

Méthodes Numériques I

Algorithmique numérique

François Cuvelier

Laboratoire d'Analyse Géométrie et Applications
Institut Galilée
Université Paris XIII.

5 décembre 2012

Plan

1 Polynômes d'interpolation de Lagrange

2 Dérivation numérique

3 Intégration numérique

- Méthodes simplistes
- Méthodes de Newton-Cotes
- Méthodes composites
- Autres méthodes
- Intégrales multiples

4 Résolution de systèmes linéaires

- Vecteurs
- Matrices
- Factorisation LU

Définition

Définition

Soient $n \in \mathbb{N}^*$ et $(x_i, y_i)_{i \in \llbracket 0, n \rrbracket}$ avec $(x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2$ et les x_i distincts deux à deux. Le **polynôme d'interpolation de Lagrange** associé aux $n + 1$ points $(x_i, y_i)_{i \in \llbracket 0, n \rrbracket}$, noté \mathcal{P}_n , est donné par

$$\mathcal{P}_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i L_i(x), \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad (1)$$

avec

$$L_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}, \quad \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket, \quad \forall x \in \mathbb{R}. \quad (2)$$

Théorème

Théorème

Le **polynôme d'interpolation de Lagrange**, \mathcal{P}_n , associé aux $n + 1$ points $(x_i, y_i)_{i \in \llbracket 0, n \rrbracket}$, est l'unique polynôme de degré au plus n , vérifiant

$$\mathcal{P}_n(x_i) = y_i, \quad \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket. \quad (3)$$

Exemple

A titre d'exemple, on représente, En figure 1, le polynôme d'interpolation de Lagrange associé à 7 points donnés.

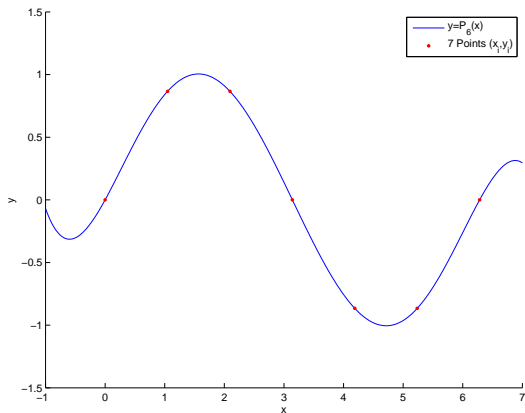


FIGURE: Polynôme d'interpolation de Lagrange avec 7 points donnés)

Exercices

Exercice

Ecrire la fonction LAGRANGE permettant de calculer \mathcal{P}_n (polynôme d'interpolation de Lagrange associé aux $n + 1$ points $(x_i, y_i)_{i \in \llbracket 0, n \rrbracket}$) au point $x \in \mathbb{R}$.

Exercice

Soit \mathcal{P}_n le polynôme d'interpolation de Lagrange associé aux $n + 1$ points $(x_i, y_i)_{i \in \llbracket 0, n \rrbracket}$ et \mathbf{X} un vecteur de \mathbb{R}^m .

- 1 Ecrire la fonction LAGRANGEVEC permettant de calculer le vecteur $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^m$ tel que*

$$Y_i = \mathcal{P}_n(X_i), \quad \forall i \in \llbracket 1, m \rrbracket.$$

- 2 Evaluer le coût arithmétique de la fonction LAGRANGEVEC en fonction de n et m .*

Exercices

Exercice

Soient $n \in \mathbb{N}^*$ et $(a, b) \in \mathbb{R}^2$ avec $a < b$. On note $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_{n+1})$ la discrétisation régulière de l'intervalle $[a, b]$ avec $n + 1$ points et $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{n+1}$ tel que $Y_i = f(X_i)$, $\forall i \in \llbracket 1, n + 1 \rrbracket$.

Écrire un programme permettant de représenter graphiquement f et \mathcal{P}_n (polynôme d'interpolation de Lagrange associé aux $n + 1$ points $(X_i, Y_i)_{i \in \llbracket 0, n \rrbracket}$) sur l'intervalle $[a, b]$.

On utilisera pour cela la fonction `PLOT` dont la syntaxe est `PLOT(x, y)` où x et y sont des vecteurs de \mathbb{R}^k . Cette fonction relie successivement les points $(x(j), y(j))$, pour j allant de 1 à k , par des segments.

Erreur de l'interpolation

Soit une fonction $f : [a, b] \longrightarrow \mathbb{R}$. On suppose que les y_i sont donnés par

$$y_i = f(x_i), \quad \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket. \quad (4)$$

On cherche à évaluer l'erreur $E_n(x) = f(x) - \mathcal{P}_n(x)$.

Erreur de l'interpolation

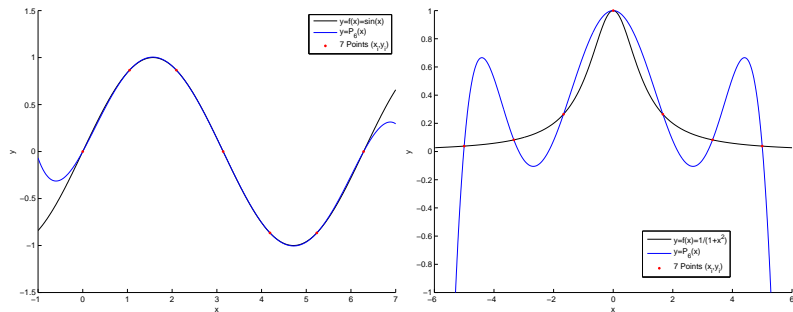


FIGURE: Erreurs d'interpolation avec $n = 6$

Erreur de l'interpolation

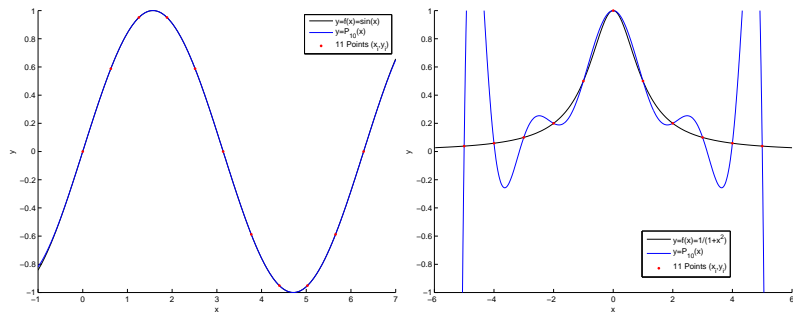


FIGURE: Erreurs d'interpolation avec $n = 10$

Erreur de l'interpolation

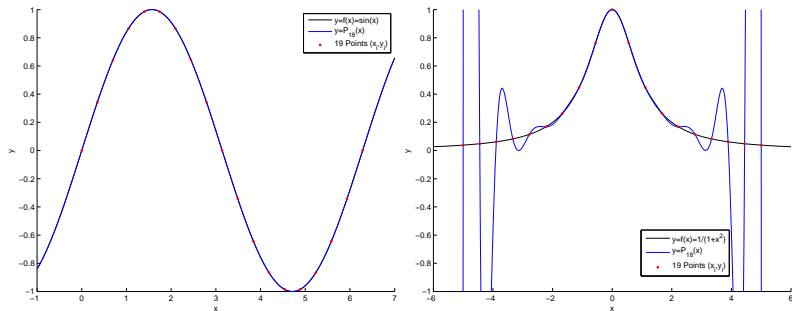


FIGURE: Erreurs d'interpolation avec $n = 18$

Erreur de l'interpolation

Théorème (Cauchy, 1840)

Soit $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, une fonction $(n + 1)$ -fois différentiable et soit $\mathcal{P}_n(x)$ le polynôme d'interpolation de degré n passant par

$(x_i, f(x_i)), \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket$. Alors, $\forall x \in [a, b]$,

$\exists \xi_x \in (\min_{i \in \llbracket 0, n \rrbracket} (x_i, x), \max_{i \in \llbracket 0, n \rrbracket} (x_i, x))$,

$$f(x) - \mathcal{P}_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi_x)}{(n+1)!} \prod_{i=0}^n (x - x_i) \quad (5)$$

Points de Chebyshev

Pour minimiser l'erreur commise lors de l'interpolation d'une fonction f par un polynôme d'interpolation de Lagrange, on peut, pour un n donné, "jouer" sur le choix des points x_i :

Trouver $(\bar{x}_i)_{i=0}^n$, $x_i \in [a, b]$, distincts deux à deux, tels que

$$\max_{x \in [a, b]} \prod_{i=0}^n |x - \bar{x}_i| \leq \max_{x \in [a, b]} \prod_{i=0}^n |x - x_i|, \quad \forall (x_i)_{i=0}^n, \quad x_i \in [a, b], \text{ distincts 2 à 2} \quad (6)$$

Points de Chebyshev

Théorème

Les points réalisant (6) sont les points de Chebyshev donnés par

$$\bar{x}_i = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \cos\left(\frac{(2i+1)\pi}{2n+2}\right), \quad \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket. \quad (7)$$

Points de Chebyshev

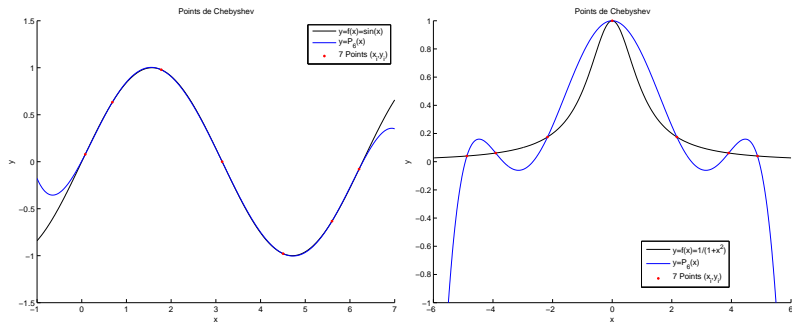


FIGURE: Erreurs d'interpolation avec $n = 6$

Points de Chebyshev

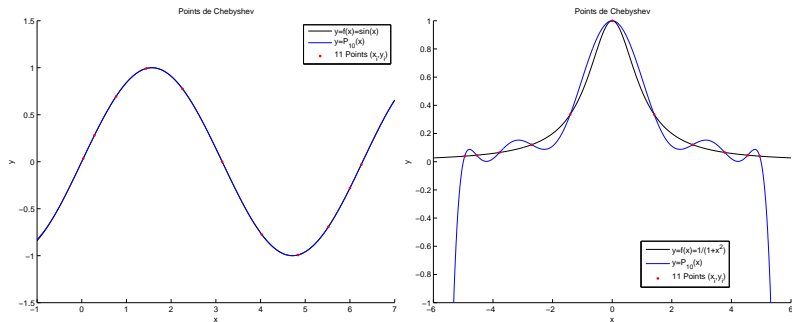


FIGURE: Erreurs d'interpolation avec $n = 10$

Points de Chebyshev

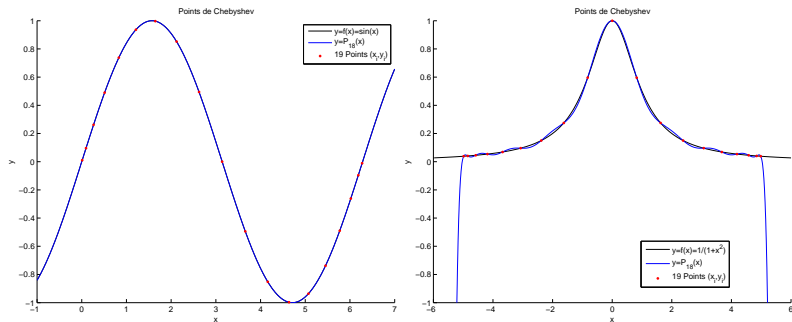


FIGURE: Erreurs d'interpolation avec $n = 18$

Plan

1 Polynômes d'interpolation de Lagrange

2 Dérivation numérique

3 Intégration numérique

- Méthodes simplistes
- Méthodes de Newton-Cotes
- Méthodes composites
- Autres méthodes
- Intégrales multiples

4 Résolution de systèmes linéaires

- Vecteurs
- Matrices
- Factorisation LU

Dérivée

On propose de chercher une approximation de la dérivée première de f en un point $\bar{x} \in]a, b[$.

Définition

Une fonction f définie sur un intervalle $[a, b]$ est dérivable en un point $\bar{x} \in]a, b[$ si la limite suivante existe et est finie

$$f'(\bar{x}) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (f(\bar{x} + h) - f(\bar{x})) \quad (8)$$

Premières approximations

différence finie progressive :

$$f'(\bar{x}) \approx \frac{f(\bar{x} + h) - f(\bar{x})}{h} \quad (9)$$

différence finie rétrograde :

$$f'(\bar{x}) \approx \frac{f(\bar{x}) - f(\bar{x} - h)}{h} \quad (10)$$

Théorème (Taylor-Lagrange)

On suppose que $f \in \mathcal{C}^{n+1}$ sur I . Alors, pour tout $h \in \mathbb{R}$ tel que $\bar{x} + h$ appartienne à I , il existe $\theta_h \in]0, 1[$ tel que l'on ait

$$f(\bar{x} + h) = \sum_{k=0}^n \frac{h^k}{k!} f^{(k)}(\bar{x}) + \frac{h^{n+1}}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\bar{x} + \theta_h h) \quad (11)$$

Estimation d'erreur

Soit $h > 0$. Si $f \in \mathcal{C}^2(]a, b[)$, alors $\exists \xi_+ \in]\bar{x}, \bar{x} + h[$, $\exists \xi_- \in]\bar{x} - h, \bar{x}[$, tel que

$$\frac{f(\bar{x} + h) - f(\bar{x})}{h} = f'(\bar{x}) + \frac{h}{2}f^{(2)}(\xi_+) \quad (12)$$

$$\frac{f(\bar{x}) - f(\bar{x} - h)}{h} = f'(\bar{x}) - \frac{h}{2}f^{(2)}(\xi_-) \quad (13)$$

Estimation d'erreur

Soit $h > 0$. Si $f \in \mathcal{C}^2(]a, b[)$, alors $\exists \xi_+ \in]\bar{x}, \bar{x} + h[$, $\exists \xi_- \in]\bar{x} - h, \bar{x}[$, tel que

$$\frac{f(\bar{x} + h) - f(\bar{x})}{h} = f'(\bar{x}) + \frac{h^1}{2} f^{(2)}(\xi_+) \quad (12)$$

$$\frac{f(\bar{x}) - f(\bar{x} - h)}{h} = f'(\bar{x}) - \frac{h^1}{2} f^{(2)}(\xi_-) \quad (13)$$

- Ces formules sont des approximations d'ordre **1** de $f'(\bar{x})$ par rapport à h .

Estimation d'erreur

Soit $h > 0$. Si $f \in \mathcal{C}^2(]a, b[)$, alors $\exists \xi_+ \in]\bar{x}, \bar{x} + h[$, $\exists \xi_- \in]\bar{x} - h, \bar{x}[$, tel que

$$\frac{f(\bar{x} + h) - f(\bar{x})}{h} = f'(\bar{x}) + \frac{h^1}{2} f^{(2)}(\xi_+) \quad (12)$$

$$\frac{f(\bar{x}) - f(\bar{x} - h)}{h} = f'(\bar{x}) - \frac{h^1}{2} f^{(2)}(\xi_-) \quad (13)$$

- Ces formules sont des approximations d'ordre **1** de $f'(\bar{x})$ par rapport à h .
- On peut aussi obtenir ces formules en dérivant les polynômes d'interpolation associés aux points $\{\bar{x}, \bar{x} + h\}$ et $\{\bar{x} - h, \bar{x}\}$.

Exercice 1

Exercice

On note $x_i = a + ih$, $i \in \llbracket 0, n \rrbracket$, une discrétisation régulière de l'intervalle $[a, b]$. Soit une fonction $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ suffisamment régulière. On suppose que les y_i sont donnés par

$$y_i = f(x_i), \quad \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket. \quad (14)$$

Écrire une fonction `DERIVE1` permettant de calculer des approximations d'ordre 1 de $f'(x_i)$ pour $i \in \llbracket 0, n \rrbracket$.

Ordre 2

Pour obtenir une formule d'approximation d'ordre 2 de $f'(\bar{x})$, on suppose $f \in \mathcal{C}^3(]a, b[)$ et on peut alors développer les formules de Taylor de $f(\bar{x} + h)$ et $f(\bar{x} - h)$ jusqu'au troisième ordre.

Ordre 2

Pour obtenir une formule d'approximation d'ordre 2 de $f'(\bar{x})$, on suppose $f \in \mathcal{C}^3(]a, b[)$ et on peut alors développer les formules de Taylor de $f(\bar{x} + h)$ et $f(\bar{x} - h)$ jusqu'au troisième ordre.

On obtient alors

$$f'(\bar{x}) = \frac{f(\bar{x} + h) - f(\bar{x} - h)}{2h} + \mathcal{O}(h^2). \quad (15)$$

Ordre 2

Pour obtenir une formule d'approximation d'ordre 2 de $f'(\bar{x})$, on suppose $f \in \mathcal{C}^3(]a, b[)$ et on peut alors développer les formules de Taylor de $f(\bar{x} + h)$ et $f(\bar{x} - h)$ jusqu'au troisième ordre.

On obtient alors

$$f'(\bar{x}) = \frac{f(\bar{x} + h) - f(\bar{x} - h)}{2h} + \mathcal{O}(h^2). \quad (15)$$

- Cette approximation est la formule des **différences finies centrées**.

Ordre 2

Pour obtenir une formule d'approximation d'ordre 2 de $f'(\bar{x})$, on suppose $f \in \mathcal{C}^3(]a, b[)$ et on peut alors développer les formules de Taylor de $f(\bar{x} + h)$ et $f(\bar{x} - h)$ jusqu'au troisième ordre.

On obtient alors

$$f'(\bar{x}) = \frac{f(\bar{x} + h) - f(\bar{x} - h)}{2h} + \mathcal{O}(h^2). \quad (15)$$

- Cette approximation est la formule des **différences finies centrées**.
- Cette approximation est d'ordre **2**.

Exercice 2

Exercice

On note $x_i = a + ih$, $i \in \llbracket 0, n \rrbracket$, une discrétisation régulière de l'intervalle $[a, b]$. Soit une fonction $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ suffisamment régulière. On suppose que les y_i sont donnés par

$$y_i = f(x_i), \quad \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket. \quad (16)$$

Écrire une fonction `DERIVE2` permettant de calculer des approximations d'ordre 2 de $f'(x_i)$ pour $i \in \llbracket 0, n \rrbracket$.

Dérivée seconde

Si $f \in \mathcal{C}^4(]a, b[)$, on peut alors développer les formules de Taylor de $f(\bar{x} + h)$ et $f(\bar{x} - h)$ jusqu'au quatrième ordre.

Dérivée seconde

Si $f \in \mathcal{C}^4(]a, b[)$, on peut alors développer les formules de Taylor de $f(\bar{x} + h)$ et $f(\bar{x} - h)$ jusqu'au quatrième ordre.

On obtient alors

$$f^{(2)}(\bar{x}) = \frac{f(\bar{x} + h) - 2f(\bar{x}) + f(\bar{x} - h)}{h^2} + \mathcal{O}(h^2). \quad (17)$$

Dérivée seconde

Si $f \in \mathcal{C}^4(]a, b[)$, on peut alors développer les formules de Taylor de $f(\bar{x} + h)$ et $f(\bar{x} - h)$ jusqu'au quatrième ordre.

On obtient alors

$$f^{(2)}(\bar{x}) = \frac{f(\bar{x} + h) - 2f(\bar{x}) + f(\bar{x} - h)}{h^2} + \mathcal{O}(h^2). \quad (17)$$

Cette approximation est d'ordre 2.

Exercice 3

Exercice

On note $x_i = a + ih$, $i \in \llbracket 0, n \rrbracket$, une discrétisation régulière de l'intervalle $[a, b]$. Soit une fonction $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ suffisamment régulière. On suppose que les y_i sont donnés par

$$y_i = f(x_i), \quad \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket. \quad (18)$$

Écrire une fonction `DERIVESECONDE2` permettant de calculer des approximations d'ordre 2 de $f^{(2)}(x_i)$ pour $i \in \llbracket 0, n \rrbracket$.

Plan

1 Polynômes d'interpolation de Lagrange

2 Dérivation numérique

3 **Intégration numérique**

- Méthodes simplistes
- Méthodes de Newton-Cotes
- Méthodes composites
- Autres méthodes
- Intégrales multiples

4 Résolution de systèmes linéaires

- Vecteurs
- Matrices
- Factorisation LU

Intégration

Soit f une fonction définie et intégrable sur un intervalle $[a, b]$ donné.
On propose de chercher une approximation de

$$I = \int_a^b f(x) dx$$

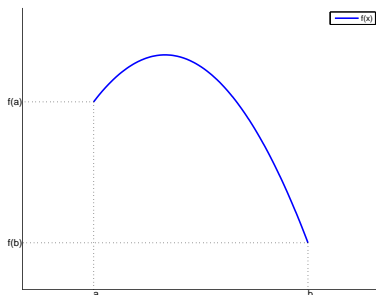


FIGURE: Représentation de la fonction f

Intégration

Soit f une fonction définie et intégrable sur un intervalle $[a, b]$ donné.
On propose de chercher une approximation de

$$I = \int_a^b f(x) dx$$

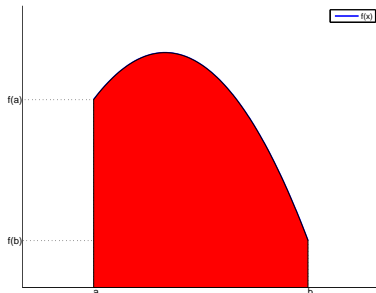


FIGURE: Représentation de $\int_a^b f(x) dx$

Méthodes simplistes

On approche f par le polynôme constant $P(x) = f(a)$.

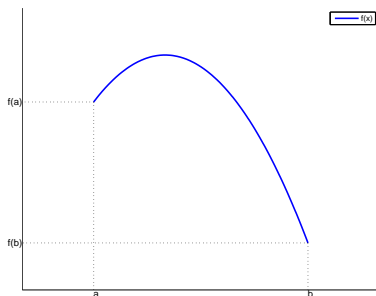


FIGURE: Représentation de la fonction f

Méthodes simplistes

On approche f par le polynôme constant $P(x) = f(a)$.

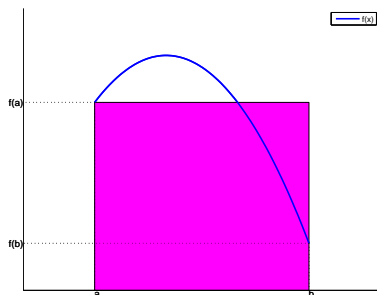


FIGURE: Représentation de $\int_a^b P(x) dx$

Méthodes simplistes

On approche f par le polynôme constant $P(x) = f(a)$.

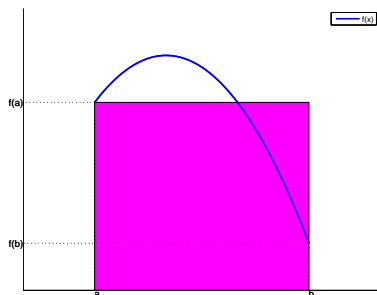


FIGURE: Représentation de $\int_a^b P(x)dx$

$$\int_a^b f(x)dx \approx (b-a)f(a), \text{ formule du rectangle (à gauche)}$$

Méthodes simplistes

On approche f par le polynôme constant $P(x) = f(b)$.

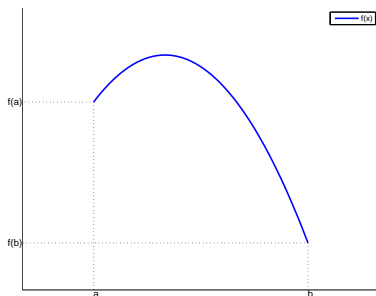


FIGURE: Représentation de la fonction f

Méthodes simplistes

On approche f par le polynôme constant $P(x) = f(b)$.

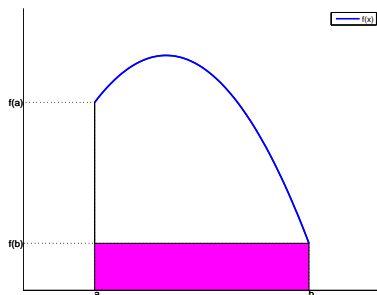


FIGURE: Représentation de $\int_a^b P(x) dx$

Méthodes simplistes

On approche f par le polynôme constant $P(x) = f(b)$.

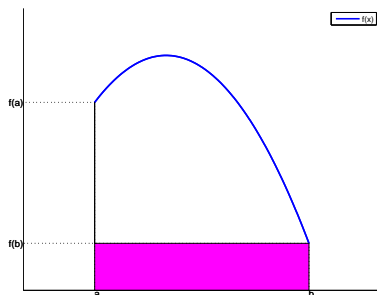


FIGURE: Représentation de $\int_a^b P(x)dx$

$$\int_a^b f(x)dx \approx (b-a)f(b), \text{ formule du rectangle (à droite)}$$

Méthodes simplistes

On approche f par le polynôme constant $P(x) = f(c)$, avec $c = (a + b)/2$.

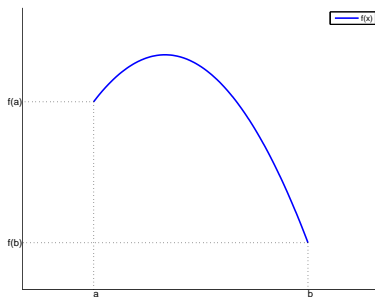


FIGURE: Représentation de la fonction f

Méthodes simplistes

On approche f par le polynôme constant $P(x) = f(c)$, avec $c = (a + b)/2$.

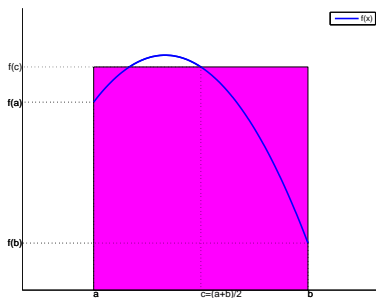


FIGURE: Représentation de $\int_a^b P(x) dx$

Méthodes simplistes

On approche f par le polynôme constant $P(x) = f(c)$, avec $c = (a + b)/2$.

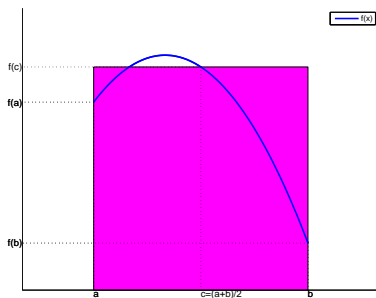


FIGURE: Représentation de $\int_a^b P(x) dx$

$$\int_a^b f(x) dx \approx (b - a) f\left(\frac{a + b}{2}\right), \text{ formule du point milieu}$$

Méthodes de Newton-Cotes

- 1 Discrétisation régulière de $[a, b]$: $\forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $x_i = a + ih$ avec $h = \frac{b-a}{n}$.

Méthodes de Newton-Cotes

- 1 Discrétisation régulière de $[a, b]$: $\forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $x_i = a + ih$ avec $h = \frac{b-a}{n}$.
- 2 On approche f par le polynôme d'interpolation de Lagrange \mathcal{P}_n de degré n tel que

$$\mathcal{P}_n(x_i) = f(x_i), \quad \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket.$$

Méthodes de Newton-Cotes

- 1 Discrétisation régulière de $[a, b]$: $\forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $x_i = a + ih$ avec $h = \frac{b-a}{n}$.
- 2 On approche f par le polynôme d'interpolation de Lagrange \mathcal{P}_n de degré n tel que

$$\mathcal{P}_n(x_i) = f(x_i), \quad \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket.$$

$$\mathcal{P}_n(x) = \sum_{i=0}^n L_i(x) f(x_i)$$

Méthodes de Newton-Cotes

- 1 Discrétisation régulière de $[a, b]$: $\forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $x_i = a + ih$ avec $h = \frac{b-a}{n}$.
- 2 On approche f par le polynôme d'interpolation de Lagrange \mathcal{P}_n de degré n tel que

$$\mathcal{P}_n(x_i) = f(x_i), \quad \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket.$$

$$\mathcal{P}_n(x) = \sum_{i=0}^n L_i(x) f(x_i)$$

- 3 On a alors

$$\int_a^b f(x) dx \approx \int_a^b \mathcal{P}_n(x) dx = \sum_{i=0}^n f(x_i) \int_a^b L_i(x) dx.$$

Méthodes de Newton-Cotes

- 1 Discrétisation régulière de $[a, b]$: $\forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $x_i = a + ih$ avec $h = \frac{b-a}{n}$.
- 2 On approche f par le polynôme d'interpolation de Lagrange \mathcal{P}_n de degré n tel que

$$\mathcal{P}_n(x_i) = f(x_i), \quad \forall i \in \llbracket 0, n \rrbracket.$$

$$\mathcal{P}_n(x) = \sum_{i=0}^n L_i(x) f(x_i)$$

- 3 On a alors

$$\int_a^b f(x) dx \approx \int_a^b \mathcal{P}_n(x) dx = \sum_{i=0}^n f(x_i) \int_a^b L_i(x) dx.$$

Les formules de Newton-Cotes génériques :

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=0}^n \alpha_i f(x_i)$$

Méthodes de Newton-Cotes

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=0}^n \alpha_i f(x_i) \quad \text{avec} \quad \alpha_i = \int_a^b L_i(x) dx$$

En posant $\alpha_i = hAw_i$, on a

n	A	w_0	w_1	w_2	w_3	w_4	nom	ordre
1	1/2	1	1				trapèzes	1
2	1/3	1	4	1			Simpson	3
3	3/8	1	3	3	1		Simpson (3/8)	3
4	2/45	7	32	12	32	7	Villarceau	5

Simpson : $\int_a^b f(x) dx \approx$

Méthodes de Newton-Cotes

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=0}^n \alpha_i f(x_i) \quad \text{avec} \quad \alpha_i = \int_a^b L_i(x) dx$$

En posant $\alpha_i = hAw_i$, on a

n	A	w_0	w_1	w_2	w_3	w_4	nom	ordre
1	1/2	1	1				trapèzes	1
2	1/3	1	4	1			Simpson	3
3	3/8	1	3	3	1		Simpson (3/8)	3
4	2/45	7	32	12	32	7	Villarceau	5

$$\text{Simpson : } \int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{6} \left(f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right)$$

Méthodes de Newton-Cotes

Définition

On dit qu'une formule d'intégration (ou formule de quadrature) est d'ordre n si elle est exacte pour les polynômes de degré inférieur ou égal à n .

Théorème

Les formules de Newton-Cotes à $n + 1$ points sont d'ordre n si n est impair et d'ordre $n + 1$ sinon.

Méthodes de Newton-Cotes

Définition

On dit qu'une formule d'intégration (ou formule de quadrature) est d'ordre n si elle est exacte pour les polynômes de degré inférieur ou égal à n .

Théorème

Les formules de Newton-Cotes à $n + 1$ points sont d'ordre n si n est impair et d'ordre $n + 1$ sinon.

Attention

Du au phénomène de Runge, ces formules ne sont pas "fiables" pour des ordres élevés.

Méthodes composites

Les méthodes composites sont basées sur la relation de Chasles.
Soit $(x_k)_{k \in \llbracket 0, n \rrbracket}$ une discrétisation régulière de l'intervalle $[a, b]$:
 $x_k = a + kh$ avec $h = (b - a)/n$. On a alors

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx.$$

Méthodes composites des points milieux

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx.$$

On note $m_k = \frac{x_{k-1} + x_k}{2}$.

$$\int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx \approx hf(m_k)$$

Méthodes composites des points milieux

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx.$$

On note $m_k = \frac{x_{k-1} + x_k}{2}$.

$$\int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx \approx hf(m_k)$$

Théorème

$$\int_a^b f(x) dx = h \sum_{k=1}^n f(m_k) + \mathcal{O}(h^2).$$

Méthodes composites des points milieux

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx.$$

On note $m_k = \frac{x_{k-1} + x_k}{2}$.

$$\int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx \approx hf(m_k)$$

Théorème

$$\int_a^b f(x) dx = h \sum_{k=1}^n f(m_k) + \mathcal{O}(h^2).$$

Formule d'ordre **2** (par rapport à h .)

Méthodes composites des points milieux : Exercice

Exercice

Soit f une fonction définie sur l'intervalle $[a, b]$. Ecrire la fonction QUADPM permettant de calculer une approximation de l'intégrale de f sur $[a, b]$ par la méthode composite des points milieux.

Méthodes composites des trapèzes

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx.$$

$$\int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx \approx h \left(\frac{f(x_{k-1}) + f(x_k)}{2} \right)$$

Méthodes composites des trapèzes

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx.$$

$$\int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx \approx h \left(\frac{f(x_{k-1}) + f(x_k)}{2} \right)$$

Théorème

$$\int_a^b f(x) dx = h \sum_{k=1}^n \left(\frac{f(x_{k-1}) + f(x_k)}{2} \right) + \mathcal{O}(h^2).$$

Méthodes composites des trapèzes

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx.$$

$$\int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx \approx h \left(\frac{f(x_{k-1}) + f(x_k)}{2} \right)$$

Théorème

$$\int_a^b f(x) dx = h \sum_{k=1}^n \left(\frac{f(x_{k-1}) + f(x_k)}{2} \right) + \mathcal{O}(h^2).$$

Formule d'ordre **2** (par rapport à h .)

Méthodes composites des trapèzes : Exercice

Exercice

Soit f une fonction définie sur l'intervalle $[a, b]$. Ecrire la fonction QUADTRAPEZE permettant de calculer une approximation de l'intégrale de f sur $[a, b]$ par la méthode composite des trapèzes.

Méthodes composites de Simpson

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx.$$

On note $m_k = \frac{x_{k-1} + x_k}{2}$.

$$\int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx \approx \frac{h}{6} (f(x_{k-1}) + 4f(m_k) + f(x_k))$$

Méthodes composites de Simpson

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx.$$

On note $m_k = \frac{x_{k-1} + x_k}{2}$.

$$\int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx \approx \frac{h}{6} (f(x_{k-1}) + 4f(m_k) + f(x_k))$$

Théorème

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{6} \sum_{k=1}^n (f(x_{k-1}) + 4f(m_k) + f(x_k)) + \mathcal{O}(h^4).$$

Méthodes composites de Simpson

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx.$$

On note $m_k = \frac{x_{k-1} + x_k}{2}$.

$$\int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx \approx \frac{h}{6} (f(x_{k-1}) + 4f(m_k) + f(x_k))$$

Théorème

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{6} \sum_{k=1}^n (f(x_{k-1}) + 4f(m_k) + f(x_k)) + \mathcal{O}(h^4).$$

Formule d'ordre 4 (par rapport à h .)

Méthodes composites de Simpson : Exercice

Exercice

Soit f une fonction définie sur l'intervalle $[a, b]$. Ecrire la fonction QUADSIMPSON permettant de calculer une approximation de l'intégrale de f sur $[a, b]$ par la méthode composite de Simpson.

Ordres (numériques) des méthodes composites

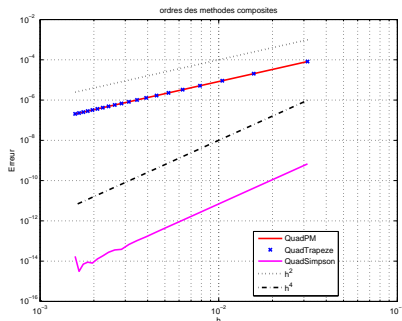


FIGURE: Ordre des méthodes composites

Exercice

Écrire un programme Matlab permettant d'obtenir cette figure sachant qu'ici $f(x) = \sin(x)$, $a = 0$ et $b = \pi$.

Autres méthodes

Il existe un grand nombre de méthodes d'intégration numérique :

- Méthode de Gauss-Legendre
- Méthode de Gauss-Tchebychev
- Méthode de Gauss-Laguerre
- Méthode de Gauss-Hermitte
- Méthode de Gauss-Lobatto
- Méthode de Romberg...

Intégrales multiples

On veut approcher, en utilisant la formule de Simpson, l'intégrale

$$I = \int_a^b \int_c^d f(x, y) dy dx$$

$$g(x) = \int_c^d f(x, y) dy \approx \tilde{g}(x) = \frac{d-c}{6} \left(f(x, c) + 4f\left(x, \frac{c+d}{2}\right) + f(x, d) \right).$$

On a

$$\begin{aligned} I = \int_a^b g(x) dx &\approx \frac{b-a}{6} \left(g(a) + 4g\left(\frac{a+b}{2}\right) + g(b) \right) \\ &\approx \frac{b-a}{6} \left(\tilde{g}(a) + 4\tilde{g}\left(\frac{a+b}{2}\right) + \tilde{g}(b) \right) \end{aligned}$$

Intégrales multiples : formule de Simpson 2D

On pose $\alpha = \frac{a+b}{2}$ et $\beta = \frac{c+d}{2}$

$$I \approx \frac{b-a}{6} \frac{d-c}{6} \begin{pmatrix} f(a, c) + 4f(a, \beta) + f(a, d) \\ +4(f(\alpha, c) + 4f(\alpha, \beta) + f(\alpha, d)) \\ +f(b, c) + 4f(b, \beta) + f(b, d) \end{pmatrix}$$

Intégrales multiples : méthodes composites

- 1 Discrétisation régulière de $[a, b]$: $\forall k \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $x_k = a + kh_x$ avec $h_x = \frac{b-a}{n}$.
- 2 Discrétisation régulière de $[c, d]$: $\forall l \in \llbracket 0, m \rrbracket$, $y_l = c + lh_y$ avec $h_y = \frac{d-c}{m}$.

Intégrales multiples : méthodes composites

- 1 Discrétisation régulière de $[a, b]$: $\forall k \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $x_k = a + kh_x$ avec $h_x = \frac{b-a}{n}$.
- 2 Discrétisation régulière de $[c, d]$: $\forall l \in \llbracket 0, m \rrbracket$, $y_l = c + lh_y$ avec $h_y = \frac{d-c}{m}$.
- 3 Relation de Chasles :

$$\int_a^b \int_c^d f(x, y) dy dx = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m \int_{x_{k-1}}^{x_k} \int_{y_{l-1}}^{y_l} f(x, y) dy dx.$$

Intégrales multiples : méthodes composites

- 1 Discrétisation régulière de $[a, b]$: $\forall k \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $x_k = a + kh_x$ avec $h_x = \frac{b-a}{n}$.
- 2 Discrétisation régulière de $[c, d]$: $\forall l \in \llbracket 0, m \rrbracket$, $y_l = c + lh_y$ avec $h_y = \frac{d-c}{m}$.
- 3 Relation de Chasles :

$$\int_a^b \int_c^d f(x, y) dy dx = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m \int_{x_{k-1}}^{x_k} \int_{y_{l-1}}^{y_l} f(x, y) dy dx.$$

- 4 Formule de Simpson 2D :

$$\begin{aligned} & \int_a^b \int_c^d f(x, y) dy dx \\ &= \\ & \frac{h_x h_y}{36} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m \left(\begin{array}{l} f(x_{k-1}, y_{l-1}) + 4f(x_{k-1}, \beta_l) + f(x_{k-1}, y_l) \\ + 4(f(\alpha_k, y_{l-1}) + 4f(\alpha_k, \beta_l) + f(\alpha_k, y_l)) \\ + f(x_k, y_{l-1}) + 4f(x_k, \beta_l) + f(x_k, y_l) \end{array} \right) \end{aligned}$$

avec $\alpha_k = \frac{x_{k-1} + x_k}{2}$ et $\beta_l = \frac{y_{l-1} + y_l}{2}$.

Plan

1 Polynômes d'interpolation de Lagrange

2 Dérivation numérique

3 Intégration numérique

- Méthodes simplistes
- Méthodes de Newton-Cotes
- Méthodes composites
- Autres méthodes
- Intégrales multiples

4 Résolution de systèmes linéaires

- Vecteurs
- Matrices
- Factorisation LU

Introduction

A faire

Vecteurs : $\mathbf{z} = \alpha\mathbf{x} + \mathbf{y}$

Exercice

Soient \mathbf{x} et \mathbf{y} deux vecteurs de \mathbb{R}^n et $\alpha \in \mathbb{R}$. Ecrire la fonction `VECAXPY` permettant de calculer $\mathbf{z} = \alpha\mathbf{x} + \mathbf{y}$.

Vecteurs : $\mathbf{z} = \alpha\mathbf{x} + \mathbf{y}$

Exercice

Soient \mathbf{x} et \mathbf{y} deux vecteurs de \mathbb{R}^n et $\alpha \in \mathbb{R}$. Ecrire la fonction `VECAXPY` permettant de calculer $\mathbf{z} = \alpha\mathbf{x} + \mathbf{y}$.

Correction

On pose $\mathbf{z} = \alpha\mathbf{x} + \mathbf{y}$. \mathbf{z} est un vecteur de \mathbb{R}^n et

$$z_i = \alpha x_i + y_i, \quad \forall i \in [1, n].$$



Vecteurs : $\mathbf{z} = \alpha\mathbf{x} + \mathbf{y}$

Algorithme 1 Fonction VECAXPY retournant $\mathbf{z} = \alpha\mathbf{x} + \mathbf{y}$ avec $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$
et $\alpha \in \mathbb{R}$

Données : \mathbf{x}, \mathbf{y} : deux vecteurs de \mathbb{R}^n
 α : un réel.

Résultat : \mathbf{z} : vecteur de \mathbb{R}^n .

- 1: **Fonction** $\mathbf{z} \leftarrow \text{VECAXPY}(\alpha, \mathbf{x}, \mathbf{y})$
- 2: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n **faire**
- 3: $\mathbf{z}(i) \leftarrow \alpha * \mathbf{x}(i) + \mathbf{y}(i)$
- 4: **Fin Pour**
- 5: **Fin Fonction**

Vecteurs

Exercice

Soient \mathbf{x} et \mathbf{y} deux vecteurs de \mathbb{R}^n .

- 1 Ecrire la fonction `VECDOT` permettant de calculer le produit scalaire entre les vecteurs \mathbf{x} et \mathbf{y} :

$$\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle = \sum_{i=1}^n x_i y_i. \quad (19)$$

- 2 Ecrire la fonction `VECNORM1` permettant de calculer

$$\|\mathbf{x}\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|, \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n. \quad (20)$$

- 3 Ecrire la fonction `VECNORM2` permettant de calculer

$$\|\mathbf{x}\|_2 = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^2 \right)^{1/2}, \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n. \quad (21)$$

Correction : fonction VEC DOT

Algorithme 2 Fonction VEC DOT permettant de calculer le produit scalaire des vecteurs \mathbf{x} et \mathbf{y} où $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ et $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$.

Données :

\mathbf{x} : vecteur de \mathbb{R}^n ,

\mathbf{y} : vecteur de \mathbb{R}^n .

Résultat : s : le réel tel que $s = \langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle$.

1: **Fonction** $s \leftarrow \text{VECDOT}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$

2: $s \leftarrow 0$

3: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n **faire**

4: $s \leftarrow s + x(i) * y(i)$

5: **Fin Pour**

6: **Fin Fonction**

Correction : fonction VECNORM1

Algorithme 3 Fonction VECNORM1 permettant de retourner $\|\mathbf{x}\|_1$ avec $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$

Données :

\mathbf{x} : vecteur de \mathbb{R}^n .

Résultat :

s : le réel tel que $s = \|\mathbf{x}\|_1$.

- 1: **Fonction** $s \leftarrow \text{VECNORM1}(\mathbf{x})$
- 2: $s \leftarrow 0$
- 3: **Pour** $i = 1$ à n **faire**
- 4: $s \leftarrow s + \text{ABS}(x(i))$
- 5: **Fin Pour**
- 6: **Fin Fonction**

Correction : fonction VECNORM2 (version 1)

Algorithme 4 Fonction VECNORM2 permettant de retourner $\|\mathbf{x}\|_2$ avec $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$

Données :

\mathbf{x} : vecteur de \mathbb{R}^n .

Résultat :

s : le réel tel que $s = \|\mathbf{x}\|_2$.

```
1: Fonction  $s \leftarrow \text{VECNORM2}(\mathbf{x})$ 
2:    $s \leftarrow 0$ 
3:   Pour  $i \leftarrow 1$  à  $n$  faire
4:      $s \leftarrow s + x(i) * x(i)$ 
5:   Fin Pour
6:    $s \leftarrow \text{SQRT}(s)$ 
7: Fin Fonction
```

Correction : fonction VECNORM2 (version 2)

Algorithme 5 Fonction VECNORM2 permettant de retourner $\|\mathbf{x}\|_2$ avec $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ (utilise la fonction VECDOT).

Données :

\mathbf{x} : vecteur de \mathbb{R}^n .

Résultat :

s : le réel tel que $s = \|\mathbf{x}\|_2$.

- 1: **Fonction** $s \leftarrow \text{VECNORM2}(\mathbf{x})$
 - 2: $s \leftarrow \text{SQRT}(\text{VECDOT}(\mathbf{x}, \mathbf{x}))$
 - 3: **Fin Fonction**
-

Matrices : $\mathbb{Z} = \alpha\mathbb{X} + \mathbb{Y}$

Exercice

Soient \mathbb{X} et \mathbb{Y} deux matrices de $\mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$ et $\alpha \in \mathbb{R}$. Ecrire la fonction MATAXPY permettant de retourner $\mathbb{Z} = \alpha\mathbb{X} + \mathbb{Y}$.

Matrices : $\mathbb{Z} = \alpha\mathbb{X} + \mathbb{Y}$

Exercice

Soient \mathbb{X} et \mathbb{Y} deux matrices de $\mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$ et $\alpha \in \mathbb{R}$. Ecrire la fonction MATAXPY permettant de retourner $\mathbb{Z} = \alpha\mathbb{X} + \mathbb{Y}$.

Correction On a $\mathbb{Z} \in \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$ et

$$\forall i \in [1, m], \forall j \in [1, n], Z_{i,j} = \alpha X_{i,j} + Y_{i,j}.$$



Matrices : $\mathbb{Z} = \alpha\mathbb{X} + \mathbb{Y}$

Algorithme 6 Fonction MATAXPY permettant de retourner $\mathbb{Z} = \alpha\mathbb{X} + \mathbb{Y}$ avec \mathbb{X} et \mathbb{Y} dans $\mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$, et $\alpha \in \mathbb{R}$

Données :

- α : un réel,
- \mathbb{X} : matrice de $\mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$,
- \mathbb{Y} : matrice de $\mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$.

Résultat :

- \mathbb{Z} : matrice de $\mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$ tel que $\mathbb{Z} = \alpha\mathbb{X} + \mathbb{Y}$.

- 1: **Fonction** $\mathbb{Z} \leftarrow \text{MATAXPY}(\alpha, \mathbb{X}, \mathbb{Y})$
- 2: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m **faire**
- 3: **Pour** $j \leftarrow 1$ à n **faire**
- 4: $Z(i,j) \leftarrow \alpha * X(i,j) + Y(i,j)$
- 5: **Fin Pour**
- 6: **Fin Pour**
- 7: **Fin Fonction**

Matrices : produit matrice-vecteur

Exercice

Ecrire la fonction MATMULT permettant de retourner le produit d'une matrice par un vecteur.

Matrices : produit matrice-vecteur

Exercice

Ecrire la fonction MATMULT permettant de retourner le produit d'une matrice par un vecteur.

Correction On rappelle que le produit d'une matrice $\mathbb{A} \in \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$ par un vecteur $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ est un vecteur de \mathbb{R}^m . On le note \mathbf{y} et on a

$$y_i = \sum_{j=1}^n A_{i,j} x_j, \quad \forall i \in \llbracket 1, m \rrbracket,$$

Matrices : produit matrice-vecteur

Algorithme 7- \mathcal{R}_0

1: Calcul de $\mathbf{y} \leftarrow \mathbf{A}\mathbf{x}$.

Matrices : produit matrice-vecteur

Algorithme 7- \mathcal{R}_0

Algorithme 7- \mathcal{R}_1

1: Calcul de $\mathbf{y} \leftarrow \mathbf{A}\mathbf{x}$.

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m **faire**

2: Calcul de $y_i \leftarrow \sum_{j=1}^n A_{i,j}x_j$

3: **Fin Pour**

Matrices : produit matrice-vecteur

Algorithme 7- \mathcal{R}_1

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m **faire**

2: Calcul de $y_i \leftarrow \sum_{j=1}^n A_{i,j}x_j$

3: **Fin Pour**

Matrices : produit matrice-vecteur

Algorithme 7- \mathcal{R}_1

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m **faire**

2: Calcul de $y_i \leftarrow \sum_{j=1}^n A_{i,j} x_j$

3: **Fin Pour**

Algorithme 7- \mathcal{R}_2

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m **faire**

2: $S \leftarrow 0$

3: **Pour** $j \leftarrow 1$ à n **faire**

4: $S \leftarrow S + A(i,j) * x(j)$

5: **Fin Pour**

6: $y(i) \leftarrow S$

7: **Fin Pour**

Matrices : produit matrice-vecteur

Algorithme 7 Fonction MATMULT

Données :

\mathbb{A} : matrice de $\mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$,

\mathbf{x} : vecteur de \mathbb{R}^n .

Résultat :

\mathbf{y} : vecteur de \mathbb{R}^m tel que $\mathbf{y} = \mathbb{A}\mathbf{x}$.

```
1: Fonction  $\mathbf{x} \leftarrow \text{MATMULT}(\mathbb{A}, \mathbf{x})$ 
2:   Pour  $i \leftarrow 1$  à  $m$  faire
3:      $S \leftarrow 0$ 
4:     Pour  $j \leftarrow 1$  à  $n$  faire
5:        $S \leftarrow S + A(i, j) * x(j)$ 
6:     Fin Pour
7:      $y(i) \leftarrow S$ 
8:   Fin Pour
9: Fin Fonction
```

Matrices : produit matrice-matrice

Exercice

Ecrire la fonction MATMATMULT permettant de retourner le produit de deux matrices.

Matrices : produit matrice-matrice

Exercice

Ecrire la fonction MATMATMULT permettant de retourner le produit de deux matrices.

Correction Soient $X \in \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$ et $Y \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$. On note $Z \in \mathcal{M}_{m,p}(\mathbb{R})$ la matrice produit i.e. $Z = XY$.

On rappelle que l'on a

$$Z_{i,j} = \sum_{k=1}^n X_{i,k} Y_{k,j}, \quad \forall (i,j) \in \llbracket 1, m \rrbracket \times \llbracket 1, p \rrbracket.$$

Matrices : produit matrice-matrice

Algorithme 8- \mathcal{R}_0

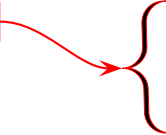
1: Calcul de $\mathbb{Z} = \mathbb{X}\mathbb{Y}$.

Matrices : produit matrice-matrice

Algorithme 8- \mathcal{R}_0

Algorithme 8- \mathcal{R}_1

1: Calcul de $\mathbb{Z} = \mathbb{X}\mathbb{Y}$.



1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m **faire**
2: Calcul ligne i matrice \mathbb{Z}
3: **Fin Pour**

Matrices : produit matrice-matrice

Algorithme 8- \mathcal{R}_1

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m **faire**
- 2: Calcul ligne i matrice \mathbb{Z}
- 3: **Fin Pour**

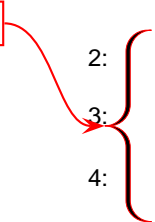
Matrices : produit matrice-matrice

Algorithme 8- \mathcal{R}_1

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m **faire**
- 2: Calcul ligne i matrice \mathbb{Z}
- 3: **Fin Pour**

Algorithme 8- \mathcal{R}_2

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m **faire**
- 2: **Pour** $j \leftarrow 1$ à p **faire**
- 3:
$$Z_{i,j} \leftarrow \sum_{k=1}^n X_{i,k} Y_{k,j}$$
- 4: **Fin Pour**
- 5: **Fin Pour**



Matrices : produit matrice-matrice

Algorithme 8- \mathcal{R}_2

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m **faire**

2: **Pour** $j \leftarrow 1$ à p **faire**

3: $Z_{i,j} \leftarrow \sum_{k=1}^n X_{i,k} Y_{k,j}$

4: **Fin Pour**

5: **Fin Pour**

Matrices : produit matrice-matrice

Algorithme 8- \mathcal{R}_2

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m faire
- 2: **Pour** $j \leftarrow 1$ à p faire
- 3: $Z_{i,j} \leftarrow \sum_{k=1}^n X_{i,k} Y_{k,j}$
- 4: **Fin Pour**
- 5: **Fin Pour**

Algorithme 8- \mathcal{R}_3

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à m faire
- 2: **Pour** $j \leftarrow 1$ à p faire
- 3: $S \leftarrow 0$
- 4: **Pour** $k \leftarrow 1$ à n faire
- 5: $S \leftarrow S + X_{i,k} Y_{k,j}$
- 6: **Fin Pour**
- 7: $Z_{i,j} \leftarrow S$
- 8: **Fin Pour**
- 9: **Fin Pour**

$$Z_{i,j} \leftarrow \sum_{k=1}^n X_{i,k} Y_{k,j}$$

Matrices : produit matrice-matrice

Algorithme 8 Fonction MATMATMULT

Données :

\mathbb{X} : matrice de $\mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$,

\mathbb{Y} : matrice de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$.

Résultat :

\mathbb{Z} : matrice de $\mathcal{M}_{m,p}(\mathbb{R})$ telle que $\mathbb{Z} = \mathbb{X}\mathbb{Y}$.

```
1: Fonction  $\mathbb{Z} \leftarrow \text{MATMATMULT}(\mathbb{X}, \mathbb{Y})$ 
2:   Pour  $i \leftarrow 1$  à  $m$  faire
3:     Pour  $j \leftarrow 1$  à  $p$  faire
4:        $S \leftarrow 0$ 
5:       Pour  $k \leftarrow 1$  à  $n$  faire
6:          $S \leftarrow S + X(i, k) * Y(k, j)$ 
7:       Fin Pour
8:        $Z(i, j) \leftarrow S$ 
9:     Fin Pour
10:  Fin Pour
11: Fin Fonction
```

Factorisation LU

Théorème

Soit $\mathbb{A} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ une matrice dont les sous-matrices principales sont inversibles alors il existe une unique matrice $\mathbb{L} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulaire inférieure à diagonale unité et une unique matrice $\mathbb{U} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulaire supérieure telles que

$$\mathbb{A} = \mathbb{L}\mathbb{U}.$$

Factorisation LU

Trouver $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ tel que

$$\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}. \quad (22)$$

est équivalent à

Trouver $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ solution de

$$\mathbb{L}\mathbf{y} = \mathbf{b} \quad (23)$$

puis $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ solution de

$$\mathbb{U}\mathbf{x} = \mathbf{y}. \quad (24)$$

Factorisation LU

Algorithme 9 Fonction RSLFACTLU pour résoudre $\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$

Données : \mathbb{A} : matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ dont les sous-matrices principales sont inversibles définie positive,
 \mathbf{b} : vecteur de \mathbb{R}^n .

Résultat : \mathbf{x} : vecteur de \mathbb{R}^n .

- 1: **Fonction** $\mathbf{x} \leftarrow \text{RSLFACTLU}(\mathbb{A}, \mathbf{b})$
 - 2: $[\mathbb{L}, \mathbb{U}] \leftarrow \text{FACTLU}(\mathbb{A})$ ▷ Factorisation LU
 - 3: $\mathbf{y} \leftarrow \text{RESTRINF}(\mathbb{L}, \mathbf{b})$ ▷ Résolution du système $\mathbb{L}\mathbf{y} = \mathbf{b}$
 - 4: $\mathbf{x} \leftarrow \text{RESTRISUP}(\mathbb{U}, \mathbf{y})$ ▷ Résolution du système $\mathbb{U}\mathbf{x} = \mathbf{y}$
 - 5: **Fin Fonction**
-

Résolution système triangulaire inférieur

Soit $\mathbb{A} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulère inférieure inversible et $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ donnés.

$$\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} A_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ A_{n,1} & \dots & \dots & A_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad b_i =$$

Résolution système triangulaire inférieur

Soit $\mathbb{A} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulère inférieure inversible et $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ donnés.

$$\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} A_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ A_{n,1} & \dots & \dots & A_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad b_i = \sum_{j=1}^n A_{i,j} x_j =$$

Résolution système triangulaire inférieur

Soit $\mathbb{A} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulère inférieure inversible et $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ donnés.

$$\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} A_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ A_{n,1} & \dots & \dots & A_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad b_i = \sum_{j=1}^n A_{i,j}x_j = \sum_{j=1}^i A_{i,j}x_j$$

Résolution système triangulaire inférieur

Soit $\mathbb{A} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulère inférieure inversible et $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ donnés.

$$\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} A_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ A_{n,1} & \dots & \dots & A_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad b_i = \sum_{j=1}^n A_{i,j}x_j = \sum_{j=1}^i A_{i,j}x_j$$

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad b_i = \sum_{j=1}^{i-1} A_{i,j}x_j + A_{i,i}x_i \quad (25)$$

Résolution système triangulaire inférieur

Remarque

La matrice \mathbb{A} est triangulaire inférieure inversible donc $A_{i,i} \neq 0$, $\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket$.

La formule

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad b_i = \sum_{j=1}^{i-1} A_{i,j}x_j + A_{i,i}x_i \quad (25)$$

peut donc s'écrire

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad x_i = \frac{1}{A_{i,i}} \left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} A_{i,j}x_j \right) \quad (26)$$

Remarque

On peut alors calculer successivement x_1, x_2, \dots, x_n .

Résolution système triangulaire inférieur

Algorithme 10- \mathcal{R}_0

1:

Résoudre $\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$
en calculant
successivement
 x_1, x_2, \dots, x_n .

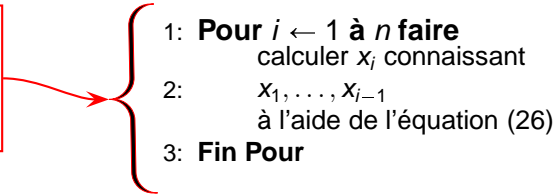
Résolution système triangulaire inférieur

Algorithme 10- \mathcal{R}_0

Algorithme 10- \mathcal{R}_1

1:

Résoudre $\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$
en calculant
successivement
 x_1, x_2, \dots, x_n .

- 
- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n **faire**
calculer x_i connaissant
 - 2: x_1, \dots, x_{i-1}
à l'aide de l'équation (26)
 - 3: **Fin Pour**

Résolution système triangulaire inférieur

Algorithme 10- \mathcal{R}_1

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n **faire**

Calculer x_i connaissant

2: x_1, \dots, x_{i-1}
à l'aide de l'équation (26)

3: **Fin Pour**

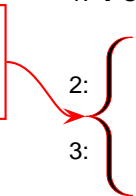
Résolution système triangulaire inférieur

Algorithme 10- \mathcal{R}_1

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n **faire**
Calculer x_i connaissant
- 2: x_1, \dots, x_{i-1}
à l'aide de l'équation (26)
- 3: **Fin Pour**

Algorithme 10- \mathcal{R}_2

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n **faire**
- 2: $S \leftarrow \sum_{j=1}^{i-1} A_{i,j} x_j$
- 3: $x_i \leftarrow (b_i - S) / A_{i,i}$
- 4: **Fin Pour**



Résolution système triangulaire inférieur

Algorithme 10- \mathcal{R}_2

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n **faire**

2:
$$S \leftarrow \sum_{j=1}^{i-1} A_{i,j}x_j$$

3: $x_i \leftarrow (b_i - S)/A_{i,i}$

4: **Fin Pour**

Résolution système triangulaire inférieur

Algorithme 10- \mathcal{R}_2

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n **faire**

2: $S \leftarrow \sum_{j=1}^{i-1} A_{i,j}x_j$

3: $x_i \leftarrow (b_i - S)/A_{i,i}$

4: **Fin Pour**

Algorithme 10- \mathcal{R}_3

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n **faire**

2: $S \leftarrow 0$

3: **Pour** $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ **faire**

4: $S \leftarrow S + A(i, j) * x(j)$

5: **Fin Pour**

6: $x_i \leftarrow (b_i - S)/A_{i,i}$

7: **Fin Pour**

Résolution système triangulaire inférieur

Algorithme 10 Fonction RESTRIINF

Données : \mathbb{A} : matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulaire inférieure inversible.
 \mathbf{b} : vecteur de \mathbb{R}^n .

Résultat : \mathbf{x} : vecteur de \mathbb{R}^n .

```
1: Fonction  $\mathbf{x} \leftarrow \text{RESTRIINF}(\mathbb{A}, \mathbf{b})$ 
2:   Pour  $i \leftarrow 1$  à  $n$  faire
3:      $S \leftarrow 0$ 
4:     Pour  $j \leftarrow 1$  à  $i - 1$  faire
5:        $S \leftarrow S + A(i, j) * x(j)$ 
6:     Fin Pour
7:      $x(i) \leftarrow (b(i) - S)/A(i, i)$ 
8:   Fin Pour
9:   return  $\mathbf{x}$ 
10: Fin Fonction
```

Résolution système triangulaire supérieur

Soit $\mathbb{A} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulère supérieure inversible et $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ donnés.

$$\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} A_{1,1} & \dots & \dots & A_{1,n} \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & A_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, b_i =$$

Résolution système triangulaire supérieur

Soit $\mathbb{A} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulère supérieure inversible et $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ donnés.

$$\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} A_{1,1} & \dots & \dots & A_{1,n} \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & A_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad b_i = \sum_{j=1}^n A_{i,j} x_j =$$

Résolution système triangulaire supérieur

Soit $\mathbb{A} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulère supérieure inversible et $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ donnés.

$$\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} A_{1,1} & \dots & \dots & A_{1,n} \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & A_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad b_i = \sum_{j=1}^n A_{i,j}x_j = \sum_{j=i}^n A_{i,j}x_j$$

Résolution système triangulaire supérieur

Soit $\mathbb{A} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulère supérieure inversible et $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ donnés.

$$\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} A_{1,1} & \dots & \dots & A_{1,n} \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & A_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad b_i = \sum_{j=1}^n A_{i,j}x_j = \sum_{j=i}^n A_{i,j}x_j$$

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad b_i = A_{i,i}x_i + \sum_{j=i+1}^n A_{i,j}x_j \quad (27)$$

Résolution système triangulaire supérieur

Remarque

La matrice \mathbb{A} est triangulaire supérieure inversible donc $A_{i,i} \neq 0$, $\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket$.

La formule

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad b_i = A_{i,i}x_i + \sum_{j=i+1}^n A_{i,j}x_j \quad (27)$$

peut donc s'écrire

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad x_i = \frac{1}{A_{i,i}} \left(b_i - \sum_{j=i+1}^n A_{i,j}x_j \right) \quad (28)$$

Remarque

On peut alors calculer successivement x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 .

Résolution système triangulaire supérieur

Algorithme 11- \mathcal{R}_0

1:

Résoudre $\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$
en calculant
successivement
 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 .

Résolution système triangulaire supérieur

Algorithme 11- \mathcal{R}_0

Algorithme 11- \mathcal{R}_1

1:

Résoudre $\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$
en calculant
successivement
 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 .

- 1: **Pour** $i \leftarrow n$ à 1 **faire** (**pas** -1)
calculer x_i connaissant
- 2: x_{i+1}, \dots, x_n
à l'aide de l'équation (28)
- 3: **Fin Pour**

Résolution système triangulaire supérieur

Algorithme 11- \mathcal{R}_1

1: **Pour** $i \leftarrow n$ à 1 **faire** (pas -1)

Calculer x_i connaissant

2: x_{i+1}, \dots, x_n
à l'aide de l'équation (28)

3: **Fin Pour**

Résolution système triangulaire supérieur

Algorithme 11- \mathcal{R}_1

1: **Pour** $i \leftarrow n$ à 1 **faire** (pas -1)

2: Calculer x_i connaissant
 x_{i+1}, \dots, x_n
à l'aide de l'équation (28)

3: **Fin Pour**

Algorithme 11- \mathcal{R}_2

1: **Pour** $i \leftarrow n$ à 1 **faire** (pas -1)

2: $S \leftarrow \sum_{j=i+1}^n A_{i,j}x_j$

3: $x_i \leftarrow (b_i - S)/A_{i,i}$

4: **Fin Pour**

Résolution système triangulaire supérieur

Algorithme 11- \mathcal{R}_2

1: **Pour** $i \leftarrow n$ à 1 **faire** (pas -1)

2:
$$S \leftarrow \sum_{j=i+1}^n A_{i,j}x_j$$

3: $x_i \leftarrow (b_i - S)/A_{i,i}$

4: **Fin Pour**

Résolution système triangulaire supérieur

Algorithme 11- \mathcal{R}_2

1: **Pour** $i \leftarrow n$ à 1 **faire** (pas -1)

2: $S \leftarrow \sum_{j=i+1}^n A_{i,j}x_j$

3: $x_i \leftarrow (b_i - S)/A_{i,i}$

4: **Fin Pour**

Algorithme 11- \mathcal{R}_3

1: **Pour** $i \leftarrow n$ à 1 **faire** (pas -1)

2: $S \leftarrow 0$

3: **Pour** $j \leftarrow i + 1$ à n **faire**

4: $S \leftarrow S + A(i,j) * x(j)$

5: **Fin Pour**

6: $x_i \leftarrow (b_i - S)/A_{i,i}$

7: **Fin Pour**

Résolution système triangulaire supérieur

Algorithme 11 Fonction RESTRISUP

Données : \mathbb{A} : matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulaire supérieur inversible,
 \mathbf{b} : vecteur de \mathbb{R}^n .

Résultat : \mathbf{x} : vecteur de \mathbb{R}^n .

- 1: **Fonction** $\mathbf{x} \leftarrow \text{RESTRISUP}(\mathbb{A}, \mathbf{b})$
- 2: **Pour** $i \leftarrow n$ à 1 **faire** (pas de -1)
- 3: $S \leftarrow 0$
- 4: **Pour** $j \leftarrow i + 1$ à n **faire**
- 5: $S \leftarrow S + A(i, j) * x(j)$
- 6: **Fin Pour**
- 7: $x(i) \leftarrow (b(i) - S)/A(i, i)$
- 8: **Fin Pour**
- 9: **Fin Fonction**

Factorisation LU

$$A = LU \quad (29)$$

c'est à dire

$$\begin{pmatrix} A_{1,1} & \dots & A_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \dots \\ A_{n,1} & \dots & A_{n,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ L_{2,1} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ L_{n,1} & \dots & L_{n,n-1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{1,1} & \dots & \dots & U_{n,1} \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & U_{n,n} \end{pmatrix}.$$

Factorisation LU

Remarque

Par récurrence, en supposant connues

- les $i - 1$ premières lignes de \mathbb{U}
- les $i - 1$ premières colonnes de \mathbb{L} ,

on peut déterminer

- la i -ème ligne de \mathbb{U}
- puis la i -ème colonne de \mathbb{L}

*par les formules valables **pour i allant de 1 à n***

Factorisation LU

Remarque

Par récurrence, en supposant connues

- les $i - 1$ premières lignes de \mathbb{U}
- les $i - 1$ premières colonnes de \mathbb{L} ,

on peut déterminer

- la i -ème ligne de \mathbb{U}
- puis la i -ème colonne de \mathbb{L}

par les formules valables **pour i allant de 1 à n**

$$U_{i,j} = \begin{cases} A_{i,j} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{i,k} U_{k,j}, & \forall j \in [i, n]. \\ 0, & \forall j \in [1, i - 1]. \end{cases} \quad (30)$$

Factorisation LU

Remarque

Par récurrence, en supposant connues

- les $i - 1$ premières lignes de \mathbb{U}
- les $i - 1$ premières colonnes de \mathbb{L} ,

on peut déterminer

- la i -ème ligne de \mathbb{U}
- puis la i -ème colonne de \mathbb{L}

par les formules valables **pour i allant de 1 à n**

$$U_{i,j} = \begin{cases} A_{i,j} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{i,k} U_{k,j}, & \forall j \in [i, n]. \\ 0, & \forall j \in [1, i-1]. \end{cases} \quad (30)$$

puis

$$L_{j,i} = \begin{cases} 0, & \forall j \in [1, i-1]. \\ 1, & j = i \\ \frac{1}{U_{i,i}} \left(A_{j,i} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{j,k} U_{k,i} \right), & \forall j \in [i+1, n], \end{cases} \quad (31)$$

Factorisation LU

Algorithme 12- \mathcal{R}_0

1: Calcul de \mathbb{L} et \mathbb{U}

Factorisation LU

Algorithme 12- \mathcal{R}_0

Algorithme 12- \mathcal{R}_1

1: Calcul de \mathbb{L} et \mathbb{U}

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n **faire**
2: Calcul ligne i de \mathbb{U} .
3: Calcul colonne i de \mathbb{L} .
4: **Fin Pour**

Factorisation LU

Algorithme 12- \mathcal{R}_1

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n **faire**
- 2: Calcul ligne i de \mathbb{U} .
- 3: Calcul colonne i de \mathbb{L} .
- 4: **Fin Pour**

Factorisation LU

Algorithme 12- \mathcal{R}_1

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n faire
- 2: Calcul ligne i de \mathbb{U} .
- 3: Calcul colonne i de \mathbb{L} .
- 4: **Fin Pour**

Algorithme 12- \mathcal{R}_2

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n faire
- 2: **Pour** $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 3: $U(i, j) \leftarrow 0$
- 4: **Fin Pour**
- 5: **Pour** $j \leftarrow i$ à n faire
- 6: $U_{i,j} \leftarrow A_{i,j} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{i,k} U_{k,j}$
- 7: **Fin Pour**
- 8: **Pour** $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 9: $L_{j,i} \leftarrow 0$
- 10: **Fin Pour**
- 11: $L_{i,i} \leftarrow 1$
- 12: **Pour** $j \leftarrow i + 1$ à n faire
- 13: $L_{j,i} \leftarrow \frac{1}{U_{i,i}} \left(A_{j,i} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{j,k} U_{k,i} \right)$
- 14: **Fin Pour**
- 15: **Fin Pour**

Factorisation LU

Algorithme 12- \mathcal{R}_2

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n faire
- 2: **Pour** $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 3: $U(i, j) \leftarrow 0$
- 4: **Fin Pour**
- 5: **Pour** $j \leftarrow i$ à n faire
- 6:

$$U_{i,j} \leftarrow A_{i,j} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{i,k} U_{k,j}$$

- 7: **Fin Pour**
- 8: **Pour** $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 9: $L_{j,i} \leftarrow 0$
- 10: **Fin Pour**
- 11: $L_{i,i} \leftarrow 1$
- 12: **Pour** $j \leftarrow i + 1$ à n faire
- 13:

$$L_{j,i} \leftarrow \frac{1}{U_{i,i}} \left(A_{j,i} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{j,k} U_{k,i} \right)$$

- 14: **Fin Pour**
- 15: **Fin Pour**

Factorisation LU

Algorithme 12- \mathcal{R}_2

Algorithme 12- \mathcal{R}_3

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n faire
2: **Pour** $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
3: $U(i, j) \leftarrow 0$
4: **Fin Pour**
5: **Pour** $j \leftarrow i$ à n faire
6:

$$U_{i,j} \leftarrow A_{i,j} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{i,k} U_{k,j}$$

7: **Fin Pour**
8: **Pour** $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
9: $L_{j,i} \leftarrow 0$
10: **Fin Pour**
11: $L_{i,i} \leftarrow 1$
12: **Pour** $j \leftarrow i + 1$ à n faire
13:

$$L_{j,i} \leftarrow \frac{1}{U_{i,i}} \left(A_{j,i} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{j,k} U_{k,i} \right)$$

14: **Fin Pour**
15: **Fin Pour**

1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n faire
2: **Pour** $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
3: $U(i, j) \leftarrow 0$
4: **Fin Pour**
5: **Pour** $j \leftarrow i$ à n faire
6:

$$\left. \begin{array}{l} 6: \\ 7: \end{array} \right\} \begin{array}{l} S_1 \leftarrow \sum_{k=1}^{i-1} L_{i,k} U_{k,j} \\ U_{i,j} \leftarrow A_{i,j} - S_1 \end{array}$$

8: **Fin Pour**
9: **Pour** $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
10: $L_{j,i} \leftarrow 0$
11: **Fin Pour**
12: $L_{i,i} \leftarrow 1$
13: **Pour** $j \leftarrow i + 1$ à n faire
14:

$$\left. \begin{array}{l} 14: \\ 15: \end{array} \right\} \begin{array}{l} S_2 \leftarrow \sum_{k=1}^{i-1} L_{j,k} U_{k,i} \\ L_{j,i} \leftarrow \frac{1}{U_{i,i}} (A_{j,i} - S_2) \end{array}$$

16: **Fin Pour**
17: **Fin Pour**

Factorisation LU

Algorithme 12- \mathcal{R}_3

- 1: **Pour** $i \leftarrow 1$ à n faire
- 2: **Pour** $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 3: $U(i, j) \leftarrow 0$
- 4: **Fin Pour**
- 5: **Pour** $j \leftarrow i$ à n faire

- 6:
$$S_1 \leftarrow \sum_{k=1}^{i-1} L_{i,k} U_{k,j}$$

- 7: $U_{i,j} \leftarrow A_{i,j} - S_1$

- 8: **Fin Pour**
- 9: **Pour** $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 10: $L_{j,i} \leftarrow 0$
- 11: **Fin Pour**
- 12: $L_{i,i} \leftarrow 1$
- 13: **Pour** $j \leftarrow i + 1$ à n faire

- 14:
$$S_2 \leftarrow \sum_{k=1}^{i-1} L_{j,k} U_{k,i}$$

- 15: $L_{j,i} \leftarrow \frac{1}{U_{i,i}} (A_{j,i} - S_2).$

- 16: **Fin Pour**
- 17: **Fin Pour**

Factorisation LU

Algorithme 12- \mathcal{R}_3

Algorithme 12- \mathcal{R}_4

- 1: Pour $i \leftarrow 1$ à n faire
- 2: Pour $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 3: $U(i, j) \leftarrow 0$
- 4: Fin Pour
- 5: Pour $j \leftarrow i$ à n faire

$$S_1 \leftarrow \sum_{k=1}^{i-1} L_{i,k} U_{k,j}$$

- 6: $U_{i,j} \leftarrow A_{i,j} - S_1$
- 7: Fin Pour
- 8: Pour $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 9: $L_{j,i} \leftarrow 0$
- 10: Fin Pour
- 11: $L_{i,i} \leftarrow 1$
- 12: Pour $j \leftarrow i + 1$ à n faire

$$S_2 \leftarrow \sum_{k=1}^{i-1} L_{j,k} U_{k,i}$$

- 13: $L_{j,i} \leftarrow \frac{1}{U_{i,i}} (A_{j,i} - S_2)$
- 14: Fin Pour
- 15: Fin Pour

- 1: Pour $i \leftarrow 1$ à n faire
- 2: Pour $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 3: $U(i, j) \leftarrow 0$
- 4: Fin Pour
- 5: Pour $j \leftarrow i$ à n faire

- 6: $S_1 \leftarrow 0$
- 7: Pour $k \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 8: $S_1 \leftarrow S_1 + L_{i,k} * U_{k,j}$
- 9: Fin Pour

- 10: $U_{i,j} \leftarrow A_{i,j} - S_1$
- 11: Fin Pour
- 12: Pour $j \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 13: $L_{j,i} \leftarrow 0$
- 14: Fin Pour
- 15: $L_{i,i} \leftarrow 1$
- 16: Pour $j \leftarrow i + 1$ à n faire

- 17: $S_2 \leftarrow 0$
- 18: Pour $k \leftarrow 1$ à $i - 1$ faire
- 19: $S_2 \leftarrow S_2 + L_{j,k} * U_{k,i}$
- 20: Fin Pour

$$L_{j,i} \leftarrow \frac{1}{U_{i,i}} (A_{j,i} - S_2)$$

- 21: Fin Pour
- 22: Fin Pour
- 23: Fin Pour

Factorisation LU

Algorithme 12 Fonction FACTLU

Données : A : matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$..

Résultat : L : matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulaire inférieure
avec $L_{i,i} = 1, \forall i \in [1, n]$

U : matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ triangulaire supérieure.

```
1: Fonction [L, U] ← FACTLU( A )
2:   Pour  $i \leftarrow 1$  à  $n$  faire
3:     Pour  $j \leftarrow 1$  à  $i - 1$  faire
4:        $U(i, j) \leftarrow 0$ 
5:     Fin Pour
6:     Pour  $j \leftarrow i$  à  $n$  faire
7:        $S_1 \leftarrow 0$ 
8:       Pour  $k \leftarrow 1$  à  $i - 1$  faire
9:          $S_1 \leftarrow S_1 + L(i, k) * U(k, j)$ 
10:      Fin Pour
11:       $U(i, j) \leftarrow A(i, j) - S_1$ 
12:    Fin Pour
13:    Pour  $j \leftarrow 1$  à  $i - 1$  faire
14:       $L(j, i) \leftarrow 0$ 
15:    Fin Pour
16:     $L(i, i) \leftarrow 1$ 
17:    Pour  $j \leftarrow i + 1$  à  $n$  faire
18:       $S_2 \leftarrow 0$ 
19:      Pour  $k \leftarrow 1$  à  $i - 1$  faire
20:         $S_2 \leftarrow S_2 + L(j, k) * U(k, i)$ 
21:      Fin Pour
22:       $L(j, i) \leftarrow (A_{j,i} - S_2) / U(i, i)$ .
23:    Fin Pour
24:  Fin Pour
25: Fin Fonction
```