

Optimisation non linéaire et non convexe

Yann Chevaleyre, Paul Caillon, Clément Royer

Certificat Chef de Projet IA - Université Paris Dauphine-PSL

11 octobre 2023



- 1 Optimisation lisse
- 2 Descente de gradient

- 1 Optimisation lisse
 - Calcul différentiel et optimisation
 - Solutions et conditions d'optimalité
 - Classes de problèmes remarquables
- 2 Descente de gradient

- 1 Optimisation lisse
 - Calcul différentiel et optimisation
 - Solutions et conditions d'optimalité
 - Classes de problèmes remarquables
- 2 Descente de gradient

Problème

minimiser $f(\mathbf{x})$.
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$

Hypothèses

- f minorée par f^* ;
- f douce/lisse \Rightarrow les dérivées de f peuvent être utilisées pour résoudre ce problème.

On considère une fonction **lisse** (ou douce, ou *smooth*) $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$.

On considère une fonction **lisse** (ou douce, ou *smooth*) $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$.

Dérivée à l'ordre 1

Si f est continûment dérivable sur \mathbb{R}^d , on définit pour tout $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$ le **gradient de f en \mathbf{x}** par

$$\nabla f(\mathbf{x}) := \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}(\mathbf{x}) \right]_{1 \leq i \leq d} \in \mathbb{R}^d.$$

L'ensemble des fonctions continûment dérivables est noté \mathcal{C}^1 . On parle de fonction de classe \mathcal{C}^1 .

On considère une fonction **lisse** (ou douce, ou *smooth*) $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$.

On considère une fonction **lisse** (ou douce, ou *smooth*) $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$.

Dérivée d'ordre 2

Si f est *deux fois* continûment dérivable sur \mathbb{R}^d , on définit pour tout $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$ la **matrice hessienne de f en \mathbf{x}** par

$$\nabla^2 f(\mathbf{x}) := \left[\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(\mathbf{x}) \right]_{1 \leq i, j \leq d} \in \mathbb{R}^{d \times d}.$$

Cette matrice est **symétrique**.

L'ensemble des fonctions deux fois continûment dérivables est noté \mathcal{C}^2 (on dira que f est de classe \mathcal{C}^2).

Développement de Taylor à l'ordre 1

Si $f \in \mathcal{C}^1$, pour tous $\mathbf{x}, \mathbf{h} \in \mathbb{R}^d$,

$$f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \approx f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x})^T \mathbf{h}.$$

pour $\|\mathbf{h}\|$ suffisamment faible.

Développement de Taylor à l'ordre 1

Si $f \in \mathcal{C}^1$, pour tous $\mathbf{x}, \mathbf{h} \in \mathbb{R}^d$,

$$f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \approx f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x})^T \mathbf{h}.$$

pour $\|\mathbf{h}\|$ suffisamment faible.

Développement de Taylor à l'ordre 2

Si $f \in \mathcal{C}^2$, pour tous $\mathbf{x}, \mathbf{h} \in \mathbb{R}^d$,

$$f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \approx f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x})^T \mathbf{h} + \frac{1}{2} \mathbf{h}^T \nabla^2 f(\mathbf{x}) \mathbf{h}$$

pour $\|\mathbf{h}\|$ suffisamment faible.

Définition

Une fonction $\mathbf{g} : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^m$ est dite L -lipschitzienne si il existe $L > 0$ telle que

$$\forall(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in (\mathbb{R}^d)^2, \quad \|\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{g}(\mathbf{y})\| \leq L\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|.$$

La valeur L s'appelle une constante de Lipschitz pour \mathbf{g} .

- Concept de base, nombreuses variantes.
- $\mathcal{C}_L^{1,1}$: sous-ensemble de \mathcal{C}^1 des fonctions avec dérivée première L -lipschitzienne.

Approximation de Taylor à l'ordre 1

Soit $f \in \mathcal{C}_L^{1,1}$. Pour tous $\mathbf{x}, \mathbf{h} \in \mathbb{R}^d$,

$$f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \leq f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x})^T \mathbf{h} + \frac{L}{2} \|\mathbf{h}\|^2.$$

Approximation de Taylor à l'ordre 1

Soit $f \in \mathcal{C}_L^{1,1}$. Pour tous $\mathbf{x}, \mathbf{h} \in \mathbb{R}^d$,

$$f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \leq f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x})^T \mathbf{h} + \frac{L}{2} \|\mathbf{h}\|^2.$$

⇒ Une des inégalités majeures en optimisation non linéaire.

- 1 Optimisation lisse
 - Calcul différentiel et optimisation
 - Solutions et conditions d'optimalité
 - Classes de problèmes remarquables
- 2 Descente de gradient

minimiser $f(\mathbf{x})$
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$

Minimum global

Un point \mathbf{x}^* est un **minimum global** du problème si
 $f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x}) \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$.

Minimum local

Un point \mathbf{x}^* est un **minimum local (strict)** du problème s'il existe $\epsilon > 0$ tel que

$$f(\mathbf{x}^*) < f(\mathbf{x}) \quad \forall \mathbf{x}, \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*\| \leq \epsilon.$$

- Trouver des minima globaux est difficile en général;
- Trouver et certifier des minima locaux peut aussi être difficile.

- Trouver des minima globaux est difficile en général;
- Trouver et certifier des minima locaux peut aussi être difficile.

En optimisation lisse/douce

- Les dérivées donnent des informations;
- D'autres hypothèses sur la fonction peuvent aussi aider.

Problème sans contraintes minimiser $_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d} f(\mathbf{x})$,
 f de classe \mathcal{C}^1 .

Problème sans contraintes minimiser $_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d} f(\mathbf{x})$,
 f de classe \mathcal{C}^1 .

Condition nécessaire à l'ordre 1

Si \mathbf{x}^* est un minimum local du problème, **alors**

$$\|\nabla f(\mathbf{x}^*)\| = 0.$$

Problème sans contraintes minimiser $x \in \mathbb{R}^d$ $f(x)$,
 f de classe \mathcal{C}^1 .

Condition nécessaire à l'ordre 1

Si x^* est un minimum local du problème, **alors**

$$\|\nabla f(x^*)\| = 0.$$

- Cette condition est seulement nécessaire;
- Un point tel que $\|\nabla f(x^*)\| = 0$ peut aussi être un maximum local ou un point selle.

Problème sans contraintes minimiser $x \in \mathbb{R}^d$ $f(x)$,
 f de classe \mathcal{C}^2 .

Problème sans contraintes minimiser $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$ $f(\mathbf{x})$,
 f de classe \mathcal{C}^2 .

Condition à l'ordre 2

Si \mathbf{x}^* est un minimum local du problème, **alors**

$$\|\nabla f(\mathbf{x}^*)\| = 0 \quad \text{et} \quad \nabla^2 f(\mathbf{x}^*) \succeq 0.$$

Problème sans contraintes minimiser $x \in \mathbb{R}^d$ $f(x)$,
 f de classe \mathcal{C}^2 .

Condition à l'ordre 2

Si x^* est un minimum local du problème, **alors**

$$\|\nabla f(x^*)\| = 0 \quad \text{et} \quad \nabla^2 f(x^*) \succeq 0.$$

Condition à l'ordre 2

Si x^* vérifie

$$\|\nabla f(x^*)\| = 0 \quad \text{and} \quad \nabla^2 f(x^*) \succ 0,$$

alors c'est un minimum local du problème.

Minima globaux

- Possibles à trouver pour des problèmes **convexes**.
- Possibles aussi pour certaines classes de problèmes non convexes.

Minima globaux

- Possibles à trouver pour des problèmes **convexes**.
- Possibles aussi pour certaines classes de problèmes non convexes.

Minima locaux

- Peuvent être obtenus pour certaines classes de problèmes non convexes.
- En général, peuvent donner des valeurs plus mauvaises que celle des solutions du problème.

Minima globaux

- Possibles à trouver pour des problèmes **convexes**.
- Possibles aussi pour certaines classes de problèmes non convexes.

Minima locaux

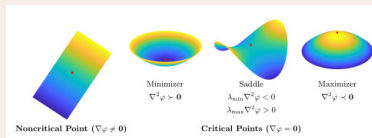
- Peuvent être obtenus pour certaines classes de problèmes non convexes.
- En général, peuvent donner des valeurs plus mauvaises que celle des solutions du problème.

Points stationnaires

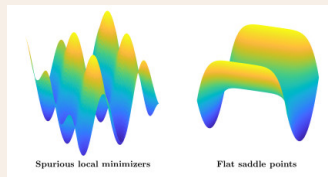
- D'ordre 1 ou 2, vérifient les conditions nécessaires d'optimalité.
- Calculables via des algorithmes.
- Peuvent être des minima/maxima locaux ou des points selles.

Points remarquables en optimisation

Cas favorables



Cas pathologiques



Source : J. Wright et Y. Ma, *High-Dimensional Data Analysis with Low-Dimensional Models*, 2022.

- 1 Optimisation lisse
 - Calcul différentiel et optimisation
 - Solutions et conditions d'optimalité
 - Classes de problèmes remarquables
- 2 Descente de gradient

Définition

Un ensemble $\mathcal{C} \in \mathbb{R}^d$ est dit **convexe** si

$$\forall(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \in \mathcal{C}^2, \forall t \in [0, 1], \quad t\mathbf{u} + (1 - t)\mathbf{v} \in \mathcal{C}.$$

Définition

Un ensemble $\mathcal{C} \in \mathbb{R}^d$ est dit **convexe** si

$$\forall(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \in \mathcal{C}^2, \forall t \in [0, 1], \quad t\mathbf{u} + (1 - t)\mathbf{v} \in \mathcal{C}.$$

Exemples :

- \mathbb{R}^d ;
- Droite : $\{t\mathbf{x} | t \in \mathbb{R}\}$ pour tout $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$;
- Boule : $\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d | \|\mathbf{x}\|^2 = \sum_{i=1}^d [\mathbf{x}]_i^2 \leq 1\}$.

Définition

Une fonction $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ est dite **convexe** si

$$\forall (\mathbf{u}, \mathbf{v}) \in (\mathbb{R}^d)^2, \forall t \in [0, 1], \quad f(t\mathbf{u} + (1 - t)\mathbf{v}) \leq t f(\mathbf{u}) + (1 - t) f(\mathbf{v}).$$

Définition

Une fonction $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ est dite **convexe** si

$$\forall (\mathbf{u}, \mathbf{v}) \in (\mathbb{R}^d)^2, \forall t \in [0, 1], \quad f(t\mathbf{u} + (1-t)\mathbf{v}) \leq t f(\mathbf{u}) + (1-t) f(\mathbf{v}).$$

Exemples :

- Fonction linéaire : $f(\mathbf{x}) = \mathbf{a}^T \mathbf{x} + b$;
- Norme au carré : $f(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x}\|^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{x}$.

Convexité et gradient

Une fonction $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 est convexe si et seulement si

$$\forall \mathbf{x}, \mathbf{h} \in \mathbb{R}^d, \quad f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \geq f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x})^T \mathbf{h}.$$

Convexité et gradient

Une fonction $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 est convexe si et seulement si

$$\forall \mathbf{x}, \mathbf{h} \in \mathbb{R}^d, \quad f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \geq f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x})^T \mathbf{h}.$$

L'autre inégalité clé en optimisation.

Convexité et gradient

Une fonction $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 est convexe si et seulement si

$$\forall \mathbf{x}, \mathbf{h} \in \mathbb{R}^d, \quad f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \geq f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x})^T \mathbf{h}.$$

L'autre inégalité clé en optimisation.

Convexité et matrice hessienne

Une fonction $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^2 est dite convexe si et seulement si $\nabla^2 f(\mathbf{x}) \succeq 0$ pour tout vecteur $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$.

minimiser $f(\mathbf{x})$, f convexe.
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$

minimiser $f(\mathbf{x})$, f convexe.
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$

Théorème

Tout minimum local de f est un minimum global.

minimiser $f(\mathbf{x})$, f convexe.
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$

Théorème

Tout minimum local de f est un minimum global.

Corollaire

Si f est de classe \mathcal{C}^1 , tout point \mathbf{x}^* tel que $\|\nabla f(\mathbf{x}^*)\| = 0$ est un minimum global de f .

Définition

Une fonction $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ est μ -fortement convexe si pour tous $(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \in (\mathbb{R}^d)^2$ et $t \in [0, 1]$, on a

$$f(t\mathbf{u} + (1-t)\mathbf{v}) \leq t f(\mathbf{u}) + (1-t)f(\mathbf{v}) - \frac{\mu}{2}t(1-t)\|\mathbf{v} - \mathbf{u}\|^2.$$

$\mathbf{x} \mapsto \frac{\mu}{2}\|\mathbf{x}\|^2$ est μ -fortement convexe.

Définition

Une fonction $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ est μ -fortement convexe si pour tous $(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \in (\mathbb{R}^d)^2$ et $t \in [0, 1]$, on a

$$f(t\mathbf{u} + (1-t)\mathbf{v}) \leq tf(\mathbf{u}) + (1-t)f(\mathbf{v}) - \frac{\mu}{2}t(1-t)\|\mathbf{v} - \mathbf{u}\|^2.$$

$\mathbf{x} \mapsto \frac{\mu}{2}\|\mathbf{x}\|^2$ est μ -fortement convexe.

Théorème

- Une fonction fortement convexe a au plus un minimum global.
- Une fonction continue fortement convexe a un unique minimum global.

Gradient et convexité forte

Soit $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 . Alors,

$$\forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in \mathbb{R}^d, \quad f(\mathbf{v}) \geq f(\mathbf{u}) + \nabla f(\mathbf{u})^T (\mathbf{v} - \mathbf{u}) + \frac{\mu}{2} \|\mathbf{v} - \mathbf{u}\|^2.$$

Hessienne et convexité forte

Soit $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^2 . Alors

$$f \text{ est } \mu\text{-fortement convexe} \iff \nabla^2 f(\mathbf{x}) \succeq \mu I \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^d.$$

Minimisation d'une quadratique convexe

$$\underset{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d}{\text{minimiser}} f(\mathbf{x}) := \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b}^T \mathbf{x}, \quad \mathbf{A} \succeq 0.$$

- $\nabla^2 f(\mathbf{x}) = \mathbf{A}$;
- Fortement convexe si $\mathbf{A} \succ 0$ avec $\mu = \lambda_{\min}(\mathbf{A})$.

Minimisation d'une quadratique convexe

$$\underset{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d}{\text{minimiser}} f(\mathbf{x}) := \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b}^T \mathbf{x}, \quad \mathbf{A} \succeq 0.$$

- $\nabla^2 f(\mathbf{x}) = \mathbf{A}$;
- Fortement convexe si $\mathbf{A} \succ 0$ avec $\mu = \lambda_{\min}(\mathbf{A})$.

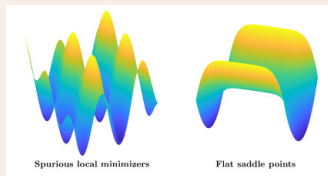
Projection sur un ensemble fermé convexe

$$\underset{\mathbf{x} \in \mathcal{X}}{\text{minimiser}} \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|^2, \quad \mathcal{X} \text{ fermé convexe.}$$

- Generalise le cas $\mathcal{X} = \mathbb{R}^d$;
- L'objectif est 1-fortement convexe \Rightarrow il existe une unique solution.

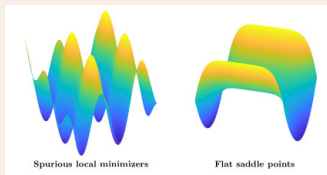
Problème non convexe pathologique

- Des minima locaux non globaux;
- De “mauvais” points selles.



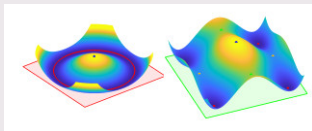
Problème non convexe pathologique

- Des minima locaux non globaux;
- De “mauvais” points selles.



Des instances favorables

- Points selles stricts (pas stationnaires à l'ordre 2);
- Équivalence entre minima locaux et globaux.



Source : J. Wright et Y. Ma, *High-Dimensional Data Analysis with Low-Dimensional Models*, 2022.

Complétion de matrice

$$\underset{X \in \mathbb{R}^{d_1 \times d_2}, \text{rank}(X) \leq r}{\text{minimiser}} \sum_{(i,j) \in \Omega} (X_{ij} - M_{ij})^2 \quad M \in \mathbb{R}^{d_1 \times d_2}, \Omega \subset [d_1] \times [d_2].$$

- Données : entrées de M observées.
- Hypothèse : M est de rang $r \ll \min(d_1, d_2)$.

Exemples de “bons” problèmes non convexes

Complétion de matrice

$$\underset{X \in \mathbb{R}^{d_1 \times d_2}, \text{rank}(X) \leq r}{\text{minimiser}} \sum_{(i,j) \in \Omega} (X_{ij} - M_{ij})^2 \quad M \in \mathbb{R}^{d_1 \times d_2}, \Omega \subset [d_1] \times [d_2].$$

- Données : entrées de M observées.
- Hypothèse : M est de rang $r \ll \min(d_1, d_2)$.

Formulation factorisée (Burer & Monteiro, '03)

$$\underset{U \in \mathbb{R}^{d_1 \times r}, V \in \mathbb{R}^{d_2 \times r}}{\text{minimiser}} \sum_{(i,j) \in \Omega} \left([U V^T]_{ij} - M_{ij} \right)^2,$$

- $(d_1 + d_2)r$ variables ($\ll d_1 d_2$).
- **Non convexe en U et V ...**
- ...mais ne possède que des points selles et des **minima globaux**.

Analyse en composantes principales/Calcul de valeurs propres

Partant de données $\{\mathbf{a}_i\}_{i=1\dots n}$, trouver la direction de variabilité maximale des \mathbf{a}_i en résolvant

$$\underset{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d}{\text{minimiser}} -\frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{C} \mathbf{x} \quad \text{s. c.} \quad \|\mathbf{x}\|^2 = 1,$$

avec

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mathbf{a}_i - \bar{\mathbf{a}})(\mathbf{a}_i - \bar{\mathbf{a}})^T \quad \bar{\mathbf{a}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{a}_i.$$

1 Optimisation lisse

2 Descente de gradient

- Algorithmes et descente de gradient
- Descente de gradient et optimisation convexe
- Accélération

1 Optimisation lisse

2 Descente de gradient

- Algorithmes et descente de gradient
- Descente de gradient et optimisation convexe
- Accélération

minimiser $f(\mathbf{x})$.
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$

minimiser $f(\mathbf{x})$.
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$

Hypothèses

- f est minorée par f_{low} ;
- f est lisse (au moins de classe \mathcal{C}^1).

De manière itérative

- Idée de base : étant donné un point courant, se déplacer vers un point potentiellement meilleur;
- Une itération représente l'ensemble des calculs nécessaires pour ce déplacement.

Notre but dans le reste du cours

- Proposer des algorithmes;
- Décrire leurs garanties théoriques;
- Vérifier leur intérêt pratique (notebooks).

Pour résoudre minimiser $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$ $f(\mathbf{x})$, l'algorithme devrait satisfaire les propriétés suivantes :

- 1 Les points calculés tendent vers une solution;
- 2 Les valeurs de l'objectif tendent vers la valeur optimale;
- 3 Une condition d'optimalité est satisfaite à la limite.

Pour résoudre minimiser $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$ $f(\mathbf{x})$, l'algorithme devrait satisfaire les propriétés suivantes :

- 1 Les points calculés tendent vers une solution;
- 2 Les valeurs de l'objectif tendent vers la valeur optimale;
- 3 Une condition d'optimalité est satisfaite à la limite.

Convergence des itérés

L'algorithme génère une suite $\{\mathbf{x}_k\}_k$ telle que

$$\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}^*\| \rightarrow 0 \quad \text{lorsque } k \rightarrow \infty,$$

où $\mathbf{x}^* \in \operatorname{argmin}_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d} f(\mathbf{x})$ est une solution globale du problème.

Convergence en valeur de fonction

$$f(\mathbf{x}_k) \rightarrow f^* \quad \text{lorsque } k \rightarrow \infty,$$

où $f^* = \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d} f(\mathbf{x})$.

Convergence en valeur de fonction

$$f(\mathbf{x}_k) \rightarrow f^* \quad \text{lorsque } k \rightarrow \infty,$$

où $f^* = \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d} f(\mathbf{x})$.

Convergence vers un point stationnaire d'ordre 1

$$\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\| \rightarrow 0 \quad \text{lorsque } k \rightarrow \infty.$$

Condition plus générale.

$$\underset{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d}{\text{minimiser}} f(\mathbf{x}), \quad f \in \mathcal{C}^1.$$

Pour tout $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$,

- 1 Soit \mathbf{x} est un minimum local et donc $\nabla f(\mathbf{x}) = 0$;
- 2 Soit f décroît **localement** depuis \mathbf{x} **dans la direction de $-\nabla f(\mathbf{x})$** .
Preuve basée sur Taylor.

Entrées : $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^d$, $\alpha_0 > 0$, $\varepsilon > 0$, $k_{\max} \in \mathbb{N}$.

Set $k = 0$.

- 1 Evaluer $\nabla f(\mathbf{x}_k)$; si $\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\| < \varepsilon$ terminer.
- 2 Poser $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k \nabla f(\mathbf{x}_k)$.
- 3 Incrémenter k de 1; si $k = k_{\max}$ terminer, sinon aller à l'étape 1.

Entrées : $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^d$, $\alpha_0 > 0$, $\varepsilon > 0$, $k_{\max} \in \mathbb{N}$.

Set $k = 0$.

- 1 Evaluer $\nabla f(\mathbf{x}_k)$; si $\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\| < \varepsilon$ terminer.
- 2 Poser $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k \nabla f(\mathbf{x}_k)$.
- 3 Incrémenter k de 1; si $k = k_{\max}$ terminer, sinon aller à l'étape 1.

Critères d'arrêt

- Convergence : $\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\| < \varepsilon$;
- Budget : $k = k_{\max}$.

Pas constant

Si $f \in \mathcal{C}_L^{1,1}$, poser $\alpha_k = \frac{1}{L}$:

- Garantit une décroissance à chaque itération;
- Mais demande de connaître L .

Pas décroissant

Choisir α_k tel que $\alpha_k \rightarrow 0$.

- Garantit une décroissance à partir d'un certain rang;
- Mais force la valeur à décroître.

En optimisation classique

- Recherche linéaire : À chaque itération, α_k obtenue par retour arrière (*backtracking*) sur un ensemble de valeurs en ordre décroissants (ex: $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots$).
- La valeur renvoyée vérifie une condition type décroissance de la valeur de l'objectif.

En apprentissage (notamment profond)

$\alpha_k = \text{Learning rate}$

- Utiliser une valeur fixe pendant un certain nombre d'itérations;
- Diminuer progressivement cette valeur selon une règle fixée (*scheduling*).

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d} f(\mathbf{x}), \quad f \in \mathcal{C}_L^{1,1}.$$

Rappels : Descente de gradient

- Itération : $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k \nabla f(\mathbf{x}_k)$, terminer si $\nabla f(\mathbf{x}_k) = 0$.
- Choix de base en théorie : $\alpha_k = \frac{1}{L}$.

Résultats théoriques

- Convergence : Montrer que $\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\| \rightarrow 0$;
- Vitesse de convergence : Décroissance de $\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\|$.
- Complexité au pire cas : Effort requis pour obtenir $\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\| \leq \epsilon$ pour $\epsilon > 0$.

Théorème

Si $f \in \mathcal{C}_L^{1,1}$ et $\alpha_k = \frac{1}{L}$, la descente de gradient produit \mathbf{x}_k tel que $\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\| \leq \epsilon$ en au plus

$$2L(f(\mathbf{x}_0) - f_{\text{low}})\epsilon^{-2} \text{ itérations.}$$

- Même résultat pour d'autres choix pour α_k , dont la recherche linéaire.
- On dit que la complexité de la descente de gradient est en $\mathcal{O}(\epsilon^{-2})$.

Théorème

Si $f \in \mathcal{C}_L^{1,1}$ et $\alpha_k = \frac{1}{L}$, alors pour tout $K \geq 1$, si $\{\mathbf{x}_k\}$ est la suite des itérés produite par l'algorithme de descente de gradient, on a

$$\min_{0 \leq k \leq K-1} \|\nabla f(\mathbf{x}_k)\| \leq \frac{\sqrt{2L(f(\mathbf{x}_0) - f_{\text{low}})}}{\sqrt{K}}.$$

Interpretation

- On dit que la vitesse de convergence de la descente de gradient est $\mathcal{O}\left(\frac{1}{\sqrt{K}}\right)$.
- Il existe une fonction telle que cette vitesse correspond exactement au comportement de la méthode !

Sur un problème non convexe

- La descente de gradient converge vers un point $\bar{\mathbf{x}}$ tel que $\|\bar{\mathbf{x}}\| = 0$.
- Ce point peut être un point selle, voire un maximum local.

Théorème (Lee et al, 2015)

Pour **presque tout** $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^d$, la descente de gradient converge vers un point $\bar{\mathbf{x}}$ tel que

$$\|\nabla f(\bar{\mathbf{x}})\| = 0 \quad \text{et} \quad \nabla^2 f(\bar{\mathbf{x}}) \succeq 0.$$

1 Optimisation lisse

2 Descente de gradient

- Algorithmes et descente de gradient
- Descente de gradient et optimisation convexe
- Accélération

$$\underset{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d}{\text{minimiser}} f(\mathbf{x}), \quad f \in \mathcal{C}_L^{1,1}.$$

Descente de gradient

- Itération: $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k \nabla f(\mathbf{x}_k)$, terminer si $\nabla f(\mathbf{x}_k) = 0$.
- Choix typique en théorie : $\alpha_k = \frac{1}{L}$.

Avec la convexité

Hypothèse : $f^* = \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d} f(\mathbf{x})$ est atteint.

- Garanties relativement à un minimum **global**;
- On peut montrer que $f(\mathbf{x}_k) \rightarrow f^*$;
- On peut aussi montrer une convergence vers l'argmin.

Cas non convexe

- Critère : $\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\|$;
- Idée : être proche d'un point stationnaire.

Cas convexe/fortement convexe

- : $f(\mathbf{x}_k) - f^* \leq \epsilon$, avec $f^* = \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d} f(\mathbf{x})$;
- Idée : être proche de la valeur à l'optimum.
- Valeur liée à $\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}^*\|$ dans le cas fortement convexe.

Théorème

Si $f \in \mathcal{C}_L^{1,1}$ est convexe et $\alpha_k = \frac{1}{L}$, la descente de gradient calcule \mathbf{x}_k tel que $f(\mathbf{x}_k) - f^* \leq \epsilon$ en au plus

- $\mathcal{O}(\epsilon^{-1})$ itérations;
- $\mathcal{O}\left(\frac{L}{\mu} \ln(\epsilon^{-1})\right)$ itérations si f est μ -fortement convexe.

- Cas non convexe : $\mathcal{O}(\epsilon^{-2})$ pour garantir $\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\| \leq \epsilon$.
- On dit que la descente de gradient possède une meilleure complexité dans le cas convexe/fortement convexe.

Théorème

Si $f \in \mathcal{C}_L^{1,1}$ est convexe et $\alpha_k = \frac{1}{L}$, pour tout $K \in \mathbb{N}$, on a :

$$f(\mathbf{x}_K) - f^* \leq \frac{L \max_{\mathbf{x} \in \operatorname{argmin}_{\mathbf{v}} f(\mathbf{v})} \|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}\|}{2} \frac{1}{K}$$

pour f convexe, et

$$f(\mathbf{x}_K) - f^* \leq \left(1 - \frac{\mu}{L}\right)^K (f(\mathbf{x}_0) - f^*).$$

pour f μ -fortement convexe.

- Cas non convexe : $\mathcal{O}(1/\sqrt{K})$ pour $\min_{0 \leq k \leq K-1} \|\nabla f(\mathbf{x}_k)\|$.
- On dit que la descente de gradient converge plus rapidement dans le cas fortement convexe que dans le cas convexe.

1 Optimisation lisse

2 Descente de gradient

- Algorithmes et descente de gradient
- Descente de gradient et optimisation convexe
- Accélération

Motivation

- En optimisation non convexe, $\mathcal{O}(1/\sqrt{K})$ est la meilleure vitesse de convergence pour une méthode type gradient;
- Dans le cas convexe, c'est $\mathcal{O}(1/K^2)$, mieux que la descente de gradient en $\mathcal{O}(1/K)$.

Comment obtenir cette meilleure vitesse ?

- Stratégies de **gradient accéléré**, basées sur l'idée de **momentum**;
- **Principe** : Réutiliser l'information de l'itération précédente.

Méthode de la boule lestée (*Heavy ball*, Polyak, 1964)

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha \nabla f(\mathbf{x}_k) + \beta(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}).$$

- Terme de momentum $\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}$;
- Optimale sur des quadratiques fortement convexes...
- ... mais ne converge pas toujours pour f fortement convexe!

Algorithme($\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_{-1} = \mathbf{x}_0$)

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k \nabla f(\mathbf{x}_k + \beta_k(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1})) + \beta_k(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}).$$

- Un appel de gradient par itération;
- Terme de momentum : $\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}$ (pas précédent).

Version à deux suites($\mathbf{x}_0, \mathbf{z}_0 = \mathbf{x}_0$)

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{z}_k - \alpha_k \nabla f(\mathbf{z}_k) \\ \mathbf{z}_{k+1} &= \mathbf{x}_{k+1} + \beta_{k+1}(\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k). \end{cases}$$

Longueur de pas α_k

- $\alpha_k = \frac{1}{L}$;
- Autres : décroissante, recherche linéaire, etc.

Momentum β_k

- f μ -fortement convexe : $\beta_k = \frac{\sqrt{L} - \sqrt{\mu}}{\sqrt{L} + \sqrt{\mu}}$;
- f convexe : Utiliser deux suites

$$t_{k+1} = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 + 4t_k^2}), t_0 = 0, \quad \beta_k = \frac{t_k - 1}{t_{k+1}}.$$

Fonctions convexes

- Descente de gradient : $f(\mathbf{x}_K) - f^* \leq \mathcal{O}\left(\frac{1}{K}\right)$;
- Gradient accéléré : $f(\mathbf{x}_K) - f^* \leq \mathcal{O}\left(\frac{1}{K^2}\right)$.

Fonctions μ -fortement convexes

- Descente de gradient :

$$f(\mathbf{x}_K) - f^* \leq \left(1 - \frac{\mu}{L}\right)^K (f(\mathbf{x}_0) - f^*).$$

- Gradient accéléré

$$f(\mathbf{x}_K) - f^* \leq C \left(1 - \sqrt{\frac{\mu}{L}}\right)^K (f(\mathbf{x}_0) - f^*).$$

Optimisation non linéaire

- Conditions d'optimalité : Caractérisent des points remarquables au moyen des dérivées.
- Convexité = Contexte favorable pour la minimisation;
- Cas non convexe difficile, mais certaines classes de problèmes ont de bonnes propriétés.

Descente de gradient

- Algorithme de base pour l'optimisation “douce”;
- Applicable aux problèmes convexes et non convexes !
- Variantes accélérées optimales pour les problèmes convexes.

Ouvrages :

- J. Wright et Y. Ma, *High-Dimensional Data Analysis with Low-Dimensional Models*, Cambridge University Press, 2022.
- S. J. Wright et B. Recht, *Optimization for Data Analysis*, Cambridge University Press, 2022.
- A. Beck, *First-order methods in optimization*, MOS-SIAM Series on Optimization, 2017.

Tout à l'heure : Méthodes stochastiques avec Florentin Goyens.

Demain

- La gestion des dérivées;
- L'optimisation sans dérivées.

Tout à l'heure : Méthodes stochastiques avec Florentin Goyens.

Demain

- La gestion des dérivées;
- L'optimisation sans dérivées.

Merci beaucoup !