

Informatique tronc commun – TP n° 13

Décomposition LU

Jeudi 4 avril 2019

1. **Lisez attentivement tout l'énoncé avant de commencer.**
2. Commencez la séance en créant un dossier au nom du TP dans le répertoire dédié à l'informatique de votre compte.
3. Ayez toujours un crayon et un papier sous la main. Quand vous réfléchissez à une question, utilisez les !
4. Vous devez être autonome. Ainsi, avant de poser une question à l'enseignant, merci de commencer par :
 - relire l'énoncé du TP (beaucoup de réponses se trouvent dedans) ;
 - relire les passages du cours¹ relatifs à votre problème ;
 - effectuer une recherche dans l'aide disponible sur votre ordinateur (ou sur internet) concernant votre question.

Il est alors raisonnable d'appeler votre enseignant pour lui demander des explications ou une confirmation !

On s'intéresse dans ce TP à la mise en œuvre de différentes méthodes de résolution de systèmes linéaires, ainsi qu'à l'étude de leur efficacité.

Instructions de rendu.

Attention : suivez précisément ces instructions. Vous enverrez à votre enseignant un fichier d'extension `.py` (script Python) nommé

`tp13_durif_kleim.py`,

où les noms de vos enseignants sont à remplacer par ceux des membres du binôme. Le nom de ce fichier ne devra comporter ni espace, ni accent, ni apostrophe, ni majuscule. Dans ce fichier, vous respecterez les consignes suivantes.

- Écrivez d'abord en commentaires (ligne débutant par `#`), le titre du TP, les noms et prénoms des étudiants du groupe.
- Commencez chaque question par son numéro écrit en commentaires.

1. Dans le cas fort improbable où vous ne vous en souviendriez pas.

- Les questions demandant une réponse écrite seront rédigées en commentaires.
- Les questions demandant une réponse sous forme de fonction ou de script respecteront pointilleusement les noms de variables et de fonctions demandés.

La figure demandée à la dernière question portera, comme d'habitude, un nom du type `tp13_durif_kleim_q10.png`, où les noms de vos enseignants sont à remplacer par ceux des membres du binôme.

1 Introduction.

Lisez cette partie *chez vous* avant de commencer le TP.

1.1 Décomposition LU.

Soit A une matrice carrée telle que toute sous-matrice principale (sous-matrice carrée calée dans le coin supérieur gauche) soit inversible.

On rappelle que :

- l'opération $L_i \leftarrow L_i + \alpha L_j$ effectuée sur les lignes d'une matrice A , revient à effectuer le produit $T(i, j, \alpha) \times A$, où $T(i, j, \alpha)$ est la matrice de transvection égale à l'identité, à l'exception du coefficient (i, j) qui vaut α ;
- l'opération $C_i \leftarrow C_i + \alpha C_j$ effectuée sur les colonnes d'une matrice A , revient à effectuer le produit $A \times T(j, i, \alpha)$.

On peut alors montrer que la matrice A admet une décomposition $A = LU$, où L est une matrice triangulaire inférieure et U une matrice triangulaire supérieure.

La matrice L est obtenue en appliquant à la matrice identité les opérations sur les colonnes correspondant aux inverses des matrices d'opérations sur les lignes permettant de trianguler A par la méthode de Gauss (sans échange de ligne : toute sous-matrice de A étant principale, on peut montrer que si la matrice A est rendue triangulaire pour ses k premières colonnes, alors le coefficient diagonal de la colonne suivante n'est pas nul et peut être choisi comme pivot).

Plus précisément : si T_1, \dots, T_p sont les p transvections successives à appliquer à A pour la rendre triangulaire supérieure, correspondant aux opérations sur les lignes effectuées pendant la phase de descente du pivot de Gauss, nous obtenons

$$(T_p \times \dots \times T_1) \times A = U.$$

Il suffit alors de poser

$$L = (T_p \times \dots \times T_1)^{-1} = I_n \times T_1^{-1} \times \dots \times T_p^{-1}.$$

L'intérêt réside dans le fait qu'on ramène la résolution de $AX = B$ à la résolution de deux systèmes triangulaires. Ceci s'avère notamment intéressant lorsque l'on a plusieurs systèmes à résoudre associés à la même matrice A .

1.2 Un exemple.

On considère la matrice

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & -1 \\ 9 & 5 & 4 \\ 3 & -3 & 16 \end{pmatrix}.$$

La phase de descente de l'algorithme du pivot de Gauss s'écrit comme suit (on la code comme en mathématiques, mais on numérote les lignes et les colonnes à partir de 0, comme en informatique).

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 3 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 9 & 5 & 4 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & -3 & -16 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) &\xLeftrightarrow[L_1 \leftarrow L_1 - 3L_0] \left(\begin{array}{ccc|ccc} 3 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 7 & -3 & 1 & 0 \\ 3 & -3 & -16 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \\ &\xLeftrightarrow[L_2 \leftarrow L_2 - L_0] \left(\begin{array}{ccc|ccc} 3 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 7 & -3 & 1 & 0 \\ 0 & -4 & -15 & -1 & 0 & 1 \end{array} \right) \\ &\xLeftrightarrow[L_2 \leftarrow L_2 + 2L_1] \left(\begin{array}{ccc|ccc} 3 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 7 & -3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -7 & 2 & 1 \end{array} \right) \end{aligned}$$

Avec

$$U = \begin{pmatrix} 3 & 1 & -1 \\ 0 & 2 & 7 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

qui est bien triangulaire supérieure, et

$$L' = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}}_{T(2,1,2)} \times \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{T(2,0,-1)} \times \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{T(1,0,-3)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -3 & 1 & 0 \\ -7 & 2 & 1 \end{pmatrix},$$

on a

$$L' \times A = U.$$

Ainsi, avec

$$L = (L')^{-1} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{T(1,0,3)} \times \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{T(2,0,1)} \times \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & 1 \end{pmatrix}}_{T(2,1,-2)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix},$$

qui est bien triangulaire inférieure, on a

$$A = L \times U.$$

1.3 Matrices dans Python avec numpy.

Nous allons écrire un programme permettant de calculer cette décomposition LU, et le comparer à l'algorithme du pivot de Gauss classique.

Pour cela, nous écrirons les matrices sous forme de tableaux bi-dimensionnels de type `array`, en utilisant le module `numpy`, dont voici quelques exemples d'utilisations.

```
>>> import numpy as np
>>> A=np.array([[1., 2.],
...            [3., 4.]])
>>> A
array([[ 1.,  2.],
       [ 3.,  4.]])
>>> B=np.eye(2)
>>> B[1,0]=2.
>>> B
array([[ 1.,  0.],
       [ 2.,  1.]])
>>> C = A.dot(A) + 2.*B.dot(A)
>>> C
array([[ 9., 14.],
       [25., 38.]])
```

On a bien calculé $C = A^2 + 2BA$, avec $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$ et $B = T(1, 0, 2)$.

Attention : les vecteur de `numpy` sont *homogènes*, *i.e.* ils ne peuvent contenir que des données du même type. Si l'on crée un vecteur (ou une matrice) d'entiers, tous les calculs se feront avec des entiers. Cela ne nous intéresse pas, ici. On prendra donc bien soin de n'utiliser que des flottants.

Nous utiliserons aussi les fonctions définies dans le fichier `random_matrix`, disponible sur le site de la classe, ainsi que la fonction `clock` du module `time` pour chronométrer les temps d'exécution.

Après avoir enregistré le fichier `random_matrix` dans votre dossier de travail, vous pourrez utiliser les fonctions écrites dedans en l'utilisant comme une bibliothèque Python, par l'une des commandes suivantes.

```
import random_matrix as rm
from random_matrix import *
```

On peut mesurer une durée en faisant la différence entre deux appels de la fonction `clock` (attention, son fonctionnement diffère selon les systèmes d'exploitation, mais nous ne nous en soucions pas ici), comme suit.

```
>>> from time import clock
>>> tic = clock()
>>> tic
0.045977
>>> x = [i**2 for i in range(10**5)]
```

```
>>> toc = clock()
>>> tic, toc
(0.045977, 0.068626)
>>> t = toc-tic
>>> t # temps écoulé en secondes
0.022649000000000001
```

2 Travail demandé.

Q1 Écrire une fonction `trans_ligne(A,i,j,alpha)` prenant en argument un quadruplet (A,i,j,α) , où A est une matrice d'ordre n , $i,j \in \llbracket 0,n \rrbracket$, et $\alpha \in \mathbb{R}$, et qui multiplie A à gauche par la matrice $T(i,j,\alpha)$, c'est-à-dire qui applique à A la transvection $L_i \leftarrow L_i + \alpha L_j$. Ainsi cette fonction modifie A et ne renvoie rien.

Attention : par souci d'efficacité, il est préférable de voir cette opération comme une opération entre des lignes de A , plutôt que comme un produit matriciel. On s'arrangera autant que possible pour éviter les calculs inutiles sur les coefficients qu'on sait être nuls. Ainsi cette fonction modifie A et ne renvoie rien.

Q2 Écrire une fonction `trans_colonne(A,i,j,alpha)` prenant en argument un quadruplet (A,i,j,α) , où A est une matrice d'ordre n , $i,j \in \llbracket 0,n \rrbracket$, et $\alpha \in \mathbb{R}$, et qui multiplie A à droite par l'inverse de la matrice $T(i,j,\alpha)$, c'est-à-dire qui applique à A la transvection $C_j \leftarrow C_j - \alpha C_i$.

Attention : les remarques de la question précédente sont toujours d'actualité.

Q3 Écrire une fonction `LU(A)` prenant en argument une matrice carrée A et renvoyant le couple de matrices (L,U) de la décomposition ci-dessus.

Q4 Écrire une fonction `resolution_sup(U,B)` prenant en argument un couple de matrices (U,B) , où U est une matrice triangulaire supérieure et B est une matrice ayant autant de lignes que U , et renvoyant la solution du système $UX = B$.

Q5 Écrire une fonction `resolution_inf(L,B)` prenant en argument un couple de matrices (L,B) , où L est une matrice triangulaire inférieure et B est une matrice ayant autant de lignes que L , et renvoyant la solution du système $LX = B$.

Q6 Écrire une fonction `temps_LU(A,B)` prenant en argument un couple de matrices (A,B) et qui renvoie le temps de résolution du système $AX = B$ par les opérations suivantes :

- calcul (une fois pour toutes) de la décomposition LU de A ;
- pour chaque colonne de B , notée b_i , résolution du système $AX = b_i$ à l'aide de deux systèmes triangulaires.

Attention : on fera bien attention à résoudre un système par colonne de B . On pourra au préalable créer une liste de colonnes pour B (la durée cette opération n'étant pas mesurée).

Q7 Écrire une fonction `temps_pivot(A,B)` prenant en argument un couple de matrices (A,B) et qui renvoie le temps de résolution du système $AX = B$ par les opérations suivantes :

- pour chaque colonne de B , notée b_i , résolution du système $AX = b_i$ à l'aide de l'algorithme du pivot de Gauss (vu en cours).

Attention : on fera bien attention à résoudre un système par colonne de B . On pourra au préalable créer une liste de colonnes pour B (la durée cette opération n'étant pas mesurée).

Q8 Écrire une fonction `temps_inverse(A,B)` prenant en argument un couple de matrices (A,B) et qui renvoie le temps de résolution du système $AX = B$ par les opérations suivantes :

- calcul (une fois pour toutes) de l'inverse de A par l'algorithme du pivot de Gauss ;
- pour chaque colonne de B , notée b_i , résolution du système $AX = b_i$ par le produit matriciel $A^{-1}b_i$.

Attention : on fera bien attention à résoudre un système par colonne de B . On pourra au préalable créer une liste de colonnes pour B (la durée cette opération n'étant pas mesurée).

Q9 Écrire une fonction `trace_temps(A,B,nom_de_fichier)` prenant en argument une matrice carrée A , une matrice B ayant autant de lignes que A et 25 colonnes ainsi qu'une chaîne de caractères `nom_de_fichier` et réalisant les actions suivantes :

- pour chaque $k \in \llbracket 1, 25 \rrbracket$, calcule le temps de résolution de k systèmes $AX = b_0, \dots, AX = b_{k-1}$, où b_0, \dots, b_{24} sont les colonnes de b , par chacune des méthodes précédentes (décomposition LU , pivot de Gauss et calcul de A^{-1}).
- trace les 3 séries de points et enregistre la figure dans `nom_de_fichier`.

Q10 Produire une figure par la fonction précédente pour des matrices $A \in \mathcal{M}_{100}(\mathbb{R})$ et $B \in \mathcal{M}_{100,25}(\mathbb{R})$ choisies aléatoirement (les coefficients étant pris uniformément dans $\llbracket 0, 100 \rrbracket$). Discuter de la figure obtenue.

Vous enverrez la figure produite à votre enseignant.