

# Sur le problème des préflots

BEN MOQADEM Mahdi      DUVILLIE Guillaume  
OULD MOHAMED ABDELLAHI CHEIKH Mehdi

5 avril 2012

# Table des matières

<b>I</b>	<b>Introduction, pré-requis</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Un peu d'histoire</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Définitions</b>	<b>4</b>
2.1	Quelques rappels sur les graphes . . . . .	4
2.1.1	La notion de flot . . . . .	5
2.1.2	La notion de préflot . . . . .	5
2.1.3	La notion de réseau résiduel . . . . .	6
2.2	Quelques fonctions importantes . . . . .	6
2.2.1	Les fonctions de potentiel . . . . .	6
2.2.2	Fonction de distance . . . . .	7
<b>II</b>	<b>Les algorithmes</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>L'algorithme Générique</b>	<b>7</b>
3.1	Principe . . . . .	7
3.2	Validité . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Les algorithmes dérivés</b>	<b>12</b>
4.1	L'algorithme FIFO . . . . .	12
4.2	L'algorithme High label . . . . .	12
<b>III</b>	<b>Complexité</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Algorithme Générique</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Algorithme FIFO</b>	<b>14</b>

## List of Algorithms

## Première partie

# Introduction, pré-requis

Le sujet de TER porte sur la recherche d'un flot maximum au sein d'un graphe quelconque par l'utilisation d'algorithmes reposant sur la notion de *préflot*, qui est une structure de données obtenue par relaxation des contraintes de la structure de flot.

## 1 Un peu d'histoire

Le problème de flots maximum, consistant à déterminer la quantité maximum de *ressources* que l'on peut transporter d'un point  $A$  à un point  $B$  dans un graphe, trouve ses racines, d'après A. Schrijver [2] dans un rapport de Harris et Ross rédigé pour l'US Air Force, en 1955, intitulé *Fundamentals of a Method for Evaluating Rail Net Capacities*. Il s'agit là de la résolution d'un problème de flots maximum dans un graphe basé sur le réseau de chemin de fer couvrant l'ouest de l'Union Soviétique et les pays satellites de l'Europe de l'est, afin d'obtenir une coupe minimale de celui-ci, ce pour des raisons stratégiques.

Le problème fut ensuite étudié par Ford et Fulkerson qui rédigèrent un algorithme permettant de résoudre le problème par l'utilisation de chaînes améliorantes dans le graphe, en 1955. De nombreuses améliorations de l'algorithme ont vues le jour telles que l'algorithme d'Edmonds-Karp en 1969 [1] ou l'algorithme de Dinic en 1970 [1], permettant, à l'aide d'une sélection judicieuse des chaînes améliorantes de réduire la complexité de l'algorithme initial.

*Note : Il sera supposé, tout au long de ce document que le lecteur connaît ces derniers algorithmes.*

Cependant, il existe de nombreux graphes pour lesquels l'exécution des algorithmes cités ci-dessus est très longues. Le graphe représenté à la fig. 1 (p. 5) est l'un d'eux. C'est pour cette raison que la structure de préflots a été développée, et aujourd'hui, les algorithmes basés sur les préflots font partie des plus rapides développés à ce jour.

L'algorithme d'Edmonds-Karp, recherchant une chaîne améliorante de plus court chemin dans le graphe, effectue  $n - 6$  recherche de chaînes améliorantes et atteint son temps maximal d'exécution. Ce problème se résout très vite à l'aide de préflots, ce que nous allons voir.

Au préalable, la notion de préflot sera définie<sup>1</sup>, puis le principe de chaque algorithme sera présenté, ainsi que la démonstration de leur validité et leur borne de temps d'exécution. La dernière partie portera sur le détail des tests effectués et sur le traitement des résultats<sup>2</sup>.

## 2 Définitions

### 2.1 Quelques rappels sur les graphes

Un graphe  $G$  est défini par un ensemble de sommets noté  $S$  et un ensemble d'arêtes notées  $A$ <sup>3</sup>, ainsi qu'un sommet source noté  $s$  et un sommet puits  $t$ .

---

1. ainsi qu'un bref rappel de la notion de flot

2. Les structures de données utilisées sont présentées dans la documentation fournie

3. Il paraît important de faire remarquer que la définition d'un graphe non simple est parfaitement rigoureuse, si l'on rajoute à cette définition une fonction dite d'incidence notée  $\gamma : A \rightarrow S \times S$  qui associe à chaque arête de

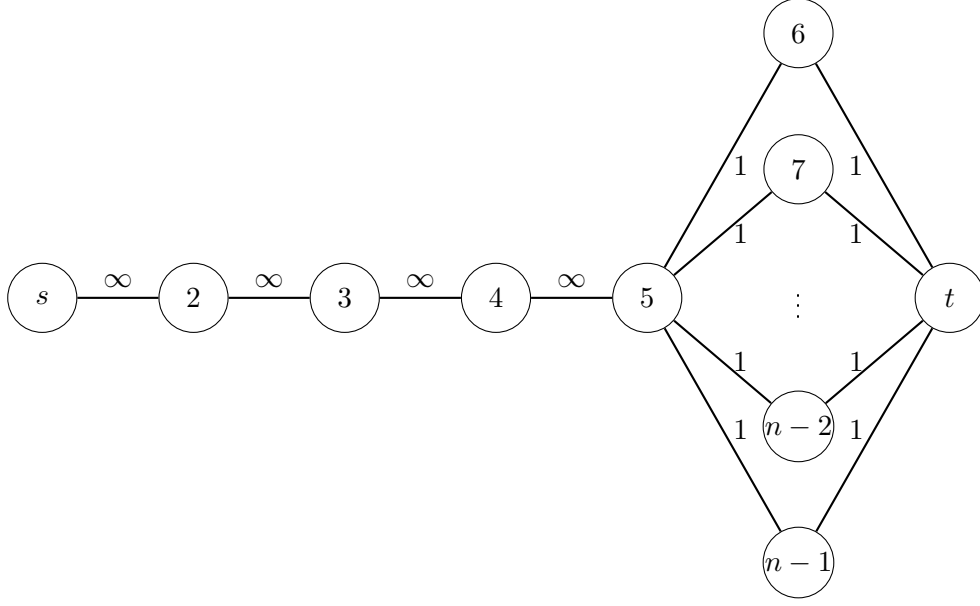


FIGURE 1 – Graphe mettant en défaut les algorithmes de recherche de chaînes améliorantes

### Les notations utilisées dans les graphes :

Soit un sommet  $i \in S$ , le voisinage sortant (respectivement entrant) de  $i$  sera noté  $A^+(i)$  (resp.  $A^-(i)$ ).

Soient  $i, j \in S$ , s'il existe une arête reliant  $i$  à  $j$  appartenant à  $A$ , cette dernière sera notée  $(i, j)$  et sa capacité  $c(i, j)$ .

#### 2.1.1 La notion de flot

Dans un graphe  $G(S, A)$ , un flot  $f$  de  $G$  est une application  $x : A \rightarrow \mathbb{N}$  vérifiant les conditions suivantes :

$$\forall (i, j) \in A \quad 0 \leq x(i, j) \leq c(i, j) \quad \text{avec } x(i, j) \text{ la valeur du flot sur l'arête } (i, j) \quad (1)$$

$$\forall i \in S - \{s, t\}, \quad \sum_{j \in A^+(i)} x(i, j) = \sum_{k \in A^-(i)} x(k, i) \quad (2)$$

$$f = \sum_{j \in A^+(s)} x(s, j) = \sum_{k \in A^-(t)} x(k, t) \quad (3)$$

Toute l'essence du problème étudié consiste en la maximisation de cette valeur.

#### 2.1.2 La notion de préflot

Le préflot étant une structure de donnée obtenue par relaxation de contraintes sur les flots, son domaine de définition est donc le même : il s'agit d'une application  $x : A \rightarrow \mathbb{N}$  respectant les contraintes suivantes :

$$\forall (i, j) \in A \quad 0 \leq x(i, j) \leq c(i, j) \quad (4)$$

---

$A$  un couple de sommets de  $S$ .

$$\forall i \in S - \{s, t\}, \quad \sum_{j \in A^+(i)} x(i, j) = \sum_{k \in A^-(i)} x(k, i) \quad (5)$$

$$f = \sum_{j \in A^+(s)} x(s, j) = \sum_{k \in A^-(t)} x(k, t) \quad (6)$$

On introduit alors la valeur  $e(i)$  représentant l'excédent de flot d'un noeud  $i \in S$ . On peut alors écrire l'inéquation 5 de cette manière :

$$\forall i \in S - \{s, t\}, \quad \sum_{j \in A^+(i)} x(i, j) = \sum_{k \in A^-(i)} x(k, i) + e(i) \quad (7)$$

De la même manière, l'inéquation 6 sera réécrite de la sorte :

$$\sum_{j \in A^+(s)} x(s, j) = \sum_{k \in A^-(t)} x(k, t) + \sum_{i \in S - \{s, t\}} e(i) \quad (8)$$

Un sommet  $i \in S$  ayant un excédent  $e$  non nul :  $e(i) > 0$  sera qualifié appelé sommet actif, on dira aussi qu'il est débordant.

### 2.1.3 La notion de réseau résiduel

Soit un graphe  $G(S, A)$ , un flot (ou préflot)  $f$  et  $i, j$  deux sommets de  $G$ . On dira que l'arête  $(i, j)$  appartiendra au réseau résiduel  $A_f$  si et seulement si :

$$r(i, j) = c(i, j) - x(i, j) > 0 \quad (9)$$

On appelle alors  $r(i, j)$  la capacité résiduelle de l'arête  $(i, j)$ . De plus la présence d'un flot (ou préflot)  $f$  circulant sur l'arc  $(i, j)$  de valeur  $x(i, j)$  entraîne la présence d'une arête  $(j, i)$  dans le réseau résiduel de capacité résiduelle  $r(j, i) = x(i, j)$ .

## 2.2 Quelques fonctions importantes

### 2.2.1 Les fonctions de potentiel

Il est important de réaliser un point précis sur les fonctions de potentiel. Certaines des démonstrations réalisées au cours de ce rapport se basent sur l'utilisation de ces fonctions.

Considérons une structure de donnée appelée  $D_0$  sur laquelle sont effectuées des opérations numérotées. Appelons  $D_i$  la structure de données résultant de la  $i^e$  opération. On appelle fonction de potentiel, toute fonction  $\Phi$  qui, à une structure de données  $D_i$  associe un réel appelé potentiel, noté  $\Phi(D_i)$ . Ce formalisme est décrit à la figure 2 (p. 6).

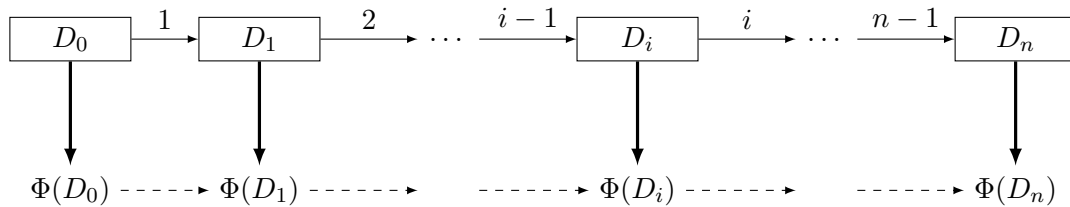


FIGURE 2 – Représentation du principe d'une fonction de potentiel

L'incidence de chacune des opérations sur la valeur de la fonction potentielle et la recherche d'une borne supérieure à cette dernière permettra de déterminer des bornes sur le nombre d'opérations effectuées et donc sur la complexité de l'algorithme.

### 2.2.2 Fonction de distance

Soit  $G(S, A)$  un graphe ayant  $s$  pour sommet source et  $t$  pour sommet puits. Une fonction  $d : S \rightarrow \mathbb{N}$  est une fonction de hauteur<sup>4</sup> si elle vérifie les propriétés suivantes :

$$h(s) = |S| \tag{10a}$$

$$h(t) = 0 \tag{10b}$$

$$\forall (i, j) \in A_f \quad d(i) \leq d(j) + 1 \tag{10c}$$

On en déduit immédiatement ce qui suit :

**Lemme 2.2.1** *Soit  $G(S, A)$  un graphe, soit  $f$  un préflot de  $G$  et  $d$  une fonction de distance de  $G$ , soient  $i, j \in S$ , si  $d(i) > d(j) + 1$  alors  $(i, j) \notin A_f$ .*

## Deuxième partie

# Les algorithmes

---

### Algorithm 1 Procédure d'initialisation

---

```

1: for  $i \in S$  do
2:   Calculer la distance  $d(i)$  en nombre d'arêtes de  $i$  à  $t$ 
3: end for
4: for  $a \in A(s)$  do
5:    $x(a) \leftarrow \text{capa}(a)$ 
6: end for
7:  $d(s) \leftarrow |S|$ 

```

---

Au cours de cette partie l'algorithme de préflot générique sera étudié et sa validité sera démontrée, deux autres algorithmes (FIFO et high label) très similaires au générique seront présentés et puisque ces derniers ne sont qu'une amélioration de l'algorithme générique, leur validité découlera de la validité de ce dernier.

Les calculs de complexité seront développés dans la partie suivante.

## 3 L'algorithme Générique

### 3.1 Principe

L'algorithme générique repose sur les principes suivant :

1. une action locale
2. l'utilisation de la relaxation de contrainte des préflots
3. une fonction de distance

D'une façon imagée, assimilons le graphe à un réseau de tuyaux de capacité donnée, les sommets à des réservoirs pouvant accumuler une quantité infinie de préflot et étant caractérisés par leur distance au puits. Le but de la manoeuvre étant d'acheminer une quantité maximale de flot de la source vers le puits à l'aide du réseau fourni. Pour des raisons de commodité, la distance du noeud source est fixée au nombre de sommets dans le réseau.

---

4. Aussi appelée *fonction de hauteur*

---

**Algorithm 2** Procédure Pousser-Réétiqueter

---

```
1:  $p \leftarrow \text{false}$ 
2:  $f \leftarrow \text{true}$ 
3: for  $j \in A(i)$  do
4:   if  $(i, j)$  est une arête acceptable then
5:      $x(i, j) \leftarrow \min(e(i), r(i, j))$ 
6:      $p \leftarrow \text{true}$ 
7:   else if  $p = \text{false}$  and  $d(i) < d(j)$  then
8:     if  $r(i, j) > 0$  and  $f = \text{true}$  then
9:        $m \leftarrow d(j) + 1$ 
10:       $f \leftarrow \text{false}$ 
11:    else if  $r(i, j) > 0$  then
12:       $m \leftarrow \min(m, d(j) + 1)$ 
13:    end if
14:  end if
15: end for
16: if  $p = \text{false}$  then
17:    $d(i) \leftarrow m$ 
18: end if
```

---

---

**Algorithm 3** Algorithme Générique

---

```
1: Initialisation()
2: while Il existe un noeud actif  $i$  do
3:   Pousser-Réétiqueter( $i$ )
4: end while
```

---



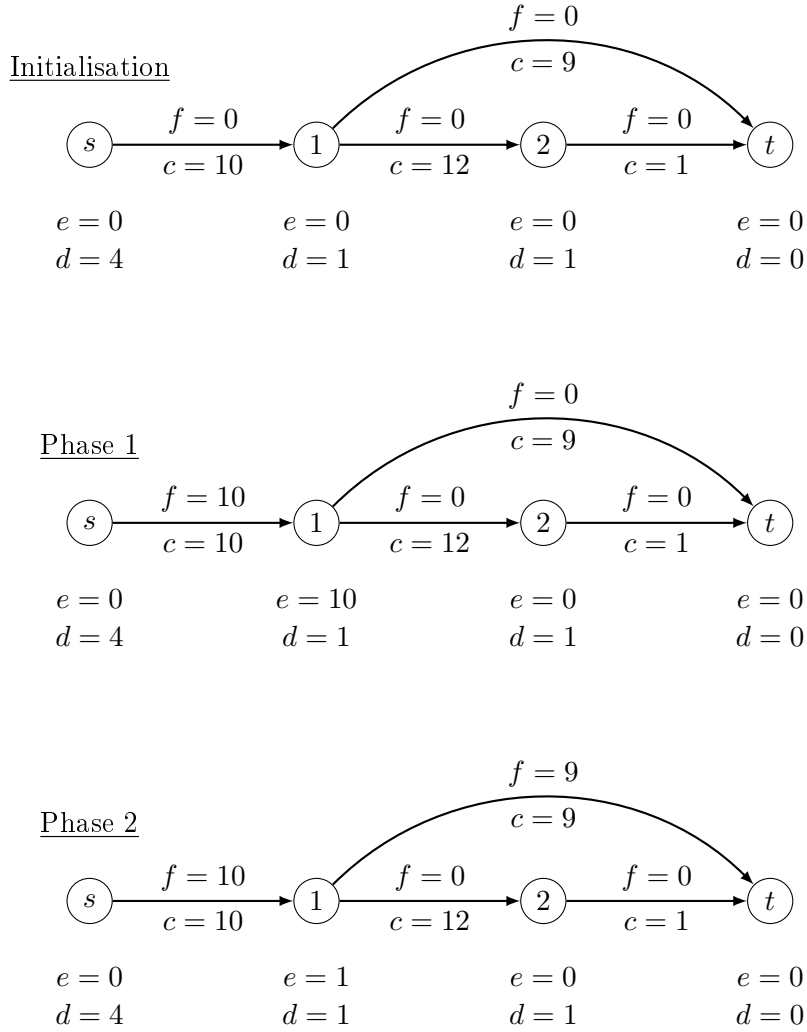


FIGURE 3 – Exécution d'un algorithme n'utilisant que les méthodes de poussage

Intuitivement, il est facile de comprendre que, pour que le préflot aille de la source vers le puits, celui ci doit transiter d'un réservoir  $a$  vers un réservoir  $b$  satisfaisant la condition suivante : *La distance de  $a$  au puits doit être supérieure à la distance de  $b$ .* En imaginant que l'on fasse le contraire, le préflot resterait cantonné à sa source sans même entrer dans le réseau défini par le graphe. L'action de faire transiter le préflot d'un noeud  $a$  à un noeud  $b$  est appelée opération de *poussage*.

Au moment où un noeud  $a$  reçoit une quantité de préflot de l'un de ses voisins  $b$  ayant réalisé une opération de poussage, la quantité de préflot envoyée de  $b$  vers  $a$  est alors directement stockée dans  $a$ , s'ajoutant ainsi à la quantité de flot déjà stockée. Cette dernière sera appelée *excédent du sommet  $a$*  et notée  $e$ . À un moment donné, si, pour un noeud quelconque  $a$ ,  $e(a) > 0$ , alors  $a$  sera dit excédentaire.

Seulement, l'opération de poussage à elle seule ne permet pas d'obtenir un flot satisfaisant. Ceci est illustré par l'exemple de la figure 3 : après la phase 2, le noeud 1 est encore excédentaire mais il lui est impossible d'effectuer une opération de poussage puisque l'arête le reliant à  $t$  est saturée et  $s$  et 2 ont une distance au noeud puits supérieure ou égale à celle de 1. Il faut donc introduire une opération supplémentaire, appelée ré-étiquetage.

Le ré-étiquetage consiste à réévaluer la distance du noeud excédentaire au noeud puits de façon à ce qu'il soit possible, après cette opération, d'effectuer une opération de poussage depuis ce noeud. Soit un noeud excédentaire  $i$  de distance  $d_i$  et son  $v_i$  son voisinage de sorte que  $\forall v \in v_i$ , on a :  $d_v \geq d_i$ . La distance de  $i$  doit être réévaluée afin de pouvoir évacuer l'excédent de flot, il faut donc augmenter  $d_i$  jusqu'à ce qu'un poussage puisse être réalisé ce qui revient à fixer  $d_i = 1 + \min(d_v)$ ,  $v \in v_i$ .

L'algorithme générique se résume à l'application de poussages et de ré-étiquetages sur les sommets actifs du graphe. La validité de cet algorithme sera démontrée dans la section suivante, les détails de l'algorithme de poussage-réétiquetage, d'initialisation de l'algorithme générique et l'algorithme en lui-même sont décrits aux algorithmes 2, 1 et 3.

La procédure Pousser-Réétiqueter appelle à quelques explications. La variable  $p$  est un booléen permettant de déterminer si l'algorithme a effectué une opération de poussage, si ce n'est pas le cas, la procédure effectue un réétiquetage. La variable  $f$  quant à elle permet de déterminer s'il s'agit là de la première itération, afin de pouvoir initialiser correctement  $m$  (qui est utilisé pour rechercher le plus petit des voisins du noeud effectuant l'algorithme).

**Remarque :**

On considère qu'une arête  $(i, j)$  est admissible<sup>5</sup>, si et seulement si :  $r(i, j) > 0$  et  $d(i) = d(j) + 1$ .

### 3.2 Validité

Pour montrer que l'algorithme de préflot-générique résout le problème du flot maximum, Nous allons démontrer que s'il se termine, Alors le préflot  $f$  calculé est un flot maximum !.

**Passage par les opérations de poussage et réétiquetage :**

**Lemme 3.2.1**

*Soit  $G=(S,A)$  un réseau de transport de source  $s$  et puits  $t$ , soit  $f$  un préflot et soit  $d$  une fonction de distance pour  $f$ . si  $u$  est un sommet débordant, alors on peut lui appliquer soit un poussage, soit un réétiquetage*

**Preuve**

soit  $(u,v)$  un arc résiduel quelconque, donc on a  $d(u) \leq d(v)+1$ . car  $d$  est une fonction de distance . Si une opération de poussage ne peut pas appliquer à  $u$ , alors pour tous les arcs résiduels  $(u,v)$ , on doit avoir  $d(u) < d(v)+1$ , ce qui implique que  $d(u) \leq d(v)$ . Donc une opération de réétiquetage peut être appliquée à  $u$ .

\*\*\* Opération poussage : D'après la procédure de poussage dans ce qui précède on peut conclure que si  $f$  est un préflot avant que la procédure de poussage soit appelée, il reste un préflot après.

**Retour à  $d$  la fonction de distance :**

**Lemme 3.2.2**

*Durant l'exécution de l'algorithme de préflot-générique sur  $G$  un réseau de transport de source  $s$  et puits  $t$ . la fonction  $d$  reste toujours une fonction de distance*

**Preuve**

On raisonne par récurrence sur le nombre d'opérations élémentaires effectuées. Après l'initialisation au départ, il est vrai que  $d$  est une fonction de distance.

---

5. On utilise aussi le terme acceptable

A-en réétiquetage : Comme nous l'avons déjà vu. On assure que si  $d$  est une fonction de distance, alors elle la restera après une opération de réétiquetage de  $u$ . Prenons un arc résiduel  $(u,v) \in A_f$  sortant du sommet  $u$ . Alors l'opération réétiqueter( $u$ ) nous garantit la contrainte suivante :  $d(u) \leq d(v)+1$  après. Prenons maintenant un autre arc  $(w,u)$  entrant au sommet  $u$ . alors on a d'après lemme 5.0.1 (vu en partie Complexité) que  $d(w) \leq d(u)+1$  avant le réétiquetage de  $u$ . entraîne que  $d(w) \leq d(u)+1$  après. Donc la fonction  $d$  reste toujours une fonction de distance après l'opération réétiquetage

B-en poussage : L'opération poussage( $u,v$ ), soit elle ajoutera l'arc  $(v,u) \in A_f$ , soit supprimera l'arc  $(u,v)$  de  $A_f$ . alors dans le cas d'ajout, on a  $d(v) = d(u)-1 < d(u)+1$  ce qui implique que  $d$  reste une fonction de distance. dans le cas de suppression de l'arc  $(u,v)$  dans le réseau résiduel supprime le contraint correspondant et  $d$  reste encore une fonction de hauteur

Conclusion : D'après A et B on conclut que  $d$  la fonction de distance reste toujours une fonction de distance.

### Lemme 3.2.3

Soit  $G=(S,A)$  un réseau de transport de source  $s$  et puits  $t$  soit  $f$  un préflot de  $G$  et  $d$  une fonction de distance sur  $A$ , alors il n'existe aucun chemin allant de la source  $s$  au puits  $t$  dans le réseau résiduel  $G_f$ .

#### Preuve

Supposons le contraire, c'est-à-dire qu'il existe un chemin élémentaire  $\mu = \{v_0, \dots, v_k\}$  avec  $v_0 = s$  et  $v_k = t$  de  $s$  vers  $t$  dans  $G_f$ .  $\mu$  élémentaire donc  $k < |s|$  Soit  $i = \{0, 1, \dots, k-1\}$ , l'arc  $(v_i, v_{i+1}) \in A_f$ . Comme  $d$  est une fonction de distance  $d(v_i) \leq d(v_{i+1})+1$  encore pour  $i = \{0, 1, \dots, k-1\}$ , en appliquant ces inégalités sur tout le chemin  $\mu$ , on aura  $d(s) \leq d(t) + k$ . Mais comme  $d(v_k) = d(t) = 0$ , on obtient  $d(s) = k < |s|$ , ce qui contredit la contrainte  $d(s) = |s|$  pour une fonction de distance

**Théorème 3.1** Si l'algorithme de préflot se termine, Alors le préflot  $f$  calculé est un flot maximum.

#### Preuve

Regardons la boucle 'Tant que' dans l'algorithme préflot-générique A chaque exécution de test de cette boucle,  $f$  est un préflot.

**Initialisation** : Initialiser-préflot fait de  $f$  est un préflot.

**Conservation** : Les seules opérations faites dans la boucle 'tant que' sont soit l'opération de poussage, ou celui de réétiquetage. L'opération de réétiquetage appliquée uniquement sur les distances des sommets, c'est-à-dire pas la valeur du flot, Alors elle ne distingue pas que si  $f$  un préflot ou non, après (\*\*\*) on a que si  $f$  est un préflot avant poussage, il reste un préflot après.

**Terminaison** : A la fin de l'exécution de l'algorithme, chaque sommet de  $S - \{s, t\}$  doit avoir un excédent vaut 0, en effet d'après le lemme 3.2.1 et le lemme 3.2.2 et l'invariant selon lequel  $f$  est toujours un préflot, Il n'y a pas de sommet débordant, par conséquent  $f$  est un préflot. comme  $d$  est une fonction de distance le lemme 3.2.3 nous dit qu'il n'y a pas de chemin entre la source  $s$  et le puits  $t$  dans le réseau résiduel  $G_f$ . Alors après le théorème du flot maximum et la coupe minimum le préflot  $f$  calculé est un flot maximum.

## 4 Les algorithmes dérivés

### 4.1 L'algorithme FIFO

### 4.2 L'algorithme High label

## Troisième partie

# Complexité

## 5 Algorithme Générique

Nous nous intéressons à présent à la complexité de l'algorithme générique (algo 3 p. 8). Afin de pouvoir calculer cette dernière, nous allons avoir besoin de quelques bornes utiles.

### Lemme 5.0.1

*Chaque opération de réétiquetage d'un noeud augmente strictement sa distance  $d$  au noeud puits.*

#### Preuve

Considérons un noeud actif  $i$  soumis à une opération de poussage-réétiquetage. Supposons, à présent, qu'il existe un noeud  $j$  tel que après réétiquetage on ait :  $d_{new}(i) \leq d_{old}(i)$ . Ceci n'est possible que si  $d(j) \leq d(i) - 1$  et si  $r_{ij} \geq 0$ , on aurait alors  $(i, j) \in A_i$  ce qui signifie alors que l'algorithme aurait effectué une opération de poussage et non un réétiquetage. Il est donc impossible de trouver un noeud  $j$  tel que l'opération de réétiquetage diminue sa distance  $d$ .

### Lemme 5.0.2

*A n'importe quelle itération de l'algorithme, tout noeud actif  $i$  est relié au noeud source  $s$  par un chemin de  $i$  vers  $s$  dans le réseau résiduel.*

#### Preuve

D'après le théorème de décomposition des flots, il est possible de décomposer n'importe quel préflot en des flots positifs le long de chemins reliant  $s$  à  $t$ <sup>7</sup>,  $s$  aux noeuds actifs et le long de cycles. De plus par définition d'un préflot on a :  $e(s) \leq 0$  et  $e(i) \geq 0 \forall i \in S - \{s\}$ .

Considérons un noeud actif  $i$ , l'excès de flots  $e(i)$  est strictement supérieur à 0. Or, lors de la considération des flots obtenus par le théorème de décomposition des flots, on observe que les flots pris le long des cycles et des chemins de  $s$  à  $t$  n'interviennent pas dans l'excédent de flot de  $i$ , ce qui implique qu'il existe un flot strictement positif coulant le long d'un chemin de  $s$  à  $i$  et donc que l'inverse de ce chemin se trouve dans le réseau résiduel. D'où l'existence d'un chemin de  $i$  vers  $s$  dans le réseau résiduel.

On peut directement déduire de ce lemme lors de, pour un noeud actif  $i$ , il existe toujours un noeud de son voisinage  $j$  tel que  $d(j) > d(i)$  et donc que lors d'un réétiquetage, la minimisation de la hauteur des voisins ne se fait pas sur un ensemble vide.

### Lemme 5.0.3

*Pour tout  $i \in S$ ,  $d(i) < 2n$*

---

6. La capacité résiduelle de l'arc  $(i, j)$

7. le noeud puits

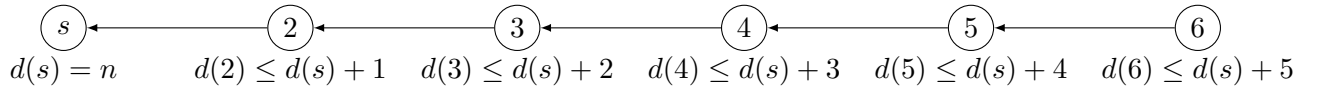


FIGURE 4 – Chemin de longueur  $n - 2$  sommets dans le graphe résiduel

### Preuve

Une opération de réétiquetage n'affecte que la distance du noeud  $i$  au noeud puits, par conséquent l'excédent de flot sur le noeud  $i$  après l'opération est le même qu'avant. D'après le lemme 5.0.2, il existe donc un chemin  $P$  de  $s$  à  $i$ <sup>8</sup> dans le réseau résiduel dont la longueur est au plus  $n - 2$  sommets<sup>9</sup>. À la fin de l'initialisation :  $d(s) = |S| = n$ , et pour chaque arc  $(k, l)$  du chemin de  $i$  à  $s$ , on a :  $d(k) \leq d(l) + 1$ . Prenons un exemple concret, soit  $G$  un graphe à 8 sommets de sorte qu'après un certains nombre d'itérations de l'algorithme, le noeud 6 est actif<sup>10</sup>. Le chemin de 6 vers  $s$  est représenté à la fig. 4.

En partant de  $d(s) = n$ , on peut écrire :

$$d(2) \leq d(s) + 1$$

Or on a aussi :

$$\begin{aligned} d(3) &\leq d(2) + 1 \\ \Rightarrow d(3) &\leq d(s) + 2 \end{aligned}$$

Donc pour le  $n - 2^e$  sommet on a :

$$\begin{aligned} d(n-2) &\leq d(s) + (n-3) \\ \Rightarrow d(n-2) &< d(s) + n \\ \Rightarrow d(n-2) &< 2n \end{aligned}$$

Et comme il s'agit du pire des cas, on peut généraliser :  $\forall i \in S, d(i) < 2n$ . Si l'on prend en compte le fait qu'à chaque opération de réétiquetage, la distance  $d$  est augmentée au minimum d'une unité, on obtient le lemme 5.0.4.

### Lemme 5.0.4

*Un noeud  $i$  subit au maximum  $2n$  opération de réétiquetage, ce qui implique que le nombre total d'opération de réétiquetage est borné par  $2n^2$*

### Lemme 5.0.5

*Le nombre de poussages saturants<sup>11</sup> exécutés pendant l'algorithme est inférieur à  $2nm$ .*

### Preuve

Considérons deux sommets voisins  $i$  et  $j$ . Si l'on considère un poussage saturant de  $i$  vers  $j$  (respectivement de  $j$  vers  $i$ ), alors l'arête  $(j, i)$  (resp.  $(i, j)$ ) est une arête de  $A$ . Pour pouvoir effectuer le poussage saturant inverse,  $j$  (resp.  $i$ ) doit augmenter sa distance de :  $d(j) - d(i) + 1$  (resp.  $d(i) - d(j) + 1$ )  $\geq 2$ . Donc chacun des sommets peut au maximum effectuer  $n$  poussage saturant vers l'autre<sup>12</sup>. Ce qui nous donne pour chaque arc, un nombre de poussages saturants inférieur à  $2n$ . Sur l'ensemble de l'algorithme ce dernier est bien majoré par  $2nm$ .

8.  $i \neq t$

9. Le chemin ne peut inclure  $t$ , de plus  $i$  ne peut être un voisin direct de  $t$ , sinon il n'y aurait pas eu d'opération de réétiquetage.

10. Il s'agit bien du pire des cas : une chaîne de  $n - 2$  sommets

11. Un poussage de  $i$  vers  $j$  est dit saturant si après poussage,  $r((i, j)) = 0$

12. La distance de chaque sommet est bornée ainsi :  $0 \leq d(i) \leq 2n$ , le nombre maximum d'augmentation de  $d$  de 2 unités est donc  $n$ .

**Lemme 5.0.6**

Le nombre de poussage non saturants lors de l'exécution de l'algorithme est borné supérieurement par :  $O(n^2m)$ .

**Preuve**

Considérons la fonction  $\Phi$  qui calcule la somme des distances des noeuds actifs :

$$\Phi = \sum_{i \in \{i \in S / e(i) > 0\}} d(i)$$

. Comme le nombre de noeuds actifs est inférieur à  $|S|$  et que la distance de chaque somme est bornée par  $2n$ , la valeur initiale<sup>13</sup> de  $\Phi$  est inférieure à  $2n^2$ , à la fin de l'algorithme, il n'existe plus de sommets actifs, et donc :  $\Phi = 0$ . Lors du déroulement de l'algorithme, trois choses peuvent se produire :

1. Poussage non saturant. Il y a lieu lorsque l'excédent de flot du sommet est inférieure à la capacité résiduelle de l'arc emprunté, donc une fois cette étape effectuée le noeud  $i$  ayant effectué le poussage n'est plus actif. Dans le cas ou  $j$ , le sommet cible du poussage n'appartenait pas à  $I$ , la fonction  $\Phi$  est incrémentée de  $d(j)$  et décrémentée de  $d(i)$ . Or  $d(i) \geq d(j) + 1$ , donc  $\Phi$  diminue d'au moins une unité.
2. Poussage saturant. Il y a lieu lorsque  $e(i) \geq r((i, j))$ , Dans le pire des cas,  $j \notin I$  avant l'opération, on a alors une augmentation maximale de  $\Phi$  égale à la hauteur max de  $j$ , soit  $2n$  donc une augmentation de  $2n^2m$  pour l'ensemble des poussages saturants.
3. Ré-étiquetage. Cette opération n'a lieu que lorsqu'aucun arc sortant de  $i$  n'est valide pour une opération de poussage, il est évident que chaque opération de réétiquetage augmente  $\Phi$  de  $2n$  unités au maximum par noeud<sup>14</sup>, soit une augmentation totale de  $n^2$  unités sur l'ensemble de l'algorithme.

La seule opération permettant de diminuer la valeur de  $\Phi$  est un poussage non saturant, or la valeur finale de  $\Phi$  est zéro, on en déduit donc que la valeur maximale de  $\Phi$  nous donne le nombre de poussages non saturants. La valeur maximal de  $\Phi$  nous est donnée par la somme des bornes de la valeur initiale et des augmentations dues aux opérations de poussages saturants et de réétiquetage soit :

$$\Phi = n^2 + n^2 + 2n^2m = 2n^2(m + 1) = O(n^2m)$$

On en déduit donc le théorème suivant :

**Théorème 5.1** *L'algorithme de préflots générique s'exécute en un temps  $O(n^2m)$ .*

## 6 Algorithme FIFO

Les améliorations sur l'algorithme générique se font soit grâce à l'amélioration de la structure de donnée, soit à l'aide d'une amélioration sur la manière de sélectionner les noeuds actifs dans le réseau de départ.

Définissons à présent la notion d'*analyse de noeud*. Au cours de l'algorithme précédent, dans le cas d'une opération de poussage saturant, nous avons vu que le noeud réalisant l'opération reste, très probablement, un noeud actif, il est donc candidat à la sélection lors de la prochaine boucle de l'algorithme. Seulement rien ne garantit qu'il sera à nouveau choisi, il peut donc être

---

13. Après initialisation.

14. Limite donnée par la hauteur maximale d'un noeud.

intéressant dans ce genre de situation de réaliser plusieurs poussages saturants suivis soit d'un poussage non saturant, soit d'une opération de ré-étiquetage. C'est cette suite d'opérations de que nous appellerons dorénavant *analyse de noeud*

**Théorème 6.1** *L'algorithme de préflot FIFO s'exécute en un temps  $O(n^3)$ .*

### Preuve

Afin de calculer la borne supérieure du temps d'exécution de l'algorithme, nous allons être amenés à introduire le concept de phase. On appelle première phase, la partie de l'algorithme qui consiste à appliquer une analyse de noeud à chacun des sommets devenus actifs suite aux opérations de poussage effectuées sur  $s$ . Durant cette première phase, les noeuds devenus actifs suite à l'analyse de noeud des sommets de la première phase, sont mis en queue de file et leur analyse constituera les opérations de la seconde phase, et ainsi de suite. L'objectif est donc de borner le nombre de phases.

Considérons la fonction  $\Phi = \max\{d(i)/i \text{ actif}\}$ . Considérons à présent l'effet d'une phase sur la fonction  $\Phi$ , on remarque alors plusieurs cas :

1. Lors de la phase aucune opération de ré-étiquetage n'a lieu. Dans ce cas, les sommets  $i$  de cette phase ont tous effectué une opération de poussage non saturant, ils ne sont donc plus actifs. Les noeuds actifs après la phase  $j$  ont tous une distance respectant cette loi :  $d(j) < d(i) \quad \forall i, j$ .  $\Phi$  diminue alors d'au moins une unité.
2. Lors de la phase il y a au moins une opération de ré-étiquetage.  $\Phi$  voit alors sa valeur augmenter de  $\delta$  avec  $\delta \geq 0$ . Si  $\delta = 0$ , alors il existe un noeud qui voit sa hauteur augmenter au moins d'une unité, si  $\delta > 0$  alors il existe un noeud dont la hauteur augmente d'au moins  $\delta$ . De par le lemme 5.0.3 le nombre de phases pendant lesquelles  $\Phi$  est inférieure à  $2n^2$ .

Comme la valeur initiale de  $\Phi$  est  $n$ , le nombre de phases pendant lesquelles  $\Phi$  diminue est donc bornée supérieurement par :  $2n^2 + n$ , le nombre total de phases est donc borné par  $4n^2 + n$ . De plus comme il y a au moins une opération de poussage non saturant par phase, le nombre de poussage non saturants est borné par  $4n^3 + n$ . L'algorithme s'exécute donc en  $O(n^3)$ .

## Références

- [1] R. Tarjan A. Goldberg. A new approach to the maximum flow problem. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 35 :921 – 940, October 1988.
- [2] A. Shrijver. On the history of the transportation and maximum flow problem. *Math. Programming*, 2002.