

Algorithmique — 2. Techniques algorithmiques

8. Programmation dynamique

Bruno Grenet



<https://membres-ljk.imag.fr/Bruno.Grenet/Algorithmique.html>

Université Grenoble Alpes – IM²AG
L3 Mathématiques et Informatique

Table des matières

1. Premier exemple : plus longue sous-suite croissante
2. Qu'est-ce que la programmation dynamique ?
3. Deuxième exemple : la distance d'édition
4. Bonus : le voyageur de commerce

Table des matières

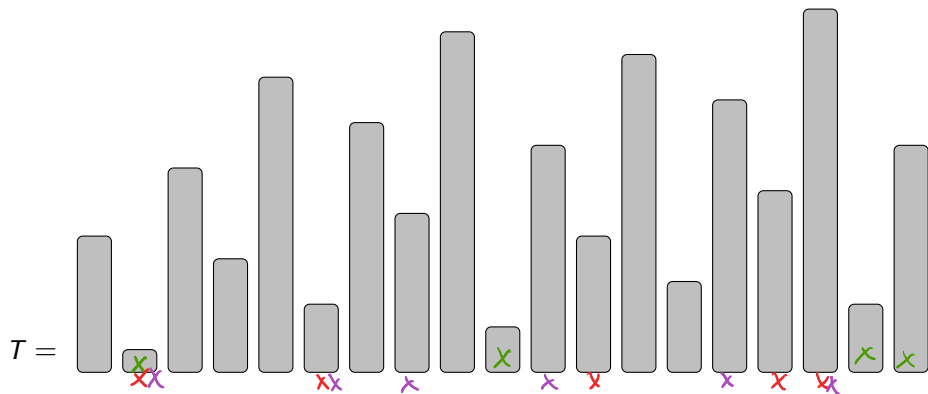
1. Premier exemple : plus longue sous-suite croissante

2. Qu'est-ce que la programmation dynamique ?

3. Deuxième exemple : la distance d'édition

4. Bonus : le voyageur de commerce

Plus longue sous-suite croissante



Définition

PLSSC(T) : plus longue sous-suite croissante $T_{[i_1]} \leq T_{[i_2]} \leq \dots \leq T_{[i_k]}$
 avec $0 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k < n$

6 5 4

Formalisation du problème

Entrée Un tableau T de n entiers

Sortie 1 La longueur d'une PLSSC de T

Sortie 2 Une PLSSC de T

Exemple précédent

Entrée $T = [6, 1, 9, 5, 13, 3, 11, 7, 15, 2, 10, 6, 14, 4, 12, 8, 16, 3, 10]$

Sortie 1 6

Sortie 2 $[6, 1, 9, 5, 13, 3, 11, 7, 15, 2, 10, 6, 14, 4, 12, 8, 16, 3, 10]$
ou $[6, 1, 9, 5, 13, 3, 11, 7, 15, 2, 10, 6, 14, 4, 12, 8, 16, 3, 10]$
ou ...

Quel(s) algorithm(e)s ?

- ▶ Recherche exhaustive : parcourir toutes les sous-suites $\rightsquigarrow O(2^n)$
- ▶ Algorithme de complexité polynomiale ?

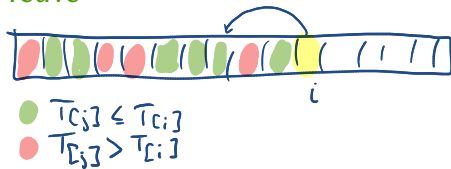
Formule réursive pour PLSSC

- ▶ $\ell(T)$: longueur des PLSSC de T
- ▶ ℓ_i : longueur des PLSSC de T finissant en case $T_{[i]}$

Lemme

- ▶ $\ell(T) = \max_{0 \leq i < n} \ell_i$
- ▶ $\ell_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i = 0 \\ 1 + \max\{\ell_j : j < i \text{ tels que } T_{[j]} \leq T_{[i]}\} & \text{pour } 1 \leq i < n \end{cases}$ ($\max(\emptyset) = 0$)

Preuve



- S'il existe une sous-suite croissante de taille ℓ_j finissant en $T_{[j]}$, alors ajouter $T_{[i]}$ fait une SSC de taille ℓ_{j+1} : $\ell_i \geq 1 + \ell_j$.
- Si on considère une SSC de taille ℓ_i finissant en $T_{[i]}$, et on note j l'élément précédent. Alors $\ell_j \geq \ell_i - 1$.

Traduction directe : algorithme récursif !

$$\ell_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i = 0 \\ 1 + \max\{\ell_j : j < i \text{ tels que } T[j] \leq T[i]\} & \text{pour } 1 \leq i < n \end{cases}$$

ALGO L(T, i):

1. Si $i = 0$: Renvoyer 1
2. $\max \leftarrow 0$
3. Pour $j = 0$ à $i - 1$:
4. Si $T[j] \leq T[i]$:
5. $L \leftarrow \text{ALGO L}(T, j)$
6. Si $L > \max$: $\max \leftarrow L$;
7. Renvoyer $1 + \max$

Correction

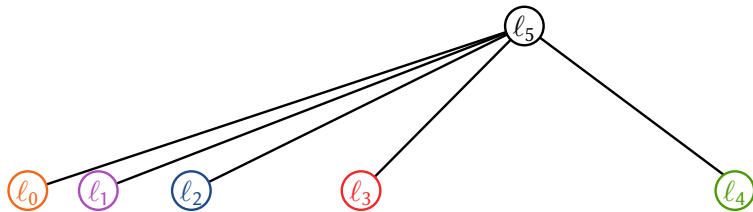
- Immédiat d'après la formule

Complexité

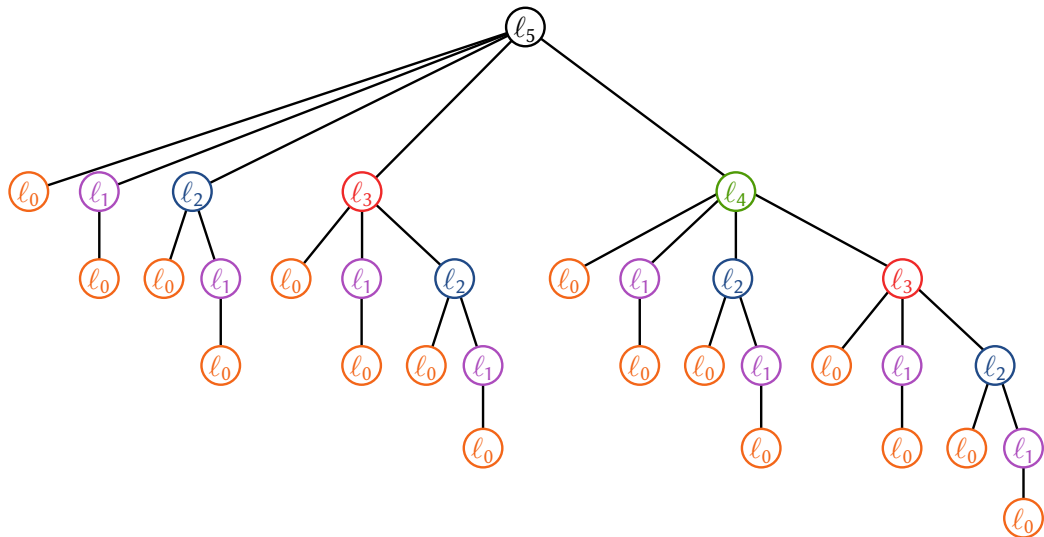
$$t(i) \leq \sum_{j < i} t(j) \rightsquigarrow t(i) = O(2^i)$$

- pareil que la recherche exhaustive !
- pourquoi ?

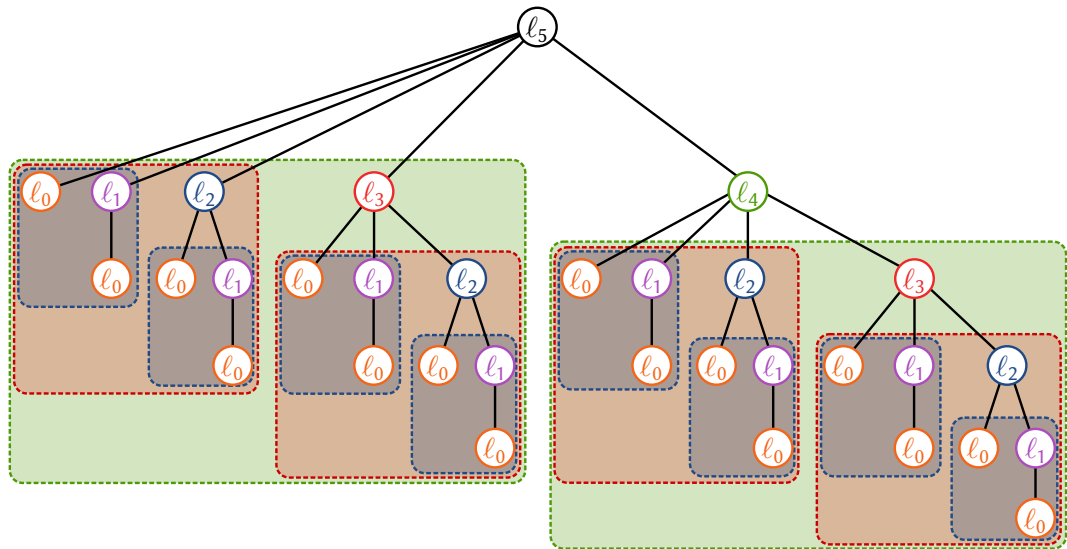
Arbre des appels récursifs



Arbre des appels récursifs



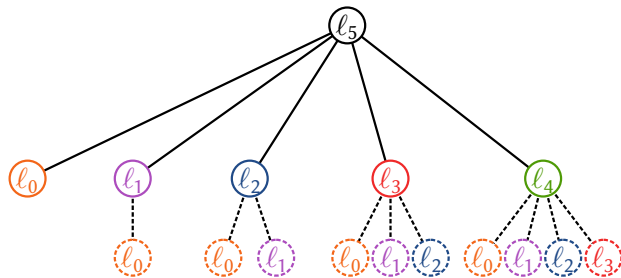
Arbre des appels récursifs



Mémoïsation : éviter les appels récursifs inutiles

MEMO(T, i, L):

1. Si $i = 0$: Renvoyer 1
2. Si $L[i] \neq \text{None}$: Renvoyer $L[i]$
3. $\text{max} \leftarrow 0$
4. Pour $j = 0$ à $i - 1$:
5. Si $T[j] \leq T[i]$:
6. $L[j] \leftarrow \text{MEMO}(T, j, L)$
7. Si $L[j] > \text{max}$: $\text{max} \leftarrow L[j]$
8. Renvoyer $1 + \text{max}$



Analyse de complexité

- $t(i) = \begin{cases} \sum_{j < i} t(j) & \text{si } L[i] \text{ n'est pas encore connu} \\ O(1) & \text{sinon} \end{cases} \rightsquigarrow ???$
- Chaque $L[i]$ est calculé une seule fois, en $O(i)$ opérations $\rightsquigarrow O(n^2)$

Version itérative : calcul des ℓ_i par i croissant

PLSSC-VALEUR(T):

1. $L \leftarrow$ tableau de taille n
2. $L[0] \leftarrow 1$
3. Pour $i = 1$ à $n - 1$:
4. $\max \leftarrow 0$
5. Pour $j = 0$ à $i - 1$:
6. Si $T[j] \leq T[i]$ et $L[j] > \max$:
7. $\max \leftarrow L[j]$
8. $L[i] \leftarrow 1 + \max$
9. Renvoyer $\max_i(L[i])$

Correction

- Invariant: $L[j] = \ell_j$ pour $j < i$
- $\ell(T) = \max_i \ell_i$

Complexité

$\Theta(n^2)$ {

- Boucle pour $i = 0$ à $n - 1$
- Une itération:
 - + boucle pour $j = 0$ à $i - 1$
 - + une itération: $\Theta(1)$

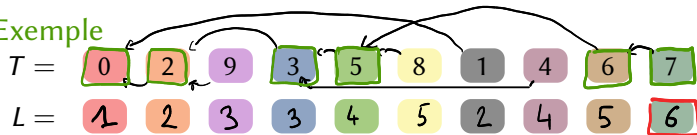
} $\Theta(i)$

Obtenir la solution

Comment calculer une PLSSC (en plus de sa longueur) ?

- ▶ Retenir les indices des max
- ▶ Reconstruire *a posteriori*

Exemple



Algorithme PLSSC avec reconstruction

$\text{PLSSC}^+(T)$:

1. $L, P \leftarrow$ tableaux de taille n
2. $L_{[0]} \leftarrow 1$
3. Pour $i = 1$ à $n - 1$:
4. $L_{[i]} \leftarrow 1 + \max\{L_{[j]} : j < i \text{ et } T_{[j]} \leq T_{[i]}\}$
5. $P_{[i]} \leftarrow$ indice du max précédent
6. Renvoyer $\max_i(L_{[i]})$, l'indice du maximum et P

$\text{PLSSC-SOLUTION}(T, \ell, i, P)$:

1. $S \leftarrow$ tableau de taille ℓ
2. $S_{[\ell-1]} \leftarrow T_{[i]}$
3. Pour $j = \ell - 2$ à 0 :
4. $i \leftarrow P_{[i]}$
5. $S_{[j]} \leftarrow T_{[i]}$
6. Renvoyer S

Lemme

L'algorithme PLSSC-SOLUTION reconstruit une PLSSC de T en temps $O(\ell)$.

Table des matières

1. Premier exemple : plus longue sous-suite croissante
2. Qu'est-ce que la programmation dynamique ?
3. Deuxième exemple : la distance d'édition
4. Bonus : le voyageur de commerce

Idée générale

Programmation dynamique = récursion sans répétition

Ingrédients

- ▶ Formule **réursive** pour la valeur optimale
 - ▶ en fonction des valeurs de sous-problèmes
 - ▶ sous-problèmes possiblement nombreux et non disjoints
- ▶ Algorithme **récuratif avec mémoïsation** ou **itératif** pour la valeur optimale
 - ▶ en commençant par les plus petits sous-problèmes
 - ▶ approche « *bottom-up* »
- ▶ Reconstruction de la solution ***a posteriori***
 - ▶ ajout d'informations à l'algorithme pour la valeur
 - ▶ algorithme de reconstruction indépendant

« Diviser pour régner »

Sous-problèmes disjoints, approche « *top-down* »

Ingrédient 1: Formule récursive

Partie la plus importante (et difficile) !

Étapes

1. Spécification précise du problème
2. Formule récursive

Exemple de PLSSC

1. Définition des ℓ_i et pas seulement $\ell(T)$
2. Expression de ℓ_i en fonction des $\ell_j, j < i$

En pratique, étape souvent (très) guidée

Ingrédient 2 : Algorithme pour la valeur

Partie plutôt facile... mais attention quand même !

Étapes

- ▶ choix d'une structure de données (*très* souvent un tableau)
- ▶ écriture effective de l'algorithme
 - ▶ mémoïsation : assez direct
 - ▶ itératif : ordre de calcul si tableau multi-dimensionnel
- ▶ analyse de complexité
 - ▶ mémoïsation : raisonnement global
 - ▶ itératif : assez classique

cf. ex. suivants

Exemple : PLSSC

- ▶ Tableau L
- ▶ Ordre croissant

En pratique, étape souvent non guidée

Ingrédient 3 : Reconstruction

Partie de difficulté très variable !

Étapes

- ▶ ajout d'informations supplémentaires à l'algorithme pour la valeur
- ▶ *redescente* depuis la solution générale vers les instances petites

Exemple : PLSSC

- ▶ tableau P , indice i du maximum
- ▶ descente depuis $T_{[i]}$, en suivant P

En pratique, étape pas toujours effectuée

Problématique de la mémoire

Exemple de PLSSC

- ▶ Tableau P et L de taille n
 - ▶ Complexité *en espace* $O(n)$
 - ▶ Si $n = 2^{25}$: env. 1Mo de mémoire

En général

- ▶ La programmation dynamique est gourmande en mémoire
 - ▶ Parfois le *réactif limitant*
- ▶ Utile de limiter l'espace mémoire quand c'est possible
 - ▶ En général uniquement sans reconstruction
 - ▶ Formulation itérative plus adaptée

→ exemple suivant

Conclusion sur la programmation dynamique

Comparaison avec « diviser pour régner »

- ▶ Similitude : expression récursive de la solution
- ▶ Différences :
 - ▶ nombre de sous-problèmes : $O(1)$ en général en DPR
 - ▶ taille des sous-problèmes : division de la taille par une constante en DPR
 - ▶ écriture de l'algorithme directe en DPR
- ▶ Remarque : choix du type d'algorithme en fonction de la formule récursive

D'où vient ce nom ?

Programmation : planification, ordonnancement

Dynamique : « *it's impossible to use the word dynamic in a pejorative sense* »

- ▶ Bellman (1940) : travaux en optimisation mathématique
- ▶ Origine en fait peu claire : référence à la programmation linéaire, et/ou problèmes de financements (cf Wikipédia)

Table des matières

1. Premier exemple : plus longue sous-suite croissante
2. Qu'est-ce que la programmation dynamique ?
3. Deuxième exemple : la distance d'édition
4. Bonus : le voyageur de commerce

Corrigeons les erreurs

À quelle distance se trouve-t-on du mot correct ?

~~H~~AGORRYTNE
 [^] ^I [^] [^]
 ^L ^H [^]

distance 6

ALGORITHMES

La distance d'édition

Définition

La distance d'édition entre deux mots A et B est le nombre minimal de désaccords dans un alignement de A et B

HALGORRYTNE
ALGORITME

Définition du problème

Entrée Deux mots A et B sur un alphabet
(mot : chaîne de caractère ou tableau de caractères ou ...)

Sortie 1 La distance d'édition entre A et B

Sortie 2 Un alignement optimal de A et B

Utilité

- ▶ Orthographe :
 - ▶ Correcteur orthographique
 - ▶ Reconnaissance optique de caractères
 - ▶ Linguistique (proximité de langues)
- ▶ Bioinformatique :
 - ▶ similarité de séquences ADN
 - ▶ similarité d'arbres phylogénétiques
 - ▶ ...

Formalisation et formule récursive

Distances entre préfixes

- ▶ $\Delta_{i,j}$: distance entre $A_{[0,i[}$ et $B_{[0,j[}$ où
 - ▶ $A_{[0,i[} = A_{[0]}A_{[1]} \cdots A_{[i-1]}$
 - ▶ $B_{[0,j[} = B_{[0]}B_{[1]} \cdots B_{[j-1]}$
- ▶ On veut $\Delta_{m,n}$ où $m = \#A$ et $n = \#B$

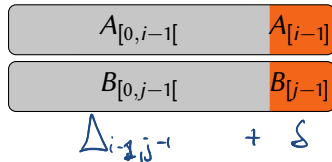
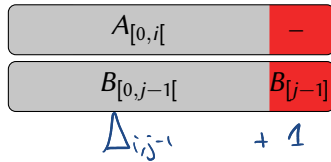
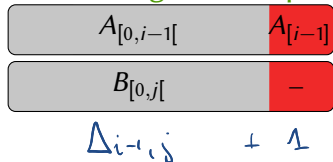
$$\Delta_{i,0} = i$$

$$\Delta_{0,j} = j$$

Lemme

$$\Delta_{i,j} = \min \begin{cases} \Delta_{i-1,j} + 1 \\ \Delta_{i,j-1} + 1 \\ \Delta_{i-1,j-1} + \delta \text{ où } \delta = 1 \text{ si } A_{[i-1]} \neq B_{[j-1]}, 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

Preuve : alignements possibles



Algorithme : exemple

		H	A	G	O	R	R	Y	T	N	E
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	1	1	1								
L	2	2									
G	3										
O	4										
R	5										
I	6										
T	7										
H	8										
M	9										
E	10										

Algorithme : exemple

		H	A	G	O	R	R	Y	T	N	E
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L	2	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9
G	3	3	3	2	3	4	5	6	7	8	9
O	4	4	4	3	2	3	4	5	6	7	8
R	5	5	5	4	3	2	3	4	5	6	7
I	6	6	6	5	4	3	3	4	5	6	7
T	7	7	7	6	5	4	4	4	4	5	6
H	8	7	8	7	6	5	5	5	5	5	6
M	9	8	8	8	7	6	6	6	6	6	6
E	10	9	9	9	8	7	7	7	7	7	6

L'algorithme (itératif)

EDITION(A, B):

1. $(m, n) \leftarrow$ tailles de A et B
2. $\Delta \leftarrow$ tableau de dimensions $(m + 1) \times (n + 1)$
3. Pour $i = 0$ à m : $\Delta_{[i,0]} \leftarrow i$
4. Pour $j = 0$ à n : $\Delta_{[0,j]} \leftarrow j$
5. Pour $i = 1$ à m :
6. Pour $j = 1$ à n :
7. $\delta \leftarrow \begin{cases} 0 & \text{si } A_{[i-1]} = B_{[j-1]} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$
8. $\Delta_{[i,j]} \leftarrow \min(\Delta_{[i-1,j]} + 1, \Delta_{[i,j-1]} + 1, \Delta_{[i-1,j-1]} + \delta)$
9. Renvoyer $\Delta_{[m,n]}$

Lemme

L'algorithme EDITION renvoie la distance entre A et B en temps $O(mn)$ et espace $O(mn)$.

Version efficace en mémoire

EDITIONMINMEMOIRE(A, B):

1. $(m, n) \leftarrow$ tailles de A et B
2. $\Delta^{-1}, \Delta^0 \leftarrow$ tableaux de dimension $n + 1$ *(lignes précédente et courante)*
3. Pour $j = 0$ à n : $\Delta_{[j]}^{-1} \leftarrow j$
4. Pour $i = 1$ à m :
5. $\Delta_{[0]}^0 \leftarrow i$
6. Pour $j = 1$ à n :
7. $\delta \leftarrow 0$ si $A_{[i-1]} = B_{[j-1]}$, 1 sinon
8. $\Delta_{[j]}^0 \leftarrow \min(\Delta_{[j]}^{-1} + 1, \Delta_{[j-1]}^0 + 1, \Delta_{[j-1]}^{-1} + \delta)$
9. Pour $j = 0$ à n : $\Delta_{[j]}^{-1} \leftarrow \Delta_{[j]}^0$ *(courante $\rightarrow$ précédente)*
10. Renvoyer $\Delta_{[n]}^0$

Lemme

EDITIONMINMEMOIRE calcule la distance entre A et B en temps $O(mn)$ et espace $O(n)$.

Reconstruction : exemple

		H	A	G	O	R	R	Y	T	N	E
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L	2	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9
G	3	3	3	2	3	4	5	6	7	8	9
O	4	4	4	3	2	3	4	5	6	7	8
R	5	5	5	4	3	2	3	4	5	6	7
I	6	6	6	5	4	3	3	4	5	6	7
T	7	7	7	6	5	4	4	4	4	5	6
H	8	7	8	7	6	5	5	5	5	5	6
M	9	8	8	8	7	6	6	6	6	6	6
E	10	9	9	9	8	7	7	7	7	7	6

Algorithme de reconstruction

ALIGNEMENT(A, B, Δ):

1. $(i, j) \leftarrow$ tailles de A et B
2. Tant que $i > 0$ et $j > 0$:
3. $\delta \leftarrow 0$ si $A[i-1] = B[j-1]$, 1 sinon
4. Si $\Delta[i, j] = \Delta[i-1, j-1] + \delta$:
5. $(i, j) \leftarrow (i-1, j-1)$ $A[i-1] \parallel B[j-1]$
6. Sinon si $\Delta[i, j] = \Delta[i-1, j] + 1$:
7. Insérer « _ » en $j^{\text{ème}}$ position dans B ; $i \leftarrow i-1$ $A[i-1] \parallel _$
8. Sinon ($\Delta[i, j] = \Delta[i, j-1] + 1$):
9. Insérer « _ » en $i^{\text{ème}}$ position dans A ; $j \leftarrow j-1$ $_ \parallel B[j-1]$
10. Insérer j symboles « _ » en tête de A ou i symboles « _ » en tête de B
11. Renvoyer A et B

Lemme

L'algorithme ALIGNEMENT *aligne* les mots A et B de manière optimale, en temps $O(m + n)$.

Conclusion

Théorème

Soit A et B deux mots de tailles respectives m et n .

- ▶ La distance entre A et B peut être calculée en temps $O(mn)$ et espace $O(\min(m, n))$
- ▶ Un alignement de A et B peut être calculé en temps $O(mn)$ et espace $O(mn)$

Peut-on faire mieux ?

- ▶ Temps :
 - ▶ Un peu : $O(mn / \log \max(m, n))$
 - ▶ Sans doute pas bien mieux (pour le résultat exact) $\rightarrow$ borne inférieure *conditionnelle*
- ▶ Espace : alignement en temps $O(mn)$ et espace $O(\min(m, n))$
 - ▶ Programmation dynamique + diviser pour régner

Cours 10

- ▶ Problème très important en pratique... et en théorie !
- ▶ Beaucoup de résultats très récents (2024 !) sur le sujet

Conclusion

Théorème

Soit A et B deux mots de tailles respectives m et n .

- ▶ La distance entre A et B peut être calculée en temps $O(mn)$ et espace $O(\min(m, n))$
- ▶ Un alignement de A et B peut être calculé en temps $O(mn)$ et espace $O(mn)$

Peut-on faire mieux ?

Temps :

On ne peut pas faire mieux : $O(mn / \log \max(m, n))$

On ne peut pas faire mieux (pour le résultat exact) → borne inférieure

On peut faire en temps $O(mn)$ et espace $O(\min(m, n))$

Algorithme + diviser pour régner

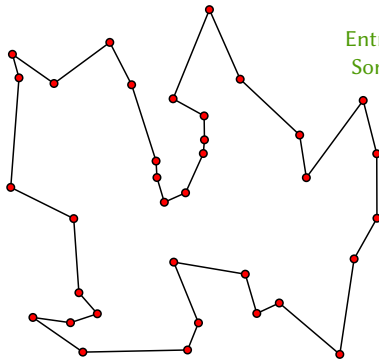
- ▶ Problème très important en pratique... et en théorie !
- ▶ Beaucoup de résultats très récents (2024 !) sur le sujet



Table des matières

1. Premier exemple : plus longue sous-suite croissante
2. Qu'est-ce que la programmation dynamique ?
3. Deuxième exemple : la distance d'édition
4. Bonus : le voyageur de commerce

Le voyageur de commerce



Entrée : Un ensemble de points du plan

Sortie : Un ordre de parcours des points

$u_0 \rightarrow u_1 \rightarrow \dots \rightarrow u_{n-1} \rightarrow u_0$ qui minimise la distance totale

Rappel : formalisation

Définition

Entrée Matrice G de dimensions $n \times n$ $G_{[i,j]}$ = longueur entre les sommets i et j

Sortie 1 La longueur L du plus court cycle qui passe exactement une fois par chaque sommet

Sortie 2 Un cycle $(i_0, i_1, \dots, i_{n-1}, i_0)$ de longueur minimale

Remarques

- ▶ On peut supposer : $i_0 = 0$
- ▶ Complexité par recherche exhaustive : $O(n!)$

Formule récursive

Définition

Pour $U \subset S \setminus \{0\}$ tel que $j \in U$, $\ell_j(U)$ est la longueur du plus court chemin de 0 à j , en passant exactement une fois par 0 et chaque $i \in U$

Lemme

1. $L = \min_j (\ell_j(S \setminus \{0\}) + G_{[j,0]})$
2. $\ell_0(\emptyset) = 0$, $\ell_0(U) = +\infty$ si $\#U > 0$
3. $\ell_j(U) = \min_{i \in U, i \neq j} \ell_i(U \setminus \{j\}) + G_{[i,j]}$

Preuve

Algorithme de calcul de la longueur

LONGUEURMIN(G):

1. $L \leftarrow$ tableau bi-dimensionnel: $L_{[U,j]} \leftrightarrow \ell_j[U]$
2. $L_{[\emptyset,0]} \leftarrow 0$
3. pour $t = 1$ à $n - 1$:
4. pour tous les $U \subset S \setminus \{0\}$ de taille t :
5. $L_{[U,0]} \leftarrow +\infty$
6. pour tout $j \in U$:
7. $L_{[U,j]} \leftarrow \min\{L_{[U \setminus \{j\},i]} + G_{[i,j]} : i \in U, i \neq j\}$
8. renvoyer $\min_j (L_{[S \setminus \{0\},j]} + G_{[j,0]})$

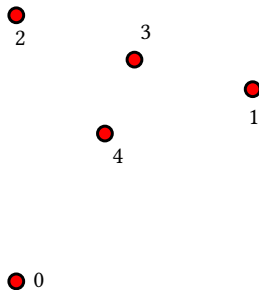
Lemme

L'algorithme LONGUEURMIN calcule la longueur du plus court chemin en temps $O(n^2 2^n)$

Preuve de la complexité

Exemple

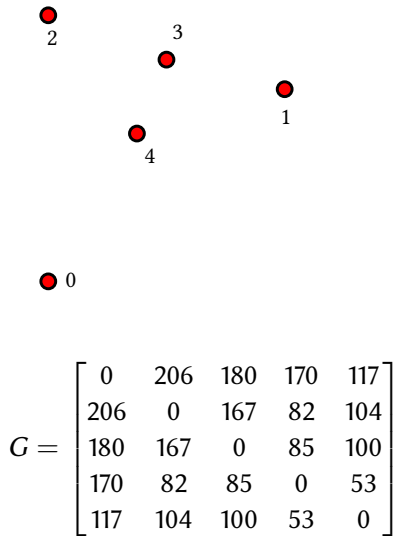
	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$				
$\{2\}$	$+\infty$				
$\{3\}$	$+\infty$				
$\{4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2\}$	$+\infty$				
$\{1, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3\}$	$+\infty$				
$\{2, 4\}$	$+\infty$				
$\{3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

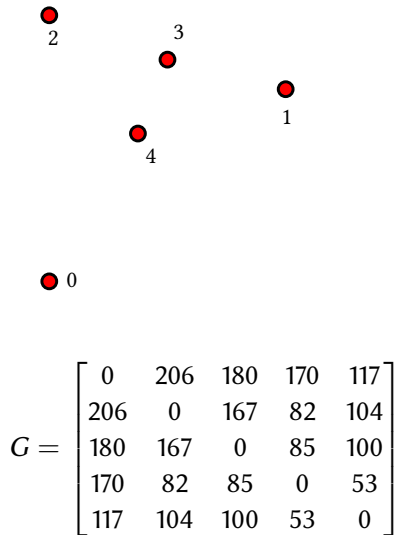
Exemple

	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$				
$\{3\}$	$+\infty$				
$\{4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2\}$	$+\infty$				
$\{1, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3\}$	$+\infty$				
$\{2, 4\}$	$+\infty$				
$\{3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



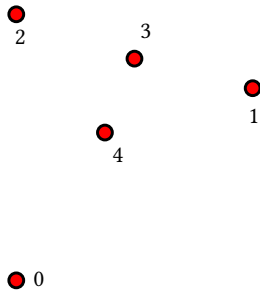
Exemple

	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$				
$\{4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2\}$	$+\infty$				
$\{1, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3\}$	$+\infty$				
$\{2, 4\}$	$+\infty$				
$\{3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



Exemple

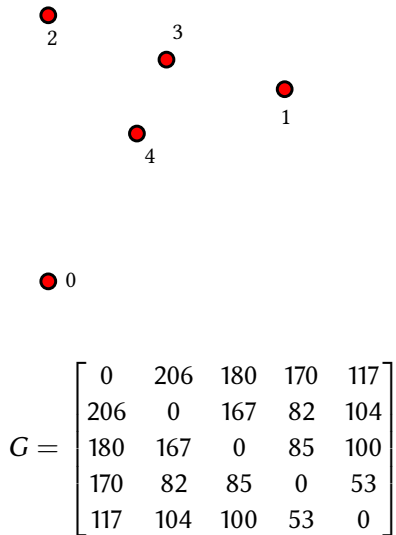
	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2\}$	$+\infty$				
$\{1, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3\}$	$+\infty$				
$\{2, 4\}$	$+\infty$				
$\{3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

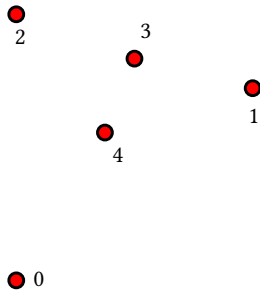
Exemple

	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$				
$\{1, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3\}$	$+\infty$				
$\{2, 4\}$	$+\infty$				
$\{3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



Exemple

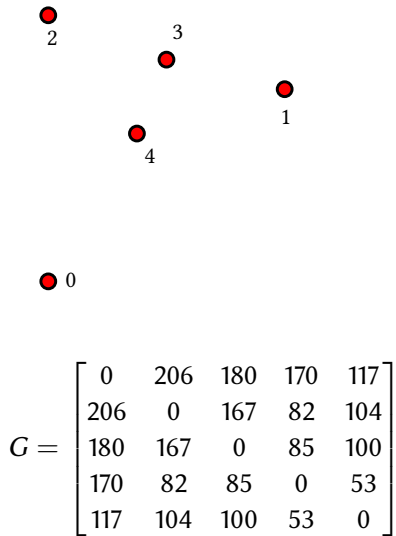
	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347			
$\{1, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3\}$	$+\infty$				
$\{2, 4\}$	$+\infty$				
$\{3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

Exemple

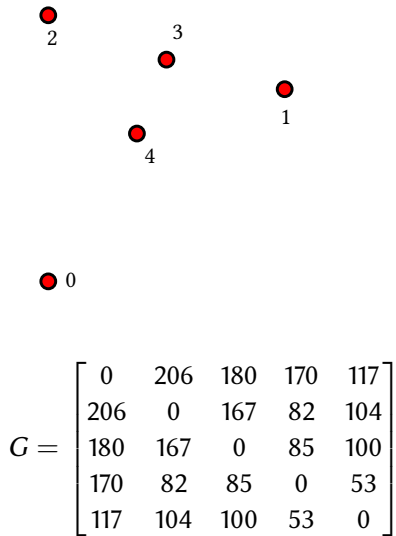
	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3\}$	$+\infty$				
$\{2, 4\}$	$+\infty$				
$\{3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

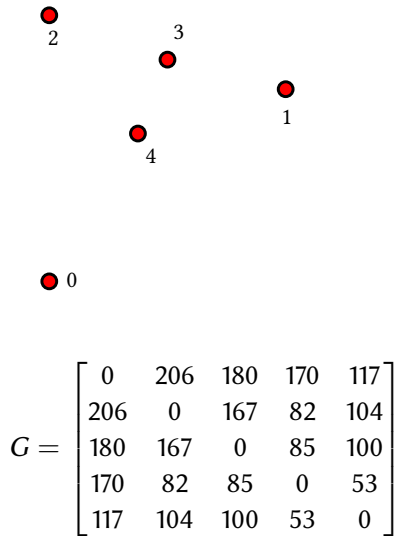
Exemple

	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3\}$	$+\infty$				
$\{2, 4\}$	$+\infty$				
$\{3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



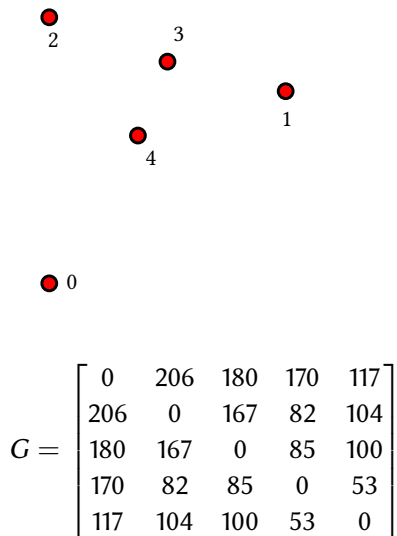
Exemple

	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$	221			310
$\{2, 3\}$	$+\infty$				
$\{2, 4\}$	$+\infty$				
$\{3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



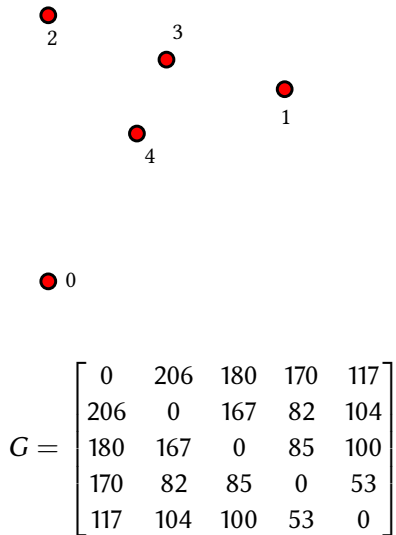
Exemple

	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$	221			310
$\{2, 3\}$	$+\infty$		255	265	
$\{2, 4\}$	$+\infty$				
$\{3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



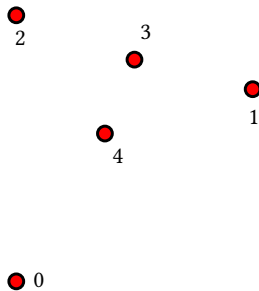
Example

	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$	221			310
$\{2, 3\}$	$+\infty$		255	265	
$\{2, 4\}$	$+\infty$		217		280
$\{3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



Exemple

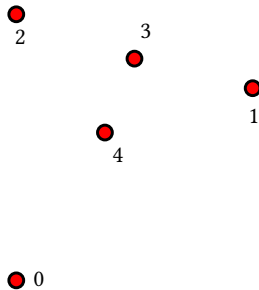
	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$	221			310
$\{2, 3\}$	$+\infty$		255	265	
$\{2, 4\}$	$+\infty$		217		280
$\{3, 4\}$	$+\infty$			170	223
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

Exemple

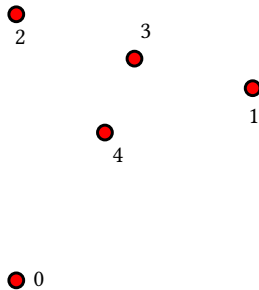
	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$	221			310
$\{2, 3\}$	$+\infty$		255	265	
$\{2, 4\}$	$+\infty$		217		280
$\{3, 4\}$	$+\infty$			170	223
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$	347	374	429	
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

Example

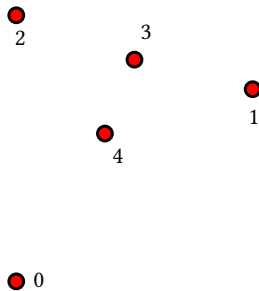
	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$	221			310
$\{2, 3\}$	$+\infty$		255	265	
$\{2, 4\}$	$+\infty$		217		280
$\{3, 4\}$	$+\infty$			170	223
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$	347	374	429	
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$	384	388		451
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

Example

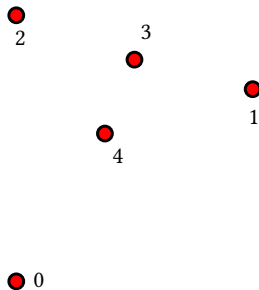
	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$	221			310
$\{2, 3\}$	$+\infty$		255	265	
$\{2, 4\}$	$+\infty$		217		280
$\{3, 4\}$	$+\infty$			170	223
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$	347	374	429	
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$	384	388		451
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$	252		303	342
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

Example

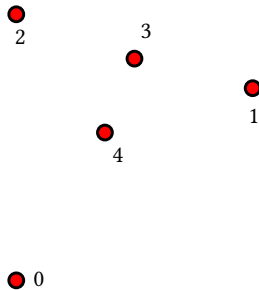
	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$	221			310
$\{2, 3\}$	$+\infty$		255	265	
$\{2, 4\}$	$+\infty$		217		280
$\{3, 4\}$	$+\infty$			170	223
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$	347	374	429	
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$	384	388		451
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$	252		303	342
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$		255	302	318
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$				
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

Example

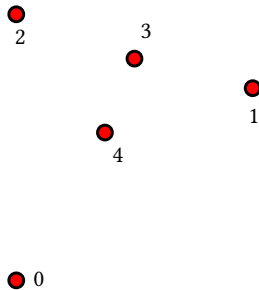
	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$	221			310
$\{2, 3\}$	$+\infty$		255	265	
$\{2, 4\}$	$+\infty$		217		280
$\{3, 4\}$	$+\infty$			170	223
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$	347	374	429	
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$	384	388		451
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$	252		303	342
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$		255	302	318
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$	384	388	466	451
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$					



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

Exemple

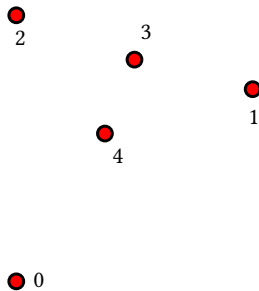
	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$	221			310
$\{2, 3\}$	$+\infty$		255	265	
$\{2, 4\}$	$+\infty$		217		280
$\{3, 4\}$	$+\infty$			170	223
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$	347	374	429	
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$	384	388		451
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$	252		303	342
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$		255	302	318
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$	384	388	466	451
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$		590	568	636	568



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

Example

	0	1	2	3	4
$\emptyset$	0				
$\{1\}$	$+\infty$	206			
$\{2\}$	$+\infty$		180		
$\{3\}$	$+\infty$			170	
$\{4\}$	$+\infty$				117
$\{1, 2\}$	$+\infty$	347	373		
$\{1, 3\}$	$+\infty$	252		288	
$\{1, 4\}$	$+\infty$	221			310
$\{2, 3\}$	$+\infty$		255	265	
$\{2, 4\}$	$+\infty$		217		280
$\{3, 4\}$	$+\infty$			170	223
$\{1, 2, 3\}$	$+\infty$	347	374	429	
$\{1, 2, 4\}$	$+\infty$	384	388		451
$\{1, 3, 4\}$	$+\infty$	252		303	342
$\{2, 3, 4\}$	$+\infty$		255	302	318
$\{1, 2, 3, 4\}$	$+\infty$	384	388	466	451
$\min_j (L_{[S \setminus \{0\}, j]} + G_{[j, 0]})$		590	568	636	568



$$G = \begin{bmatrix} 0 & 206 & 180 & 170 & 117 \\ 206 & 0 & 167 & 82 & 104 \\ 180 & 167 & 0 & 85 & 100 \\ 170 & 82 & 85 & 0 & 53 \\ 117 & 104 & 100 & 53 & 0 \end{bmatrix}$$

Algorithme de reconstruction

LONGUEURMIN⁺(G):

1. $L \leftarrow$ tableau bi-dimensionnel: $L_{[U,j]} \leftrightarrow \ell_j[U]$
2. $P \leftarrow$ tableau de mêmes dimensions
3. $L_{[\emptyset,0]} \leftarrow 0$
4. pour $t = 1$ à $n - 1$:
5. pour tous les $U \subset S \setminus \{0\}$ de taille t :
6. $L_{[U,0]} \leftarrow +\infty$
7. pour tout $j \in U$:
8. $L_{[U,j]} \leftarrow \min\{L_{[U \setminus \{j\},i]} + G_{[i,j]} : i \in U, i \neq j\}$
9. $P_{[U,j]} \leftarrow$ indice i du minimum
10. renvoyer $\min_j (L_{[S \setminus \{0\},j]} + G_{[j,0]})$
+ indice j du minimum et P

CHEMIN(G, L, P, j):

1. $i_0 \leftarrow 0, i_1 \leftarrow j,$
 $U \leftarrow S \setminus \{0\}$
2. pour $k = 2$ à $n - 1$:
3. $i_k \leftarrow P_{[U, i_{k-1}]}$
4. $U \leftarrow U \setminus \{i_{k-1}\}$
5. renvoyer
 $(i_0, i_1, \dots, i_{n-1}, i_0)$

Lemme

L'algorithme CHEMIN construit un chemin de longueur minimale en temps $O(n)$

Bilan

Théorème

La longueur minimale d'un chemin passant par n points peut être calculée en temps $O(n^2 2^n)$. Le chemin lui-même peut être calculé en temps $O(n)$ supplémentaire.

Détail à régler : gestion des ensembles

- ▶ Représentation d'un sous-ensemble de $\{1, \dots, n-1\}$ par un mot binaire
- ▶ Parcours des sous-ensembles de taille t , calcul de $U \setminus \{j\}$
- ▶ Pas de problème en théorie, un peu délicat en pratique

Remarques

- ▶ Fonctionne aussi hors d'un plan euclidien (carte, plans, graphes, ...)
- ▶ Très utile en pratique comme en théorie !
- ▶ Un exemple: <http://map.vroom-project.org/>