

Calcul différentiel

14 octobre 2014

Table des matières

1	Calcul variationnel	2
1.1	Cas scalaire	2
1.2	Courbes paramétrées	4
1.3	Hamiltonien	4

1 Calcul variationnel

1.1 Cas scalaire

Ici : recherche d'optimum non plus dans un espace de réels, mais dans un espace de fonctions. On cherche y^* tel que :

$$I(y^*) = \min_{y \in \mathcal{F}} I(y)$$

Considérons $y : [x_1, x_2] \rightarrow \mathbb{R}$ et $L : [x_1, x_2] \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Parmi tous les y , dérivable et tel que $y(x_1) = y_1$ et $y(x_2) = y_2$, trouver la courbe minimisant :

$$I(y) = \int_{x_1}^{x_2} L(x, y(x), y'(x)) dx \quad (\text{P})$$

⇒ Théorème: Euler-Lagrange

Si $y \in \mathcal{C}^1[x_1, x_2]$ minimise $\int_{x_1}^{x_2} L(x, y, y') dx$ parmi toutes les fonctions telles que $y(x_1) = y_1$ et $y(x_2) = y_2$ où $L \in \mathcal{C}^2$, alors y satisfait :

$$\frac{\partial L}{\partial y} - \frac{d}{dx} \frac{\partial L}{\partial y'} = 0$$

Idée de la démonstration : On prend y minimisant I , et on pose $Y = y + \varepsilon \eta$, avec $\eta(x_1) = \eta(x_2) = 0$, puis on reprend I dépendant de ε . I est minimal pour $\varepsilon = 0$, on dérive, on trouve ce qu'il faut !

✚ Définition:

g est une intégrale première de l'équation d'Euler-Lagrange si g est constante le long des solutions de l'équation d'Euler-Lagrange.

📖 Propriété:

1. Si $L = L(x, y')$, alors $\frac{\partial L}{\partial y'} = C$
2. Si $L = L(y, y')$ alors $L - y' \frac{\partial L}{\partial y'} = C$.

✦ *Définition: Topologie dans $\mathcal{C}([x_1, x_2])$*

On définit une topologie dans $\mathcal{C}^0([x_1, x_2])$:

$$\forall y \in \mathcal{C}^0; \|y\|_{\mathcal{C}^0} = \max_{x \in [x_1, x_2]} \|y(x)\|_2$$

$$\forall y \in \mathcal{C}^0([x_1, x_2]), V_\varepsilon^0(y) = \{\tilde{y} \in \mathcal{C}^0([x_1, x_2]); \|y - \tilde{y}\|_{\mathcal{C}^0} < \varepsilon\}$$

On fait de même dans $\mathcal{C}^1([x_1, x_2])$:

$$\forall y \in \mathcal{C}^1; \|y\|_{\mathcal{C}^1} = \max_{x \in [x_1, x_2]} \|y(x)\|_2 + \max_{x \in [x_1, x_2]} \|y'(x)\|_2$$

$$\forall y \in \mathcal{C}^1([x_1, x_2]), V_\varepsilon^1(y) = \{\tilde{y} \in \mathcal{C}^1([x_1, x_2]); \|y - \tilde{y}\|_{\mathcal{C}^1} < \varepsilon\}$$

✦ *Définition:*

On considère que le problème **P** admet comme solution y^* .
 y^* est un minimum fort strict s'il existe un voisinage dans $\mathcal{C}^0([x_1, x_2])$ (ie $V_\varepsilon^0(y^*)$) tel que :

$$I(y^*) < I(y) \forall y \in V_\varepsilon^0(y^*)$$

C'est un maximum fort strict si :

$$I(y^*) > I(y) \forall y \in V_\varepsilon^0(y^*)$$

$$\exists V_\varepsilon^1(y^*); I(y^*) < I(y) \Rightarrow y^* \text{ minimum faible strict}$$

$$\exists V_\varepsilon^1(y^*); I(y^*) > I(y) \Rightarrow y^* \text{ maximum faible strict}$$

✦ *Définition:*

Soit $D = [x_1, x_2] \times \mathbb{R}$.
 $y(x, C), C \in \mathbb{R}$ est un champ d'extrémales, si :

1. $(x, y(x, C)) \in D, \forall C \in \mathbb{R}$
2. $\forall C \in \mathbb{R}, y(x)$ satisfait les équations d'Euler-Lagrange.

Ce champ est dit propre si $\forall (x_0, y_0) \in D, \exists ! y(x, C)$ extrémale.

Ce champ est dit central si $y(X, C) = y_1, \forall C \in \mathbb{R}$ et $y(x, C) \neq y(x, \tilde{C}), \forall C \neq \tilde{C}, \forall x \neq \tilde{x}$.

⇒ Théorème: Jacobi-Weierstrass

Supposons $L \in \mathcal{C}^3$. Considérons toujours le même problème de minimisation **P**.
Si y^* satisfait :

1. $y^*(x_1) = y_1$ et $y^*(x_2) = y_2$
2. y^* peut être plongé dans un champ d'extrémale soit propre soit central
3. $\frac{\partial^2 L}{\partial y'^2}(x, y^*, (y^*)') > 0$ (resp < 0)
Alors y^* est un minimum (resp. maximum) faible
4. $\frac{\partial^2 L}{\partial y'^2}(x, y, y') > 0$ (resp < 0) $\forall y \in V_\varepsilon^0(y^*)$
Alors y^* est un minimum (resp. maximum) fort.

1.2 Courbes paramétrées

On prend à présent $y : [x_1, x_2] \rightarrow \mathbb{R}^n$, $P_1 = (x_1, y_1)$, $P_2 = (x_2, y_2)$, $y_i \in \mathbb{R}^n$, $i = 1, 2$

$$L : [x_1, x_2] \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

On veut minimiser $I(y) = \int_{x_1}^{x_2} L(x, y(x), y'(x)) dx$

⇒ Théorème: Euler-Lagrange

Si $y \in \mathcal{C}^1[x_1, x_2]$ minimise $\int_{x_1}^{x_2} L(x, y, y') dx$ parmi toutes les fonctions telles que $y(x_1) = y_1$ et $y(x_2) = y_2$ où $L \in \mathcal{C}^2$, alors y satisfait :

$$\frac{\partial L}{\partial y_i} - \frac{d}{dx} \frac{\partial L}{\partial y'_i} = 0, \quad 1 \leq i \leq n$$

1.3 Hamiltonien

On pose à présent :

$$\begin{aligned} p_i &= \frac{\partial L}{\partial y'_i} \\ H &= -L + \sum_{i=1}^n y'_i p_i \end{aligned}$$

En calculant dH , on arrive au système suivant :

$$\begin{cases} y'_i &= \frac{\partial H}{\partial p_i} \\ p'_i &= -\frac{\partial H}{\partial y_i} \end{cases} \quad (\text{SH})$$

ce qui est un système hamiltonnien.

Proposition:

$I : \mathbb{R} \times \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ est une intégrale première de $\dot{z} = f(z)$ si et seulement si

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \sum_{i=1}^d \frac{\partial I}{\partial z_i} f_i \equiv 0$$

Corollaire:

Si $I = I(z)$, alors la condition devient :

$$\sum_{i=1}^d \frac{\partial I}{\partial z_i} f_i = L_f I \equiv 0$$

Proposition:

Si $L = L(y_1, \dots, x_n, y'_1, \dots, y'_n)$ alors H est une intégrale première.

Proposition:

1. $I = I(y, p)$ est une intégrale première de (SH) si :

$$L_f I = \underbrace{\sum_{i=1}^n \frac{\partial I}{\partial y_i} \frac{\partial H}{\partial p_i} - \frac{\partial I}{\partial p_i} \frac{\partial H}{\partial y_i}}_{=\{I, H\} \text{ crochet de Poisson de I et H}} = 0$$

2. $I = I(x, y, p)$ est une intégrale première de (SH) si et seulement si

$$\frac{\partial I}{\partial x} + \{I, H\} \equiv 0$$

Proposition:

H est une intégrale première si et seulement si L est invariant par rapport à $x \mapsto x + \alpha$, $\forall \alpha \in \mathbb{R}$.

Corollaire:

H est une intégrale première si et seulement si $I = \int_{x_1}^{x_2} L(x, y, y') dx$ est invariant par rapport à $x \mapsto x + \alpha$, $\forall \alpha \in \mathbb{R}$.

Considérons la transformation

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= \phi_0(x, y_1, \dots, y_n) \\ \tilde{y}_i &= \phi_i(x, y_1, \dots, y_n)\end{aligned}$$

Définition:

$I = \int_{x_1}^{x_2} L(x, y, y') dx$ est invariant par rapport à ϕ si

$$I = \int_{x_1}^{x_2} L(x, y, y') dx = \int_{x_1}^{x_2} L(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{y}') d\tilde{x}$$

On considère à présent une famille de transformation paramétré par α :

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= \phi_0(x, y_1, \dots, y_n, \alpha), \quad \phi_0(x, y_1, \dots, y_n, 0) = x \\ \tilde{y}_i &= \phi_i(x, y_1, \dots, y_n, \alpha), \quad \phi_i(x, y_1, \dots, y_n, 0) = y_i\end{aligned}$$

Théorème: Emmy Noether

Si ϕ préserve

$$I(y) = \int_{x_1}^{x_2} L(x, y, y') dx$$

alors le système d'Euler-Lagrange (ou de façon équivalente, (SH)) possède une intégrale première.