

# Algorithmes gloutons

Quentin Fortier

February 14, 2022

# Algorithme glouton

La stratégie d'un **algorithme glouton** est d'effectuer à chaque étape l'action qui semble la plus intéressante localement (sans revenir sur sa décision plus tard).

La stratégie d'un **algorithme glouton** est d'effectuer à chaque étape l'action qui semble la plus intéressante localement (sans revenir sur sa décision plus tard).

Exemples :

- Algorithme glouton pour le sac à dos (non optimal)
- Algorithmes de Prim, Kruskal pour trouver un arbre couvrant de poids minimum
- Coloriage de graphe (non optimal a priori)

## Problème du sac à dos

On considère un sac à dos de capacité 10kg et les objets suivants :

poids (kg)	2	2	2	3	5	5	8
valeur (€)	1	1	1	7	10	10	13

Quelle est la valeur maximum que l'on peut mettre dans le sac ?

## Problème du sac à dos

On considère un sac à dos de capacité 10kg et les objets suivants :

poids (kg)	2	2	2	3	5	5	8
valeur (€)	1	1	1	7	10	10	13

Quelle est la valeur maximum que l'on peut mettre dans le sac ?

Algorithme glouton n°1 : ajouter les éléments dans l'ordre croissant de poids, tant que c'est possible

## Problème du sac à dos

On considère un sac à dos de capacité 10kg et les objets suivants :

poids (kg)	2	2	2	3	5	5	8
valeur (€)	1	1	1	7	10	10	13

Quelle est la valeur maximum que l'on peut mettre dans le sac ?

Algorithme glouton n°2 : ajouter les éléments dans l'ordre décroissant de valeur, tant que c'est possible

## Problème du sac à dos

On considère un sac à dos de capacité 10kg et les objets suivants :

poids (kg)	2	2	2	3	5	5	8
valeur (€)	1	1	1	7	10	10	13
valeur/poids	0.5	0.5	0.5	2.3	2	2	1.6

Quelle est la valeur maximum que l'on peut mettre dans le sac ?

Algorithme glouton n°3 : ajouter les éléments dans l'ordre décroissant de valeur/poids, tant que c'est possible

## Problème du sac à dos

On considère un sac à dos de capacité 10kg et les objets suivants :

poids (kg)	2	2	2	3	5	5	8
valeur (€)	1	1	1	7	10	10	13
valeur/poids	0.5	0.5	0.5	2.3	2	2	1.6

Quelle est la valeur maximum que l'on peut mettre dans le sac ?

Algorithme glouton n°3 : ajouter les éléments dans l'ordre décroissant de valeur/poids, tant que c'est possible

Ces méthodes gloutonnes ne sont pas optimales.



On considère maintenant le problème du **sac à dos fractionnaire**, où il est possible de prendre une fraction d'un objet.

On considère maintenant le problème du **sac à dos fractionnaire**, où il est possible de prendre une fraction d'un objet.

## Théorème

L'algorithme glouton ajoutant les objets dans l'ordre décroissant de valeur/poids, et ajoutant une fraction du dernier objet (qui ne rentre pas en entier dans le sac) est optimal pour le problème du sac à dos fractionnaire.

# Arbre couvrant de poids minimal

## Arbre couvrant

Soit  $G$  un graphe pondéré (chaque arête  $e$  possède un poids  $w(e)$ ).  
Un arbre couvrant  $T$  de  $G$  est un ensemble d'arêtes de  $G$  qui forme un arbre et qui contient tous les sommets. Son poids  $w(T)$  est la somme des poids des arêtes de l'arbre.

# Arbre couvrant de poids minimal

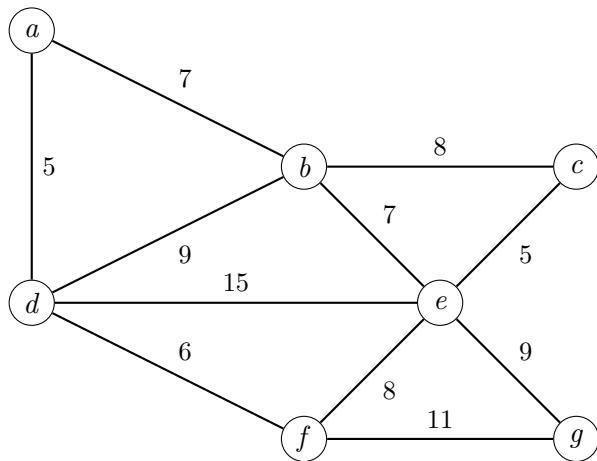
## Arbre couvrant

Soit  $G$  un graphe pondéré (chaque arête  $e$  possède un poids  $w(e)$ ).  
Un arbre couvrant  $T$  de  $G$  est un ensemble d'arêtes de  $G$  qui forme un arbre et qui contient tous les sommets. Son poids  $w(T)$  est la somme des poids des arêtes de l'arbre.

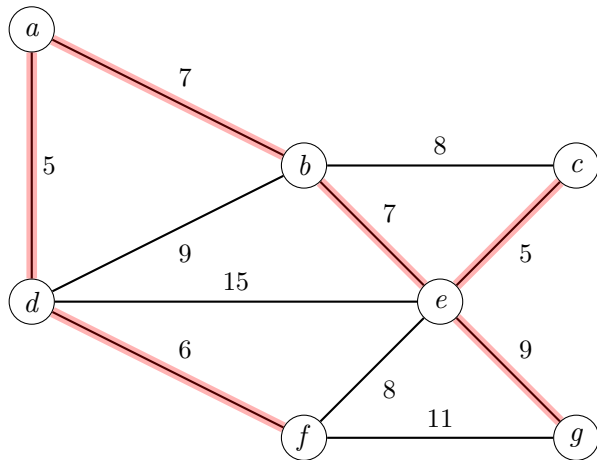
## Arbre couvrant de poids minimal

Un arbre couvrant dont le poids est le plus petit possible est appelé un **arbre couvrant de poids minimal**.

# Arbre couvrant de poids minimal



# Arbre couvrant de poids minimal



Un arbre couvrant de poids minimum

# Arbre couvrant de poids minimal

Deux algorithmes gloutons très connus permettent de trouver un arbre couvrant de poids minimum dans un graphe.  
Ils ajoutent des arêtes une par une jusqu'à former un arbre couvrant de poids minimum.

# Arbre couvrant de poids minimal

Deux algorithmes gloutons très connus permettent de trouver un arbre couvrant de poids minimum dans un graphe.

Ils ajoutent des arêtes une par une jusqu'à former un arbre couvrant de poids minimum.

Ils diffèrent par le choix de l'arête à ajouter à chaque itération :

- **Kruskal** : ajoute la plus petite arête qui ne crée pas de cycle



# Arbre couvrant de poids minimal

Deux algorithmes gloutons très connus permettent de trouver un arbre couvrant de poids minimum dans un graphe.

Ils ajoutent des arêtes une par une jusqu'à former un arbre couvrant de poids minimum.

Ils diffèrent par le choix de l'arête à ajouter à chaque itération :

- **Kruskal** : ajoute la plus petite arête qui ne crée pas de cycle
- **Prim** : ajoute la plus petite arête qui conserve la connexité

## Algorithme de Kruskal :

---

Trier les arêtes par poids croissant.

Commencer avec un arbre  $T$  vide (aucune arête).

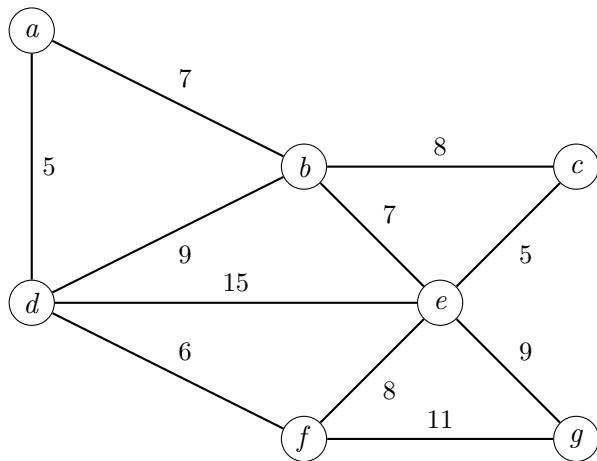
Pour chaque arête  $e$  par poids croissant:

    Si l'ajout de  $e$  ne crée pas de cycle dans  $T$ :

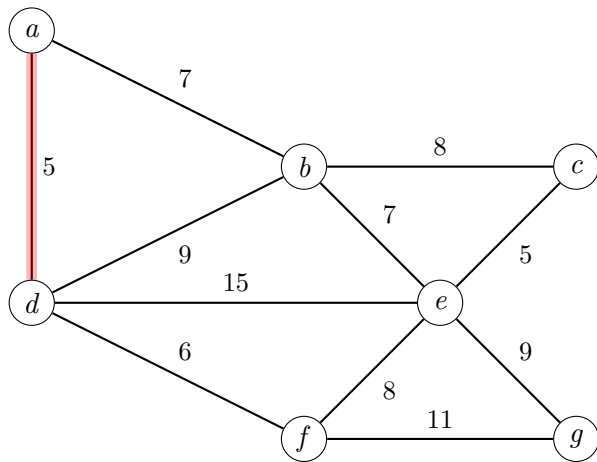
        Ajouter  $e$  à  $T$

---

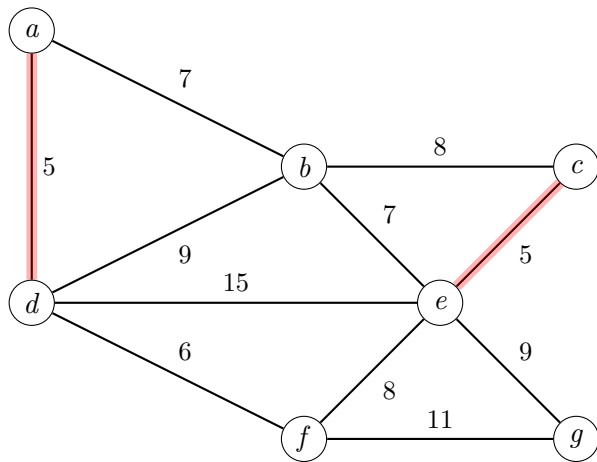
# Kruskal



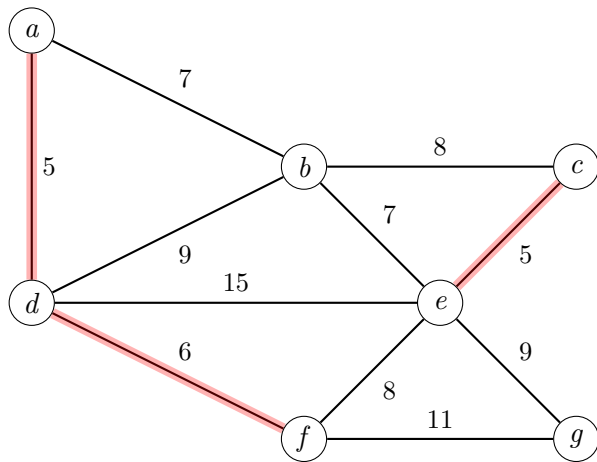
# Kruskal



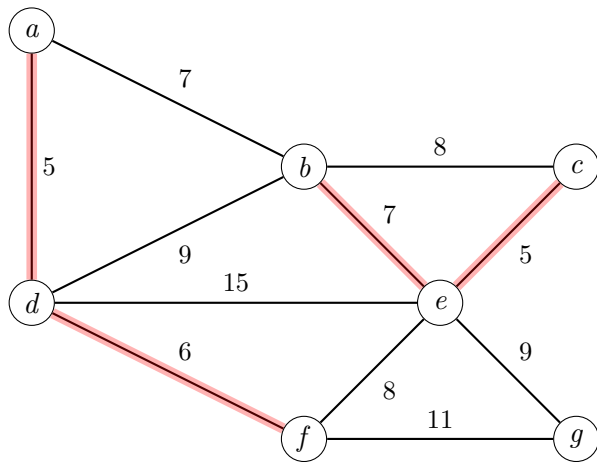
# Kruskal



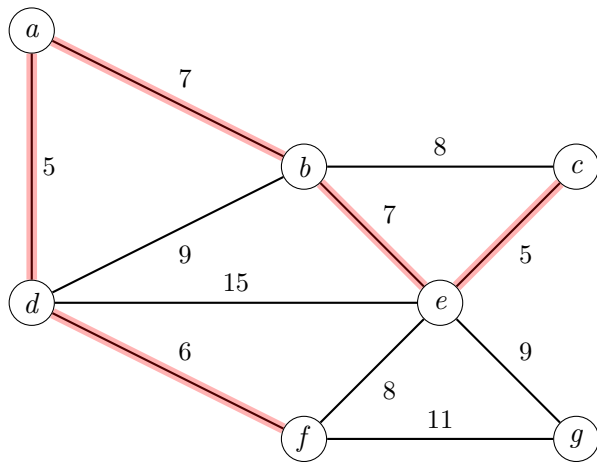
# Kruskal



# Kruskal

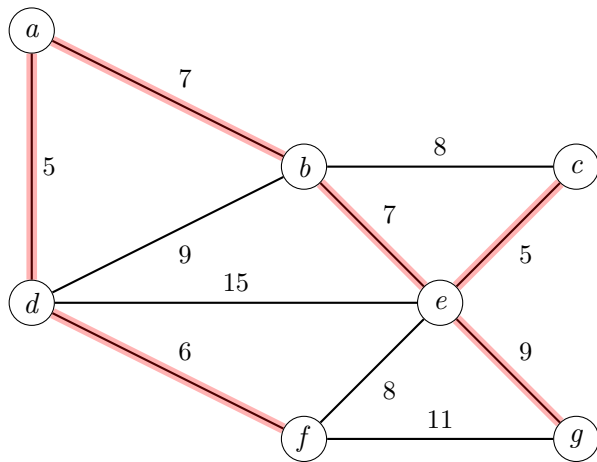


# Kruskal





# Kruskal



## Théorème

L'algorithme de Kruskal sur un graphe  $G$  donne bien un arbre couvrant de poids minimum.

Preuve : Soit  $T$  l'arbre obtenu par Kruskal.

- 1 Montrer que  $T$  est un arbre couvrant.
- 2 Montrer que  $T$  est de poids minimum.

$T$  est un arbre couvrant :

- 1  $T$  est sans cycle :

$T$  est un arbre couvrant :

- 1  $T$  est sans cycle : car l'algorithme ne crée pas de cycle
- 2  $T$  est connexe (et couvrant) :

$T$  est un arbre couvrant :

- 1  $T$  est sans cycle : car l'algorithme ne crée pas de cycle
- 2  $T$  est connexe (et couvrant) :  
Soit  $u$  et  $v$  deux sommets de  $G$ . Soit  $U$  l'ensemble des sommets accessibles depuis  $u$  dans  $T$ .

$T$  est un arbre couvrant :

①  $T$  est sans cycle : car l'algorithme ne crée pas de cycle

②  $T$  est connexe (et couvrant) :

Soit  $u$  et  $v$  deux sommets de  $G$ . Soit  $U$  l'ensemble des sommets accessibles depuis  $u$  dans  $T$ .

Supposons  $v \notin U$ . Comme  $G$  est connexe, il existe une arête de  $G$  entre  $U$  et  $V \setminus U$ .

$T$  est un arbre couvrant :

①  $T$  est sans cycle : car l'algorithme ne crée pas de cycle

②  $T$  est connexe (et couvrant) :

Soit  $u$  et  $v$  deux sommets de  $G$ . Soit  $U$  l'ensemble des sommets accessibles depuis  $u$  dans  $T$ .

Supposons  $v \notin U$ . Comme  $G$  est connexe, il existe une arête de  $G$  entre  $U$  et  $V \setminus U$ .

Cette arête aurait dû être ajoutée à  $T$ , puisqu'elle ne crée pas de cycle.

Contradiction :  $v$  est donc accessible depuis  $u$  dans  $T$ .

Comme c'est vrai pour tout  $u, v$ ,  $T$  est connexe.

## Théorème

L'algorithme de Kruskal sur un graphe  $G$  donne un arbre couvrant de poids minimum.

Preuve :



## Théorème

L'algorithme de Kruskal sur un graphe  $G$  donne un arbre couvrant de poids minimum.

Preuve : Soient  $T$  l'arbre obtenu par Kruskal et  $T^*$  un arbre de poids minimum.

Si  $T = T^*$ , le théorème est démontré.

## Théorème

L'algorithme de Kruskal sur un graphe  $G$  donne un arbre couvrant de poids minimum.

Preuve : Soient  $T$  l'arbre obtenu par Kruskal et  $T^*$  un arbre de poids minimum.

Si  $T = T^*$ , le théorème est démontré.

Sinon, soit  $e^* \in T^*$  une arête de poids min n'appartenant pas à  $T$ .

## Théorème

L'algorithme de Kruskal sur un graphe  $G$  donne un arbre couvrant de poids minimum.

Preuve : Soient  $T$  l'arbre obtenu par Kruskal et  $T^*$  un arbre de poids minimum.

Si  $T = T^*$ , le théorème est démontré.

Sinon, soit  $e^* \in T^*$  une arête de poids min n'appartenant pas à  $T$ .

Comme  $T$  est connexe, il existe un chemin  $C$  dans  $T$  reliant les extrémités de  $e^*$ .

## Théorème

L'algorithme de Kruskal sur un graphe  $G$  donne un arbre couvrant de poids minimum.

Preuve : Soient  $T$  l'arbre obtenu par Kruskal et  $T^*$  un arbre de poids minimum.

Si  $T = T^*$ , le théorème est démontré.

Sinon, soit  $e^* \in T^*$  une arête de poids min n'appartenant pas à  $T$ .

Comme  $T$  est connexe, il existe un chemin  $C$  dans  $T$  reliant les extrémités de  $e^*$ .

- Il existe une arête  $e$  de  $C$  qui n'est pas dans  $T^*$

## Théorème

L'algorithme de Kruskal sur un graphe  $G$  donne un arbre couvrant de poids minimum.

Preuve : Soient  $T$  l'arbre obtenu par Kruskal et  $T^*$  un arbre de poids minimum.

Si  $T = T^*$ , le théorème est démontré.

Sinon, soit  $e^* \in T^*$  une arête de poids min n'appartenant pas à  $T$ .

Comme  $T$  est connexe, il existe un chemin  $C$  dans  $T$  reliant les extrémités de  $e^*$ .

- Il existe une arête  $e$  de  $C$  qui n'est pas dans  $T^*$  car  $T^*$  ne peut pas contenir de cycle
- $w(e) \leq w(e^*)$  (sinon Kruskal aurait ajouté  $e^*$  à  $T$ )

Considérons  $T_2 = T \setminus \{e\} \cup \{e^*\}$ .

Considérons  $T_2 = T \setminus \{e\} \cup \{e^*\}$ .

- $T_2$  est un arbre couvrant

Considérons  $T_2 = T \setminus \{e\} \cup \{e^*\}$ .

- $T_2$  est un arbre couvrant
- $w(T) \leq w(T_2)$



Considérons  $T_2 = T \setminus \{e\} \cup \{e^*\}$ .

- $T_2$  est un arbre couvrant
- $w(T) \leq w(T_2)$

On répète le même processus sur  $T_2$ , ce qui nous donne  $T_3, T_4 \dots$  jusqu'à obtenir  $T^*$  :

$$w(T) \leq w(T_2) \leq w(T_3) \leq \dots \leq w(T^*)$$

Comme  $T$  est un arbre couvrant et  $w(T) \leq w(T^*)$ , on a en fait  $w(T) = w(T^*)$  et  **$T$  est un arbre couvrant de poids minimum.**

# Kruskal : Implémentation et complexité

On va avoir besoin d'un graphe pondéré :

---

```
type ('v, 'w) graph = {  
  n : int; (* nombre de sommets *)  
  add_edge : 'v -> 'v -> 'w -> unit;  
  del_edge : 'v -> 'v -> unit;  
  edges : unit -> ('v*'v) list; (* toutes les arêtes *)  
  w : 'v -> 'v -> 'w option; (* poids d'une arête *)  
  adj : 'v -> 'v list (* liste des sommets adjacents *)  
}
```

---

On suppose de plus avoir une fonction créant un nouveau graphe à  $n$  sommets et sans arête :

---

```
create_graph : int -> ('v, 'w) graph
```

---

# Kruskal : Implémentation et complexité

Complexité de Kruskal sur un graphe à  $n$  sommets et  $p$  arêtes :

- 1 Trier les arêtes par poids croissants :

# Kruskal : Implémentation et complexité

Complexité de Kruskal sur un graphe à  $n$  sommets et  $p$  arêtes :

- 1 Trier les arêtes par poids croissants :  $O(n \log(n))$
- 2 Pour chaque arête  $\{u, v\}$ , déterminer si l'ajout de cette arête crée un cycle.

Pour détecter un cycle :

- DFS/BFS

# Kruskal : Implémentation et complexité

Complexité de Kruskal sur un graphe à  $n$  sommets et  $p$  arêtes :

- 1 Trier les arêtes par poids croissants :  $O(n \log(n))$
- 2 Pour chaque arête  $\{u, v\}$ , déterminer si l'ajout de cette arête crée un cycle.

Pour détecter un cycle :

- DFS/BFS en  $O(n + p)$   $\longrightarrow$  Complexité  $O(p(n + p))$  pour Dijkstra
- **Union-Find** en  $O(1)$   $\longrightarrow$  Complexité  $O(n \log(n))$  pour Dijkstra

Union-Find est une structure de donnée permettant de représenter des classes (d'équivalences) :

- Chaque élément appartient à une classe
- Chaque classe possède un représentant, qui est un élément particulier de cette classe

# Kruskal : Union-Find

On va utiliser les opérations suivantes d'Union-Find :

- ❶ `create : int -> 'a unionfind`  
→ `create n` renvoie une valeur de type `unionfind` avec `n` éléments, chaque élément étant seul dans sa classe

# Kruskal : Union-Find

On va utiliser les opérations suivantes d'Union-Find :

- ❶ `create : int -> 'a unionfind`  
→ `create n` renvoie une valeur de type `unionfind` avec `n` éléments, chaque élément étant seul dans sa classe
- ❷ `find : 'a unionfind -> 'a -> 'a`  
→ `find uf v` donne le représentant de l'élément `v`



# Kruskal : Union-Find

On va utiliser les opérations suivantes d'Union-Find :

- ① `create : int -> 'a unionfind`  
→ `create n` renvoie une valeur de type `unionfind` avec `n` éléments, chaque élément étant seul dans sa classe
- ② `find : 'a unionfind -> 'a -> 'a`  
→ `find uf v` donne le représentant de l'élément `v`
- ③ `union : 'a unionfind -> 'a -> 'a -> unit`  
→ `union uf u v` fusionne les classes de `u` et `v` en une seule

# Kruskal : Union-Find

On va utiliser les opérations suivantes d'Union-Find :

- ① `create : int -> 'a unionfind`  
→ `create n` renvoie une valeur de type `unionfind` avec `n` éléments, chaque élément étant seul dans sa classe
- ② `find : 'a unionfind -> 'a -> 'a`  
→ `find uf v` donne le représentant de l'élément `v`
- ③ `union : 'a unionfind -> 'a -> 'a -> unit`  
→ `union uf u v` fusionne les classes de `u` et `v` en une seule

# Kruskal : Union-Find

On va utiliser les opérations suivantes d'Union-Find :

- ① `create : int -> 'a unionfind`  
→ `create n` renvoie une valeur de type `unionfind` avec `n` éléments, chaque élément étant seul dans sa classe
- ② `find : 'a unionfind -> 'a -> 'a`  
→ `find uf v` donne le représentant de l'élément `v`
- ③ `union : 'a unionfind -> 'a -> 'a -> unit`  
→ `union uf u v` fusionne les classes de `u` et `v` en une seule

Implémentation efficace (exercice à faire) : utiliser une forêt, avec un arbre pour chaque classe, enraciné en le représentant.

## Kruskal : Union-Find

Utilisation d'un Union-Find pour construire un arbre  $T$  (qu'on construit en ajoutant les arêtes une par une) dans Kruskal :

- Chaque classe de l'Union-Find correspond à une composante connexe dans  $T$ .

# Kruskal : Union-Find

Utilisation d'un Union-Find pour construire un arbre  $T$  (qu'on construit en ajoutant les arêtes une par une) dans Kruskal :

- Chaque classe de l'Union-Find correspond à une composante connexe dans  $T$ .
- Si  $u$  et  $v$  sont dans la même classe ( $\text{find uf } u = \text{find uf } v$ ) alors l'ajout de l'arête  $\{u, v\}$  à  $T$  créerait un cycle.

# Kruskal : Union-Find

Utilisation d'un Union-Find pour construire un arbre  $T$  (qu'on construit en ajoutant les arêtes une par une) dans Kruskal :

- Chaque classe de l'Union-Find correspond à une composante connexe dans  $T$ .
- Si  $u$  et  $v$  sont dans la même classe (`find uf u = find uf v`) alors l'ajout de l'arête  $\{u, v\}$  à  $T$  créerait un cycle.
- Sinon, ajouter l'arête à  $T$  et fusionner les classes de  $u$  et  $v$  (`union uf u v`).

# Kruskal : Union-Find

---

```
let kruskal g = (* renvoie la liste des arêtes d'un
                  arbre couvrant de poids min de g *)
  let uf = create () in
  let rec aux = function
    | [] -> []
    | (u, v)::q when find uf u = find uf v -> aux q
    | (u, v)::q -> (union uf u v; (u, v)::aux q) in
  g.edges ()
|> List.sort (fun e f -> g.w e - g.w f)
|> aux
```

---

## Algorithme de Prim :

---

Commencer avec un arbre  $T$  contenant un seul sommet.

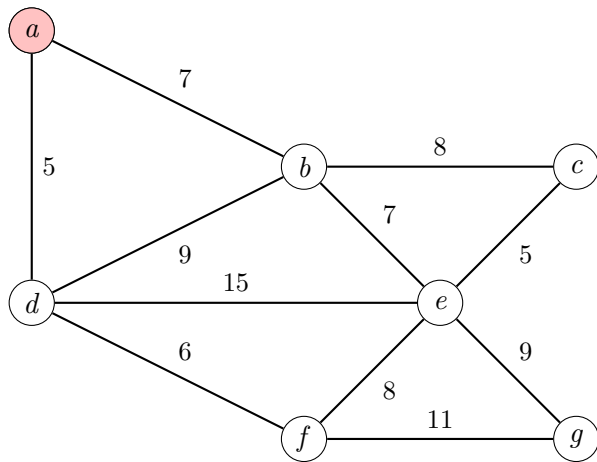
Tant que  $T$  ne contient pas tous les sommets:

    Ajouter l'arête sortante de  $T$  de poids minimum

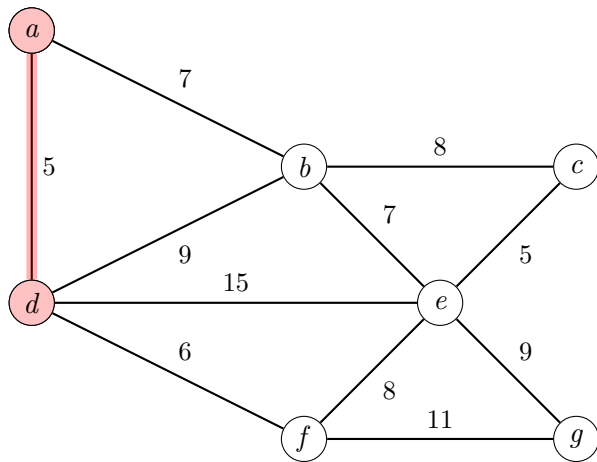
---



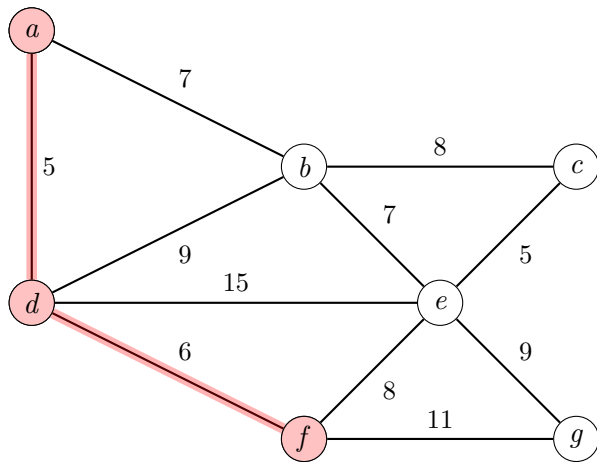
# Prim



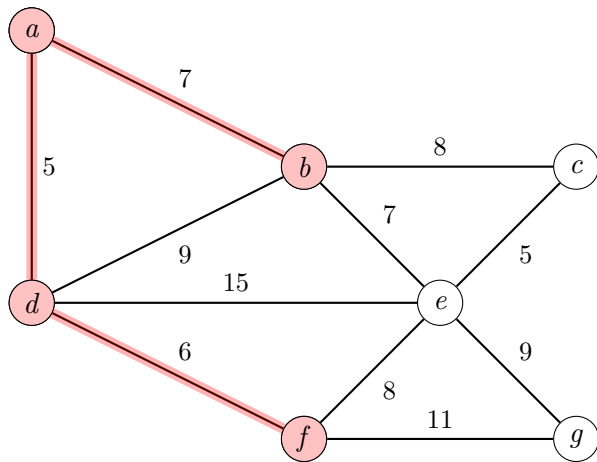
# Prim



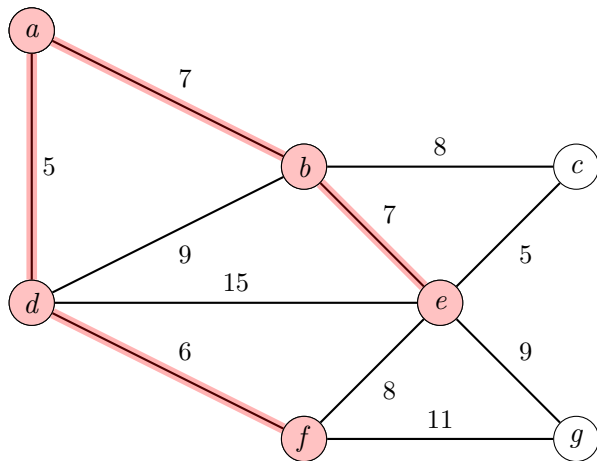
# Prim



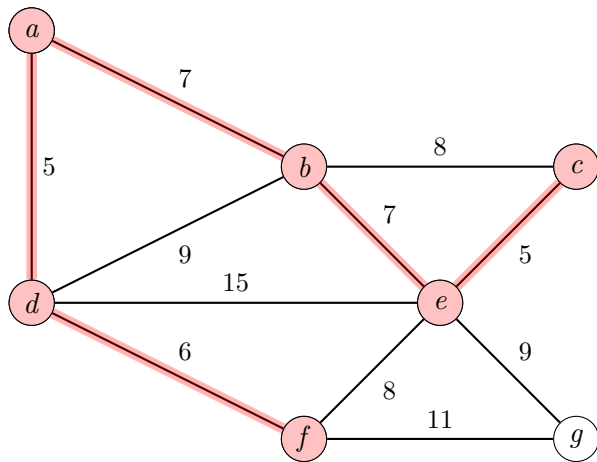
# Prim



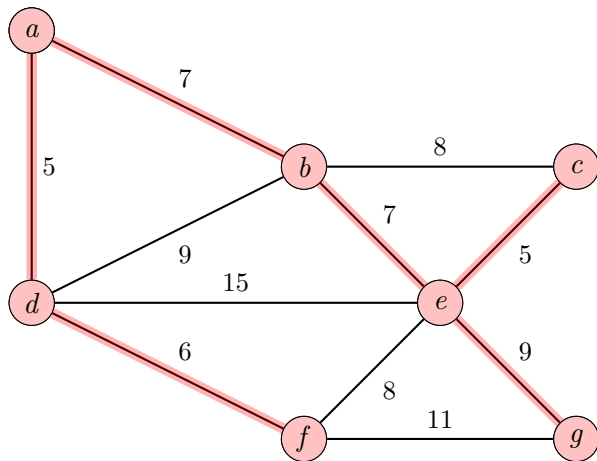
# Prim



# Prim



# Prim



## Théorème

L'algorithme de Prim sur un graphe  $G$  donne bien un arbre couvrant de poids minimum.

Preuve : Laissée en exercice.



# Prim : Implémentation

Pour implémenter Prim, on utilise une **file de priorité**  $pq$  :

- $pq$  contient les arêtes sortantes de  $T$
- les éléments de  $pq$  sont ordonnés par poids croissants :  
`take_min pq` renvoie donc l'arête sortante de  $T$  de poids minimum