

Arbres et tri par tas

Algorithmique et structures de données, 2022-2023

P. Albuquerque (B410), P. Künzli et O. Malaspinas (A401), ISC, HEPIA
2023-03-17

En partie inspirés des supports de cours de P. Albuquerque

Visualisation d'algorithmes

- <https://visualgo.net/>
- Allons nous rafraîchir la mémoire sur l'insertion / recherche dans un arbre binaire.

L'insertion (1/4)

- Deux parties:
 - Recherche le parent où se passe l'insertion.
 - Ajout du fils dans l'arbre.

Recherche du parent (pseudo-code)

```
arbre position(arbre, clé)
  si est_non_vide(arbre)
    si clé < clé(arbre)
      suivant = gauche(arbre)
    sinon
      suivant = droite(arbre)
  tant que clé(arbre) != clé && est_non_vide(suivant)
    arbre = suivant
  si clé < clé(arbre)
    suivant = gauche(arbre)
  sinon
    suivant = droite(arbre)
```

Recherche du parent (code)

L'insertion (2/4)

Recherche du parent (code)

```
tree_t position(tree_t tree, key_t key) {
    tree_t curr = tree;
    if (NULL != curr) {
        tree_t subtree =
            key > curr->key ? curr->right : curr->left;
        while (key != curr->key && NULL != subtree) {
            curr = subtree;
            subtree = key > curr->key ? curr->right :
                curr->left;
        }
    }
    return curr;
}
```

L'insertion (3/4)

- Deux parties:
 - Recherche de la position.
 - Ajout dans l'arbre.

Ajout du fils (pseudo-code)

```
rien ajout(arbre, clé)
  si est_vide(arbre)
    arbre = nœud(clé)
  sinon
    arbre = position(arbre, clé)
    si clé < clé(arbre)
      gauche(arbre) = nœud(clé)
    sinon si clé > clé(arbre)
      droite(arbre) = nœud(clé)
    sinon
      retourne
```

L'insertion (4/4)

Ajout du fils (code)

- 2 cas: arbre vide ou pas.
- on retourne un pointeur vers le nœud ajouté (ou NULL)

L'insertion (4/4)

Ajout du fils (code)

- 2 cas: arbre vide ou pas.
- on retourne un pointeur vers le nœud ajouté (ou NULL)

```
tree_t add_key(tree_t *tree, key_t key) {
    node_t *new_node = calloc(1, sizeof(*new_node));
    new_node->key = key;
    if (NULL == *tree) {
        *tree = new_node;
    } else {
        tree_t subtree = position(*tree, key);
        if (key == subtree->key) {
            return NULL;
        } else {
            if (key > subtree->key) {
                subtree->right = new_node;
            } else {
                subtree->left = new_node;
            }
        }
    }
    return new_node;
}
```


La version PK (1/5)

```
typedef struct _node {
    int info;
    struct _node *left, *right;
} node;
typedef node *tree;
void parcours_infixe(tree arbre, int n){
    if(arbre!=NULL){
        parcours_infixe(arbre->left, n+1);
        for(int i=0; i<n; i++){
            printf("  ");
        }
        printf("%d\n", arbre->info);
        parcours_infixe(arbre->right, n+1);
    }
}
```

La version PK (2/5)

```
tree recherche(int cle, tree arbre){
    while(arbre != NULL){
        if(arbre->info == cle) return arbre;
        if(arbre->info > cle){
            arbre = arbre->left;
        }else if(arbre->info < cle){
            arbre = arbre->right;
        }
    }
    return NULL;
}
```

La version PK (3/5)

```
node* parent_insertion(int donnee, tree arbre){
    if(arbre != NULL){
        node* suivant = NULL;
        if(arbre->info > donnee){
            suivant = arbre->left;
        } else {
            suivant = arbre->right;
        }
        while(suivant != NULL && arbre->info != donnee){
            arbre = suivant;
            if(arbre->info > donnee){
                suivant = arbre->left;
            } else {
                suivant = arbre->right;
            }
        }
    }
    return arbre;
}
```

La version PK (4/5)

```
node* nouveau_noeud(int donnee){
    node* new_node = malloc(sizeof(node));
    new_node->info = donnee;
    new_node->left = NULL;
    new_node->right = NULL;
    return new_node;
}

tree insertion(int donnee, tree arbre){
    if(arbre == NULL){
        arbre = nouveau_noeud(donnee);
    } else {
        node* parent = parent_insertion(donnee, arbre);
        if(donnee > parent->info){
            parent->right = nouveau_noeud(donnee);
        } else if(donnee < parent->info) {
            parent->left = nouveau_noeud(donnee);
        }
    }
    return arbre;
}
```

La version PK (5/5)

```
int main(){
    tree arbre = NULL;

    arbre = insertion(2, arbre);
    arbre = insertion(1, arbre);
    arbre = insertion(8, arbre);
    arbre = insertion(10, arbre);
    arbre = insertion(5, arbre);

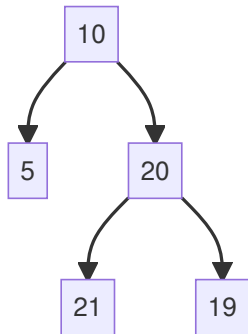
    parcours_infixe(arbre, 0);
}
```

La suppression de clé

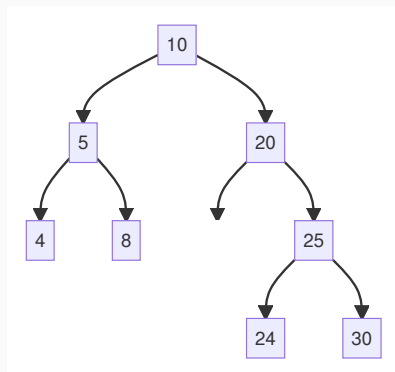
Cas simples:

- le nœud est absent,
- le nœud est une feuille
- le nœuds a un seul fils.

Une feuille (le 19 p.ex.).



Un seul fils (le 20 p.ex.).



Dans tous les cas

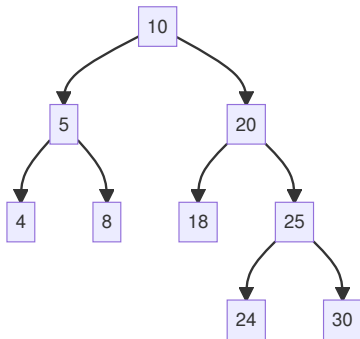
- Chercher le nœud à supprimer: utiliser `position()`.

La suppression de clé

Cas compliqué

- Le nœud à supprimer a (au moins) deux descendants (10).

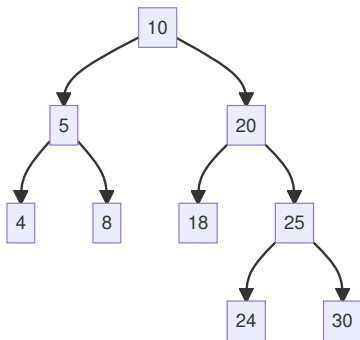
- Si on enlève 10 il se passe quoi?



La suppression de clé

Cas compliqué

- Le nœud à supprimer a (au moins) deux descendants (10).

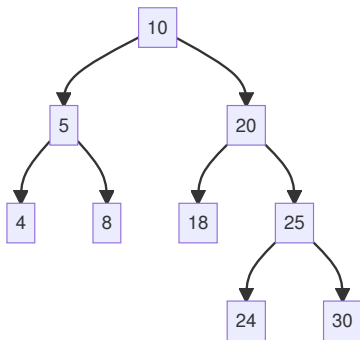


- Si on enlève 10 il se passe quoi?
- On peut pas juste enlever 10 et recoller...
- Proposez une solution bon sang!

La suppression de clé

Cas compliqué

- Le nœud à supprimer a (au moins) deux descendants (10).



- Si on enlève 10 il se passe quoi?
- On peut pas juste enlever 10 et recoller...
- Proposez une solution bon sang!

Solution

- Échange de la valeur à droite dans le sous-arbre de gauche ou ...
- de la valeur de gauche dans le sous-arbre de droite!
- Puis, on retire le nœud.

Le pseudo-code de la suppression

Pour une feuille ou absent (ensemble)

```
arbre suppression(arbre, clé)
    sous_arbre = position(arbre, clé)
    si est_vide(sous_arbre) ou clé(sous_arbre) != clé
        retourne vide
    sinon
        si est_feuille(sous_arbre) et clé(sous_arbre) == clé
            nouvelle_feuille = parent(arbre, sous_arbre)
            si est_vide(nouvelle_feuille)
                arbre = vide
            sinon
                si gauche(nouvelle_feuille) == sous_arbre
                    gauche(nouvelle_feuille) = vide
                sinon
                    droite(nouvelle_feuille) = vide
        retourne sous_arbre
```

Il nous manque le code pour le parent

Pseudo-code pour trouver le parent (5min -> matrix)

Il nous manque le code pour le parent

Pseudo-code pour trouver le parent (5min -> matrix)

```
arbre parent(arbre, sous_arbre)
  si est_non_vide(arbre)
    actuel = arbre
    parent = actuel
    clé = clé(sous_arbre)
    faire
      si (clé != clé(actuel))
        parent = actuel
        si clé < clé(actuel)
          actuel = gauche(actuel)
        sinon
          actuel = droite(actuel)
      sinon
        retour parent
    tant_que (actuel != sous_arbre)
  retourne vide
```

Le pseudo-code de la suppression

Pour un seul enfant (5min -> matrix)

Le pseudo-code de la suppression

Pour un seul enfant (5min -> matrix)

```
arbre suppression(arbre, clé)
  sous_arbre = position(arbre, clé)
  si est_vide(gauche(sous_arbre)) ou est_vide(droite(sous_arbre))
    parent = parent(arbre, sous_arbre)
    si est_vide(gauche(sous_arbre))
      si droite(parent) == sous_arbre
        droite(parent) = droite(sous_arbre)
      sinon
        gauche(parent) = droite(sous_arbre)
    sinon
      si droite(parent) == sous_arbre ou est_
        droite(parent) = gauche(sous_arbre)
      sinon
        gauche(parent) = gauche(sous_arbre)
  retourne sous_arbre
```

Le pseudo-code de la suppression

Pour au moins deux enfants (ensemble)

```
arbre suppression(arbre, clé)
    sous_arbre = position(arbre, clé) # on vérifie pas que c'est bien la clé
    si est_non_vide(gauche(sous_arbre)) et est_non_vide(droite(sous_arbre))
        max_gauche = position(gauche(sous_arbre), clé)
        échange(clé(max_gauche), clé(sous_arbre))
        suppression(gauche(sous_arbre), clé)
```

Exercices (poster sur matrix)

1. Écrire le pseudo-code de l'insertion purement en récursif.

Exercices (poster sur matrix)

1. Écrire le pseudo-code de l'insertion purement en récursif.

```
arbre insertion(arbre, clé)
```

```
    si est_vide(arbre)
```

```
        retourne nœud(clé)
```

```
    si (clé < arbre->clé)
```

```
        gauche(arbre) = insert(gauche(arbre), clé)
```

```
    sinon
```

```
        droite(arbre) = insert(droite(arbre), clé)
```

```
    retourne arbre
```

Exercices (poster sur matrix)

2. Écrire le pseudo-code de la recherche purement en récursif.

Exercices (poster sur matrix)

2. Écrire le pseudo-code de la recherche purement en récursif.

```
bool recherche(arbre, clé)
  si est_vide(arbre)
    retourne faux // pas trouvée
  si clé(arbre) == clé
    retourne vrai // trouvée
  si clé < clé(arbre)
    retourne recherche(gauche(arbre), clé)
  sinon
    retourne recherche(droite(arbre), clé)
```

Exercices (à la maison)

3. Écrire une fonction qui insère des mots dans un arbre et ensuite affiche l'arbre.

Trier un tableau à l'aide d'un arbre binaire

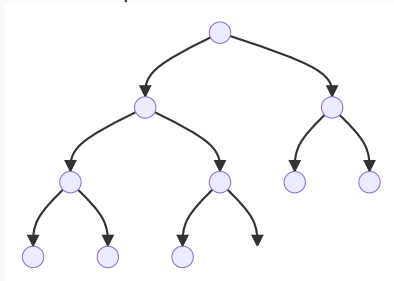
- Tableau représenté comme un arbre binaire.
- Aide à comprendre “comment” trier, mais on ne construit jamais l'arbre.
- Complexité $O(N \log_2 N)$ en moyenne et grande stabilité (pas de cas dégénérés).

Lien entre arbre et tableau

- La racine de l'arbre est le premier élément du tableau.
- Les deux fils d'un nœud d'indice i , ont pour indices $2i + 1$ et $2i + 2$:
 - Les fils du nœud $i = 0$, sont à $2 \cdot 0 + 1 = 1$ et $2 \cdot 0 + 2 = 2$.
 - Les fils du nœud $i = 1$, sont à $2 \cdot 1 + 1 = 3$ et $2 \cdot 1 + 2 = 4$.
 - Les fils du nœud $i = 2$, sont à $2 \cdot 2 + 1 = 5$ et $2 \cdot 2 + 2 = 6$.
 - Les fils du nœud $i = 3$, sont à $2 \cdot 3 + 1 = 7$ et $2 \cdot 3 + 2 = 8$.
- Un élément d'indice i a pour parent l'élément $(i - 1)/2$ (division entière):
 - Le parent du nœud $i = 8$ est $(8 - 1)/2 = 3$.
 - Le parent du nœud $i = 7$ est $(7 - 1)/2 = 3$.

Visuellement

- Où vont les indices correspondant du tableau?



- Les flèche de gauche à droite, parent -> enfants.
- Les flèche de droite à gauche, enfants -> parent.

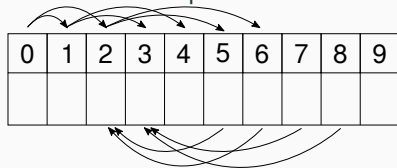


Figure 1: Dualité tableau arbre binaire.

Propriétés:

1. les feuilles sont toutes sur l'avant dernier ou dernier niveau.
2. les feuilles de profondeur maximale sont "tassée" à gauche.

Le tas (ou heap)

Définition

- Un arbre est un tas, si la valeur de chacun de ses descendants est inférieure ou égale à sa propre valeur.

Exemples (ou pas)

16 8 14 6 2 10 12 4 5 # Tas

16 14 8 6 2 10 12 4 5 # Non-tas, $10 > 8$ et $12 > 8$

Exercices (ou pas)

19 18 12 12 17 1 13 4 5 # Tas ou pas tas?

19 18 16 12 17 1 12 4 5 # Tas ou pas tas?

Le tas (ou heap)

Définition

- Un arbre est un tas, si la valeur de chacun de ses descendants est inférieure ou égale à sa propre valeur.

Exemples (ou pas)

16 8 14 6 2 10 12 4 5 # Tas

16 14 8 6 2 10 12 4 5 # Non-tas, $10 > 8$ et $12 > 8$

Exercices (ou pas)

19 18 12 12 17 1 13 4 5 # Tas ou pas tas?

19 18 16 12 17 1 12 4 5 # Tas ou pas tas?

19 18 12 12 17 1 13 4 5 # Pas tas! $13 > 12$

19 18 16 12 17 1 12 4 5 # Tas!

Exemple de tri par tas (1/N)

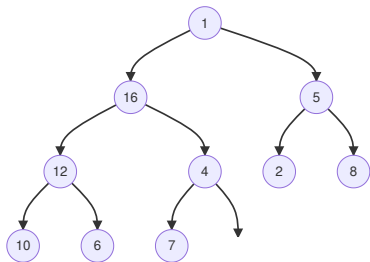
| 1 | 16 | 5 | 12 | 4 | 2 | 8 | 10 | 6 | 7 |

- Quel est l'arbre que cela représente?

Exemple de tri par tas (1/N)

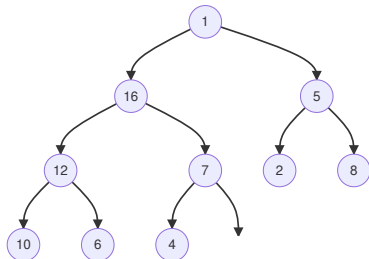
| 1 | 16 | 5 | 12 | 4 | 2 | 8 | 10 | 6 | 7 |

- Quel est l'arbre que cela représente?



But: Transformer l'arbre en tas.

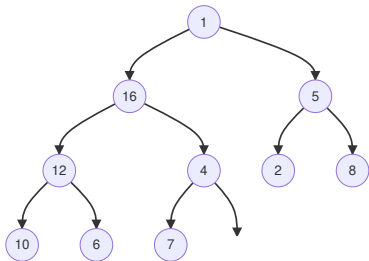
- On commence à l'indice $N/2 = 5$: 4.
- $7 > 4$ (enfant > parent).
- intervertir 4 et 7.



Exemple de tri par tas (1/N)

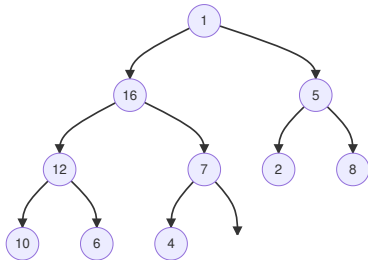
| 1 | 16 | 5 | 12 | 4 | 2 | 8 | 10 | 6 | 7 |

- Quel est l'arbre que cela représente?



But: Transformer l'arbre en tas.

- On commence à l'indice $N/2 = 5$: 4.
- $7 > 4$ (enfant > parent).
- intervertir 4 et 7.



*

*

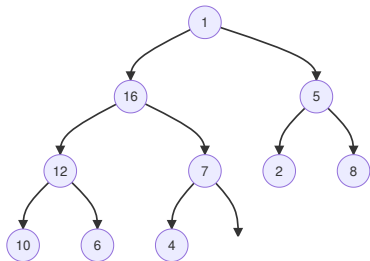
| 1 | 16 | 5 | 12 | 7 | 2 | 8 | 10 | 6 | 4 |

Exemple de tri par tas (2/N)

| 1 | 16 | 5 | 12 | 7 | 2 | 8 | 10 | 6 | 4 |

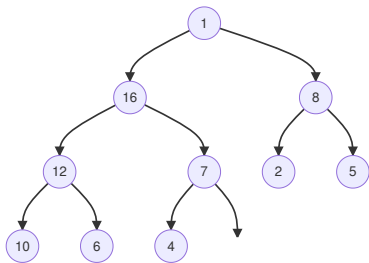
But: Transformer l'arbre en tas.

- On continue à l'indice $N/2 - 1 = 4$: 12.
- Déjà un tas, rien à faire.



But: Transformer l'arbre en tas.

- On continue à l'indice $N/2 - 2 = 3$: 5.
- $5 < 8$, échanger 8 et 5 (aka $\max(2, 5, 8)$)

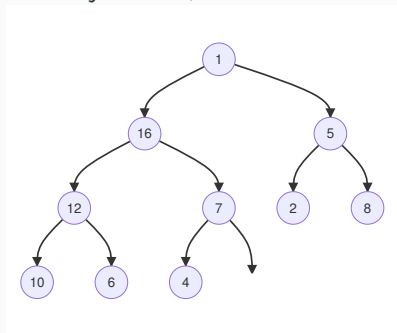


Exemple de tri par tas (2/N)

| 1 | 16 | 5 | 12 | 7 | 2 | 8 | 10 | 6 | 4 |

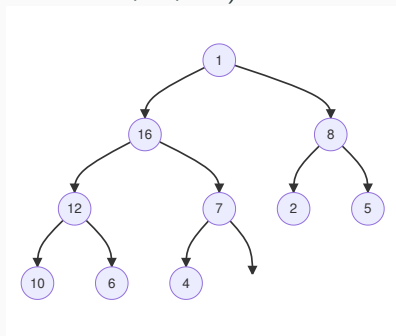
But: Transformer l'arbre en tas.

- On continue à l'indice $N/2 - 1 = 4$: 12.
- Déjà un tas, rien à faire.



But: Transformer l'arbre en tas.

- On continue à l'indice $N/2 - 2 = 3$: 5.
- $5 < 8$, échanger 8 et 5 (aka $\max(2, 5, 8)$)



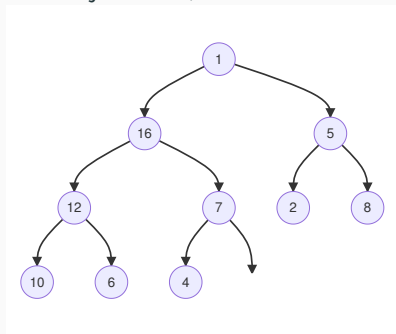
| 1 | 16 | 8 | 12 | 7 | 2 | 5 | 10 | 6 | 4 |

Exemple de tri par tas (3/N)

| 1 | 16 | 5 | 12 | 7 | 2 | 8 | 10 | 6 | 4 |

But: Transformer l'arbre en tas.

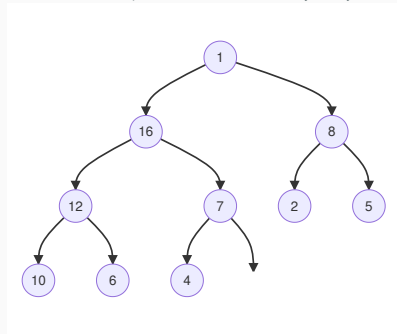
- Indice $N/2 - 1 = 4$: 12.
- Déjà un tas, rien à faire.



*

But: Transformer l'arbre en tas.

- Indice $N/2 - 2 = 3$: 5.
- $5 < 8$, $5 \Leftrightarrow \max(2, 5, 8)$



*

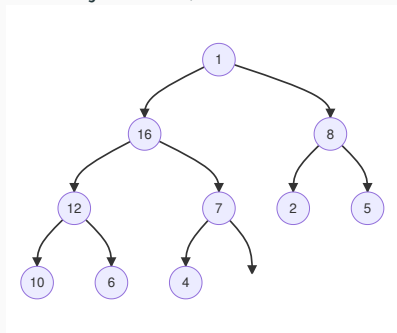
| 1 | 16 | 8 | 12 | 7 | 2 | 5 | 10 | 6 | 4 |

Exemple de tri par tas (4/N)

| 1 | 16 | 8 | 12 | 7 | 2 | 5 | 10 | 6 | 4 |

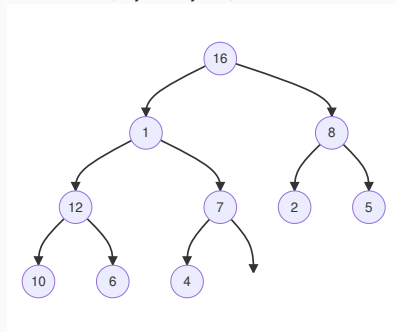
But: Transformer l'arbre en tas.

- Indice $N/2 - 3 = 1$: 16.
- Déjà un tas, rien à faire.



But: Transformer l'arbre en tas.

- Indice $N/2 - 4 = 1$: 1.
- $1 < 16$ && $1 < 8$, $1 \Leftarrow \Rightarrow$
 $\max(1, 16, 8)$



* *

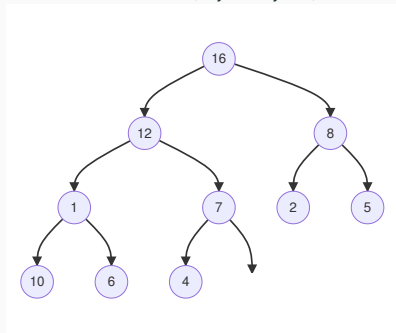
| 16 | 1 | 8 | 12 | 7 | 2 | 5 | 10 | 6 | 4 |

Exemple de tri par tas (5/N)

| 16 | 1 | 8 | 12 | 7 | 2 | 5 | 10 | 6 | 4 |

But: Transformer l'arbre en tas.

- Recommencer avec 1.
- $1 \Leftrightarrow \max(1, 12, 7)$.

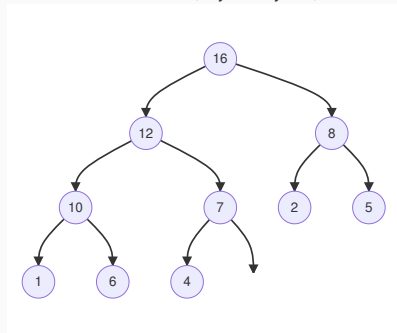


* *

| 16 | 12 | 8 | 10 | 7 | 2 | 5 | 1 | 6 | 4 |

But: Transformer l'arbre en tas.

- Recommencer avec 1.
- $1 \Leftrightarrow \max(1, 10, 6)$.



*

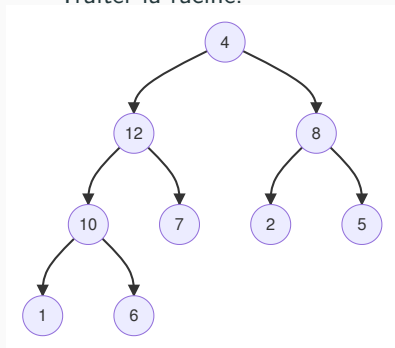
- L'arbre est un tas.

Exemple de tri par tas (6/N)

| 16 | 12 | 8 | 10 | 7 | 2 | 5 | 1 | 6 | 4 |

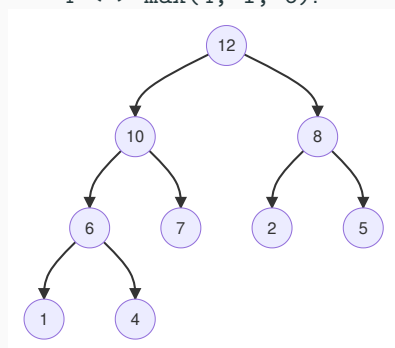
But: Trier les tas.

- Échanger la racine, 16 (max de l'arbre) avec 4.
- Traiter la racine.



But: Trier les tas.

- $4 \Leftrightarrow \max(4, 12, 8)$.
- $4 \Leftrightarrow \max(4, 10, 7)$.
- $4 \Leftrightarrow \max(4, 1, 6)$.



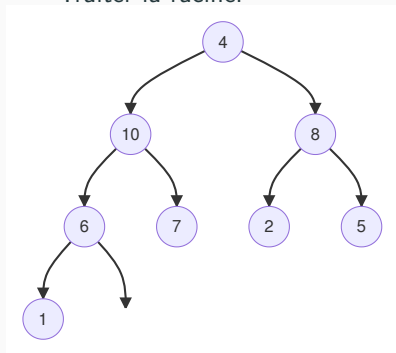
| 12 | 10 | 8 | 6 | 7 | 2 | 5 | 1 | 4 | | 16

Exemple de tri par tas (7/N)

| 12 | 10 | 8 | 6 | 7 | 2 | 5 | 1 | 4 || 16

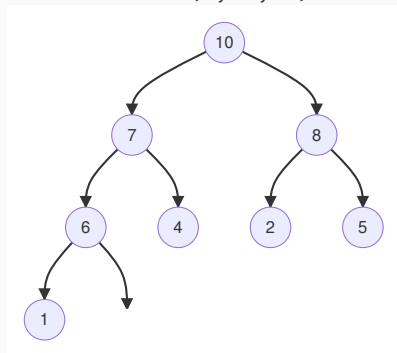
But: Trier les tas.

- Échanger la racine, 12 (max de l'arbre) avec 4.
- Traiter la racine.



But: Trier les tas.

- $4 \Leftrightarrow \max(4, 10, 8)$.
- $4 \Leftrightarrow \max(4, 6, 7)$.



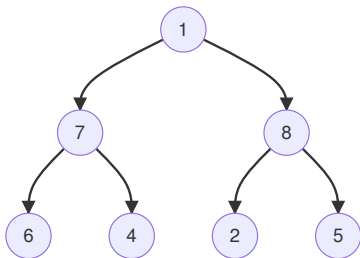
| 10 | 7 | 8 | 6 | 4 | 2 | 5 | 1 || 12 | 16

Exemple de tri par tas (8/N)

| 10 | 7 | 8 | 6 | 4 | 2 | 5 | 1 || 12 | 16

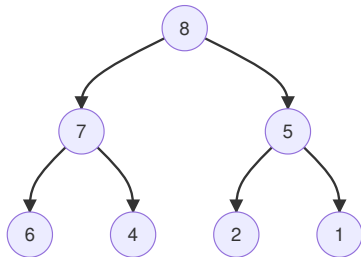
But: Trier les tas.

- Échanger la racine, 10 (max de l'arbre) avec 1.
- Traiter la racine.



But: Trier les tas.

- $1 \leq \max(1, 7, 8)$.
- $5 \leq \max(1, 2, 5)$.



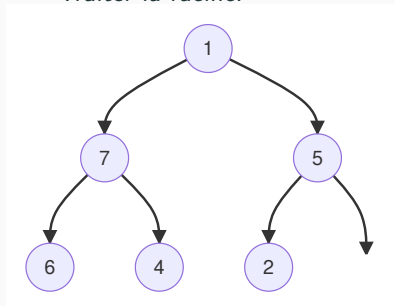
| 8 | 7 | 5 | 6 | 4 | 2 | 1 || 10 | 12 | 16

Exemple de tri par tas (9/N)

| 8 | 7 | 5 | 6 | 4 | 2 | 1 || 10 | 12 | 16

But: Trier les tas.

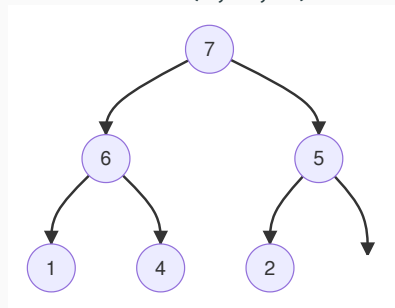
- Échanger la racine, 8 (max de l'arbre) avec 1.
- Traiter la racine.



| 7 | 6 | 5 | 1 | 4 | 2 || 8 | 10 | 12 | 16

But: Trier les tas.

- $1 \Leftrightarrow \max(1, 7, 5)$.
- $1 \Leftrightarrow \max(1, 6, 4)$.

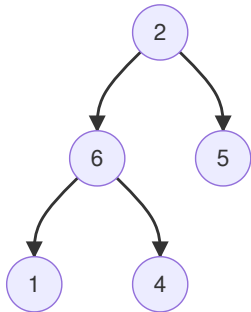


Exemple de tri par tas (10/N)

| 7 | 6 | 5 | 1 | 4 | 2 || 8 | 10 | 12 | 16

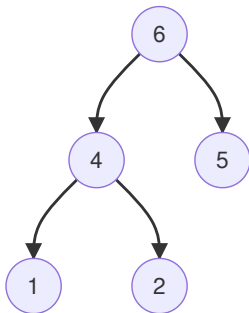
But: Trier les tas.

- Échanger la racine, 7 (max de l'arbre) avec 2.
- Traiter la racine.



But: Trier les tas.

- $2 \Leftrightarrow \max(2, 6, 5)$.
- $2 \Leftrightarrow \max(2, 1, 4)$.

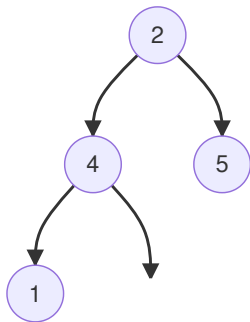


Exemple de tri par tas (11/N)

| 6 | 4 | 5 | 1 | 2 || 8 | 10 | 12 | 16

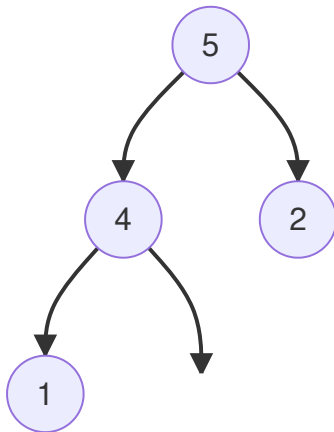
But: Trier les tas.

- Échanger la racine, 6 (max de l'arbre) avec 2.
- Traiter la racine.



But: Trier les tas.

- $2 \Leftrightarrow \max(2, 4, 5)$.
- $2 \Leftrightarrow \max(2, 1, 4)$.

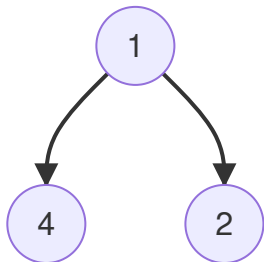


Exemple de tri par tas (12/N)

| 5 | 4 | 2 | 1 || 6 | 8 | 10 | 12 | 16

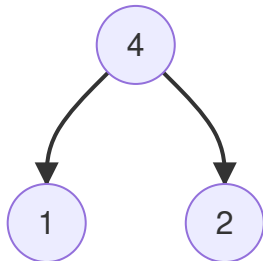
But: Trier les tas.

- Échanger la racine, 5 (max de l'arbre) avec 1.
- Traiter la racine.



But: Trier les tas.

- $1 \Leftrightarrow \max(1, 4, 2)$.



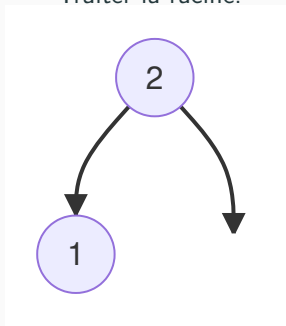
| 4 | 1 | 2 || 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16

Exemple de tri par tas (13/N)

| 4 | 1 | 2 | | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16

But: Trier les tas.

- Échanger la racine, 4 (max de l'arbre) avec 2.
- Traiter la racine.



| 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16

But: Trier les tas. Plus rien à trier

- On fait les 2 dernières étapes en vitesse.
- Échange 2 avec 1.
- Il reste que 1. GGWP!

Exercice (10min)

- Trier par tas le tableau

| 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16

- Mettez autant de détails que possible.
- Que constatez-vous?
- Postez le résultat sur matrix.