i u_i, \forall i \in I \mu_i \geq 0\}$. Montrer que

$$C = \bigcup_I C_I$$

où l'union est prise sur les ensembles $I \subset \llbracket 1, m \rrbracket$ tels que $(u_i)_{i \in I}$ est une famille libre. En déduire que C est fermé.

III.2. On considère un vecteur $v \in \mathbb{R}^n \setminus C$.

- (a) Montrer que $\langle P_C(v), P_C(v) - v \rangle = 0$.
- (b) On pose $w = P_C(v) - v$. Montrer que $\langle v, w \rangle < 0$ et $\langle u_i, w \rangle \geq 0$ pour tout $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$.

III.3. Conclure la preuve du lemme 1.

Condition nécessaire d'optimalité

Soit $p \in \mathbb{N}^*$. Dans toute la suite de cette partie, on suppose que f, g_1, \dots, g_p sont des fonctions de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} différentiables sur \mathbb{R}^n , et que

$$K = \{x \in \mathbb{R}^n, g_1(x) \leq 0, \dots, g_p(x) \leq 0\}$$

est non vide. Pour tout $x \in K$, on note

$$I_x = \{i \in \llbracket 1, p \rrbracket, g_i(x) = 0\}$$

III.4. Montrer que pour tout $x \in K$,

$$\mathcal{A}_K(x) \subset \{h \in \mathbb{R}^n, \forall i \in I_x, \langle \nabla g_i(x), h \rangle \leq 0\}$$

III.5. On considère $x^* \in K$ et on fait l'hypothèse suivante :

$$\exists v \in \mathbb{R}^n, \forall i \in I_{x^*}, \langle \nabla g_i(x^*), v \rangle < 0 \tag{H}$$

Montrer que $\mathcal{A}_K(x^*) = \{h \in \mathbb{R}^n, \forall i \in I_{x^*}, \langle \nabla g_i(x^*), h \rangle \leq 0\}$.

III.6. Montrer que si $x^* \in K$ est tel que $(\nabla g_i(x^*))_{i \in I_{x^*}}$ forme une famille libre, alors l'hypothèse (H) est vérifiée.

III.7. On suppose que f atteint en $x^* \in K$ un minimum local sur K , et que l'hypothèse (H) est vérifiée. Montrer qu'il existe des réels positifs μ_1^*, \dots, μ_p^* tels que

$$\begin{cases} \nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^p \mu_i^* \nabla g_i(x^*) = 0, \\ \forall i \in \llbracket 1, p \rrbracket, \mu_i^* g_i(x^*) = 0 \end{cases} \tag{1}$$

III.8. On suppose dans cette question que les fonctions f, g_1, \dots, g_p sont convexes. Soient $x^* \in K$ et μ_1^*, \dots, μ_p^* tels que (1) soit vérifié. Montrer que f admet en x^* un minimum global sur K .

IV - ÉTUDE DU PROBLÈME DUAL

Le but de cette partie est d'abord la minimisation d'une fonction f sur un sous-domaine K de \mathbb{R}^n en considérant le problème « dual » associé. Dans un cas particulier, on propose une approche basée sur l'étude du problème dual pour obtenir une approximation du minimum de f sur K .

Soit $p \in \llbracket 1, n \rrbracket$. On suppose dans toute cette partie que f, g_1, \dots, g_p sont des fonctions de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} différentiables. On fait l'hypothèse supplémentaire que f est α -convexe pour un certain $\alpha \in \mathbb{R}_+^*$, et que les fonctions g_1, \dots, g_p sont convexes. On suppose par ailleurs que

$$K = \{x \in \mathbb{R}^n, g_1(x) \leq 0, \dots, g_p(x) \leq 0\}$$

est non vide. Dans toute la suite, on note $g(x) = \begin{pmatrix} g_1(x) \\ \vdots \\ g_p(x) \end{pmatrix}$ pour tout $x \in \mathbb{R}^n$.

On introduit la fonction $\mathcal{L} : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+^p \rightarrow \mathbb{R}$ définie par

$$\mathcal{L}(x, \mu) = f(x) + \sum_{i=1}^p \mu_i g_i(x)$$

pour tout $x \in \mathbb{R}^n$ et tout $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_p) \in \mathbb{R}_+^p$. On s'intéresse au problème : trouver $x^* \in K$ tel que

$$f(x^*) = \inf_{x \in K} f(x) \tag{P}$$

IV.1. Montrer que

$$\inf_{x \in K} f(x) = \inf_{x \in \mathbb{R}^n} \sup_{\mu \in \mathbb{R}_+^p} \mathcal{L}(x, \mu)$$

IV.2. Montrer que pour tout $\mu \in \mathbb{R}_+^p$, il existe un unique $x_\mu \in \mathbb{R}^n$ vérifiant $\mathcal{L}(x_\mu, \mu) = \inf_{x \in \mathbb{R}^n} \mathcal{L}(x, \mu)$.

Pour tout $\mu \in \mathbb{R}_+^p$, on note

$$G(\mu) := \inf_{x \in \mathbb{R}^n} \mathcal{L}(x, \mu) = \mathcal{L}(x_\mu, \mu)$$

On va s'intéresser au problème dit dual : trouver $\mu^* \in \mathbb{R}_+^p$ tel que

$$G(\mu^*) = \sup_{\mu \in \mathbb{R}_+^p} G(\mu) = \sup_{\mu \in \mathbb{R}_+^p} \inf_{x \in \mathbb{R}^n} \mathcal{L}(x, \mu) \tag{Q}$$

On dit que $(\bar{x}, \bar{\mu}) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+^p$ est un **point selle de \mathcal{L}** si

$$\mathcal{L}(\bar{x}, \bar{\mu}) = \inf_{x \in \mathbb{R}^n} \mathcal{L}(x, \bar{\mu}) \text{ et } \mathcal{L}(\bar{x}, \bar{\mu}) = \sup_{\mu \in \mathbb{R}_+^p} \mathcal{L}(\bar{x}, \mu)$$

IV.3. On suppose dans cette question que $(\bar{x}, \bar{\mu}) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+^p$ est un point selle de \mathcal{L} .

(a) Montrer que \bar{x} est solution de (P).

(b) Montrer que $\bar{\mu}$ est solution de (Q).

(c) Montrer que

$$\inf_{x \in \mathbb{R}^n} \sup_{\mu \in \mathbb{R}_+^p} \mathcal{L}(x, \mu) = \sup_{\mu \in \mathbb{R}_+^p} \inf_{x \in \mathbb{R}^n} \mathcal{L}(x, \mu)$$

IV.4. On considère $x^* \in K$ une solution de (P) satisfaisant l'hypothèse (H). Soit $\mu^* = (\mu_1^*, \dots, \mu_p^*)$ comme dans la question III.7. Montrer que μ^* est solution de (Q).

IV.5. On suppose dans toute cette question que la fonction $\mu \in \mathbb{R}_+^p \mapsto x_\mu$ est continue. On considère une solution $\bar{\mu} \in \mathbb{R}_+^p$ de (Q).

(a) Soient $\mu \in \mathbb{R}_+^p$ et $\xi \in \mathbb{R}^p$ tels que $\mu + \xi \in \mathbb{R}_+^p$. Montrer que pour tout $t \in [0, 1]$, $\mu + t\xi \in \mathbb{R}_+^p$, et

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{G(\mu + t\xi) - G(\mu)}{t} = \langle g(x_\mu), \xi \rangle$$

En déduire que pour tout $\mu \in \mathbb{R}_+^p$, $\langle g(x_{\bar{\mu}}), \mu - \bar{\mu} \rangle \leq 0$.

(b) Montrer que $x_{\bar{\mu}}$ est solution de (P).

IV.6. (Théorème d'Uzawa). Soient $A \in \mathcal{M}_{p,n}(\mathbb{R})$ une matrice de rang p et $b \in \mathbb{R}^p$. On suppose que la fonction g est de la forme

$$g : x \mapsto Ax + b$$

(a) Montrer que pour tout $\mu \in \mathbb{R}_+^p$, $\nabla f(x_\mu) = -A^\top \mu$, et en déduire que la fonction $\mu \mapsto x_\mu$ est continue sur \mathbb{R}_+^p .

(b) Montrer que (P) admet une unique solution $x^* \in K$ et que (Q) admet une unique solution $\mu^* \in \mathbb{R}_+^p$.

Soit $\rho > 0$. On définit la suite $(\mu^k)_{k \in \mathbb{N}}$ par récurrence de la manière suivante :

- on fixe $\mu^0 \in \mathbb{R}_+^p$

- pour tout $k \in \mathbb{N}$, on pose $\mu^{k+1} = P_{\mathbb{R}_+^p}(\mu^k + \rho g(x_{\mu^k}))$

où $P_{\mathbb{R}_+^p} : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}_+^p$ est la projection sur le convexe fermé \mathbb{R}_+^p de \mathbb{R}^p .

(c) Montrer que $\mu^* = P_{\mathbb{R}_+^p}(\mu^* + \rho g(x_{\mu^*}))$.

On suppose désormais que $\|Ax\| \leq \sqrt{\frac{\alpha}{\rho}} \|x\|$ pour tout $x \in \mathbb{R}^n$.

(d) Montrer que la suite $(x_{\mu^k})_{k \in \mathbb{N}}$ converge vers x^* .

(e) Montrer que la suite $(\mu^k)_{k \in \mathbb{N}}$ converge vers μ^* .