

Arbres AVL et arbres quaternaires

Algorithmique et structures de données, 2024-2025

P. Albuquerque (B410) et O. Malaspinas (A401), ISC, HEPIA
2025-03-28

En partie inspirés des supports de cours de P. Albuquerque

Rappel: Algorithme d'insertion

- Insérer le noeud comme d'habitude.
- Mettre à jour les facteurs d'équilibre jusqu'à la racine (ou au premier noeud déséquilibré).
- Rééquilibrer le noeud si nécessaire.

Rappel: les cas de déséquilibre

Cas 1a

- u , v , w même hauteur.
- déséquilibre en B après insertion dans u

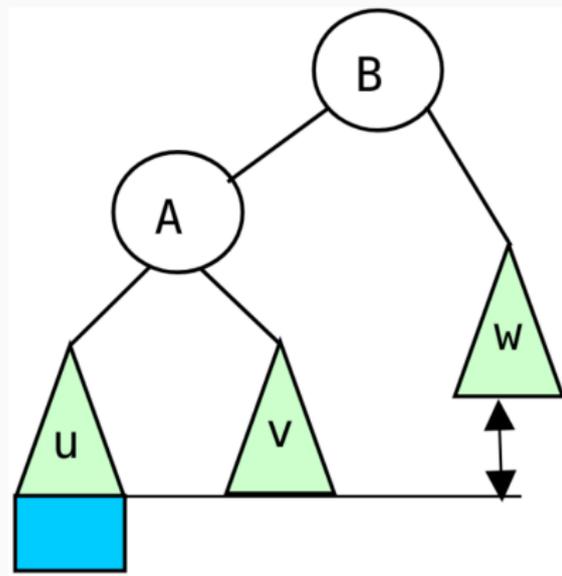


Figure 1: Après insertion

Cas 1a

- Comment rééquilibrer?

Rappel: les cas de déséquilibre

Cas 1a

- u, v, w même hauteur.
- déséquilibre en B après insertion dans u

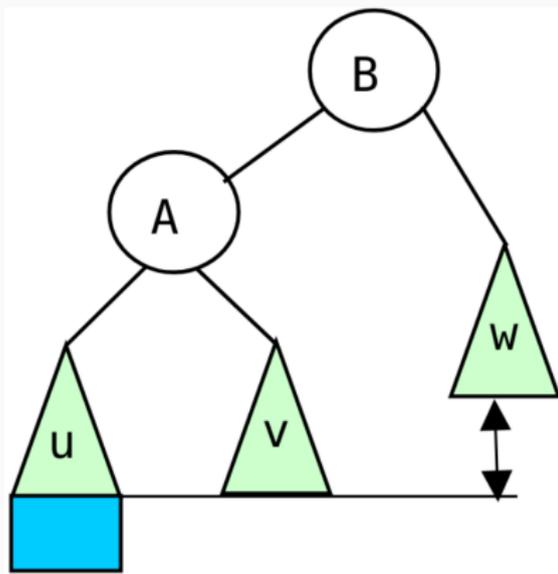


Figure 1: Après insertion

Cas 1a

- Comment rééquilibrer?
- ramène u, v, w à la même hauteur.
- v à droite de A (gauche de B)

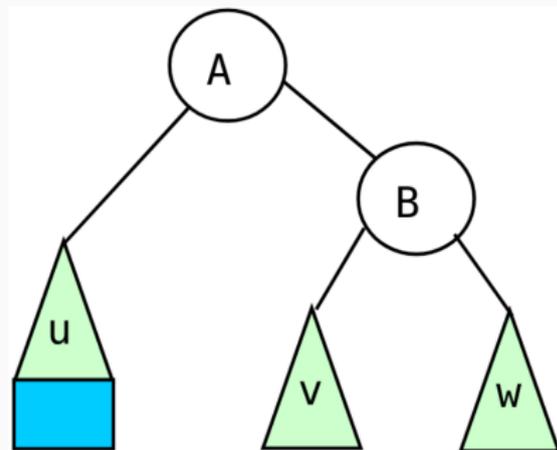
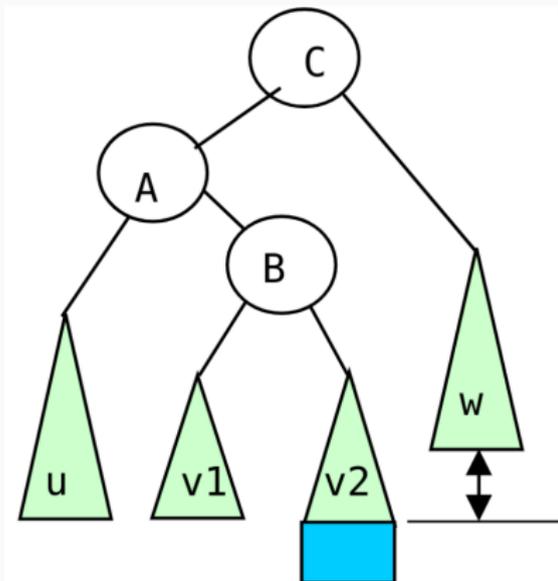


Figure 2: Après équilibrage

Rappel: Les cas de déséquilibre

Cas 2a

- $h(v1)=h(v2)$, $h(u)=h(w)$.
- déséquilibre en C après insertion dans v2



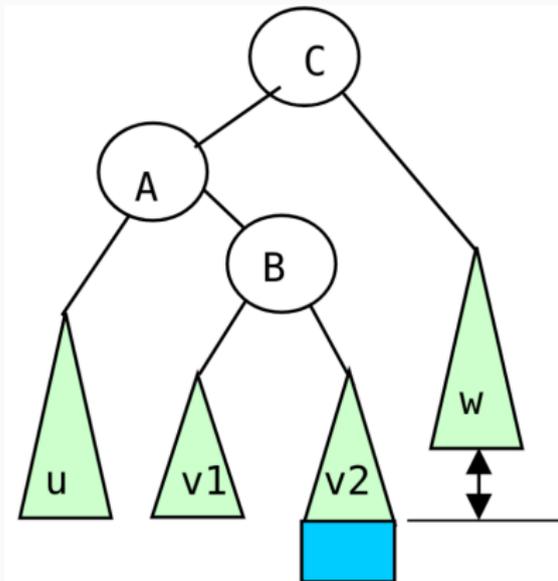
Cas 2a

- Comment rééquilibrer?

Rappel: Les cas de déséquilibre

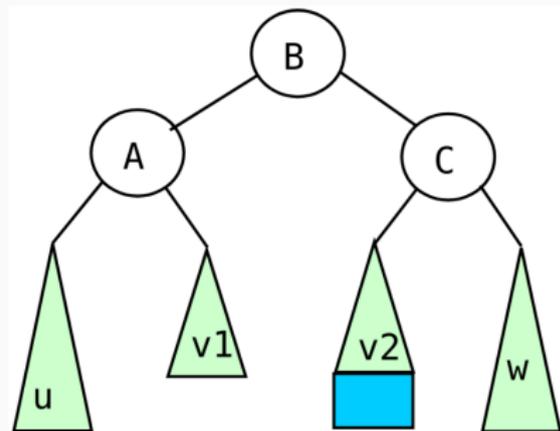
Cas 2a

- $h(v1)=h(v2)$, $h(u)=h(w)$.
- déséquilibre en C après insertion dans $v2$



Cas 2a

- Comment rééquilibrer?
- ramène u, v2, w à la même hauteur (v1 pas tout à fait).
- v2 à droite de B (gauche de C)
- B à droite de A (gauche de C)
- v1 à droite de A (gauche de B)



Rappel: Rééquilibrage

Rotation simple

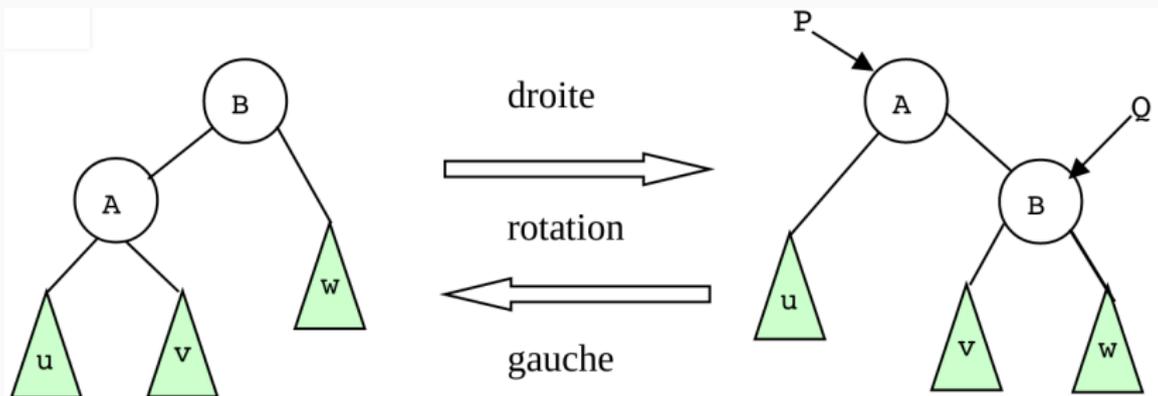
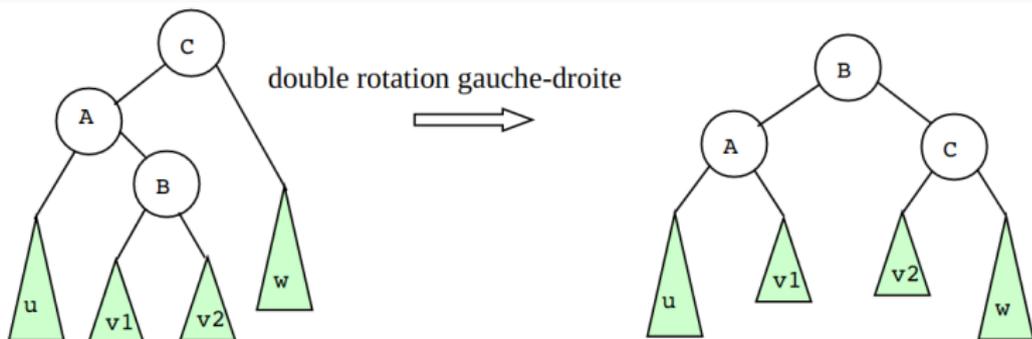


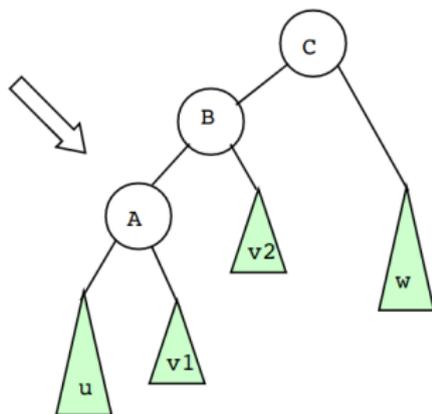
Figure 5: On verra un peu après les rotations.

Rappel: La rotation gauche-droite

Le cas 2a/b



rotation gauche en A



rotation droite en C

Un petit exercice

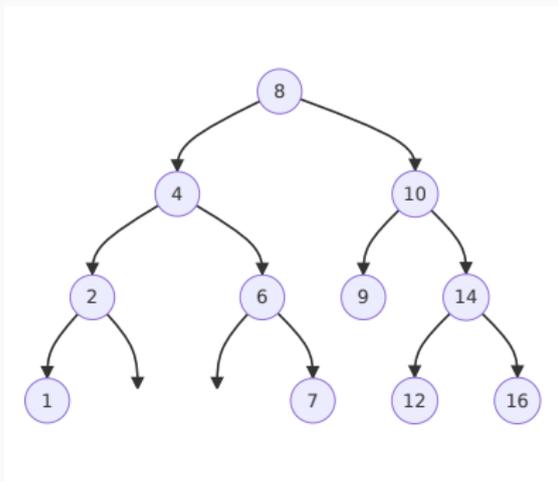
- Insérer les nœuds suivants dans un arbre AVL

25 | 60 | 35 | 10 | 5 | 20 | 65 | 45 | 70 | 40
| 50 | 55 | 30 | 15

La suppression dans un arbre AVL

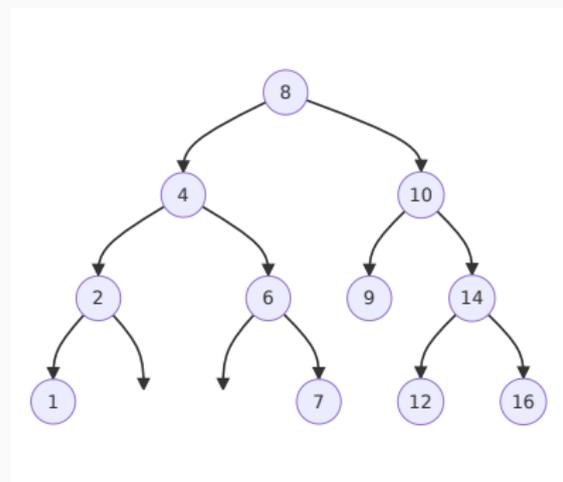
Suppression dans un arbre AVL

Algorithme par problème:
supprimer 10

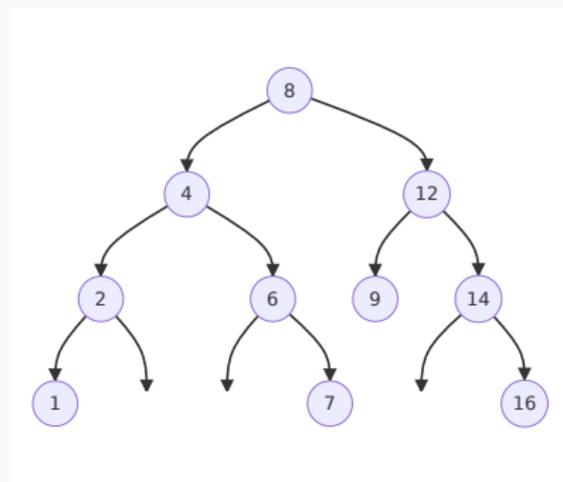


Suppression dans un arbre AVL

Algorithme par problème:
supprimer 10

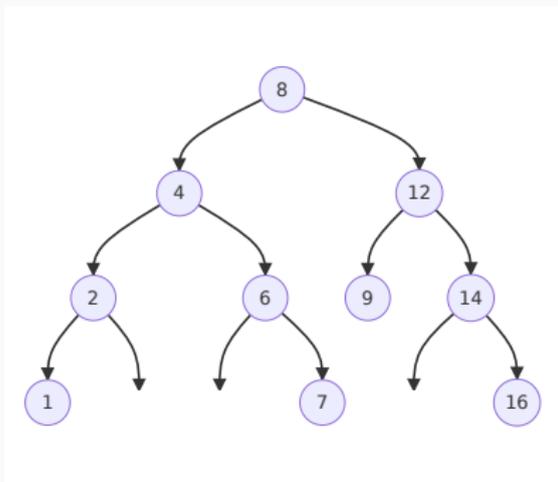


Algorithme par problème:
supprimer 10



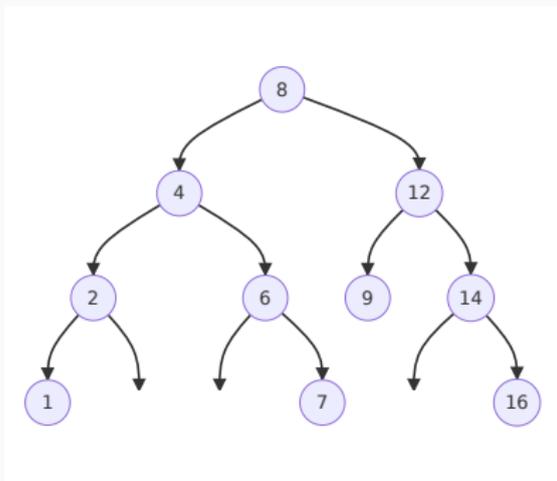
Suppression dans un arbre AVL

Algorithme par problème:
supprimer 8

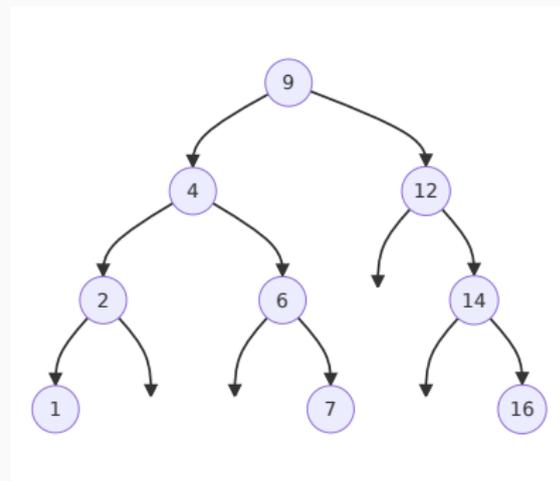


Suppression dans un arbre AVL

Algorithme par problème:
supprimer 8

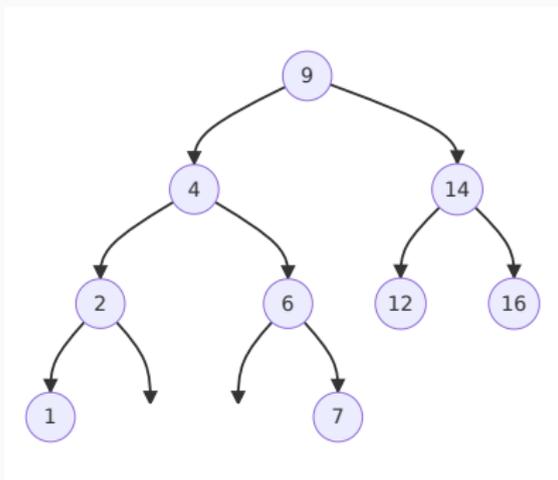


Algorithme par problème:
rotation de 12



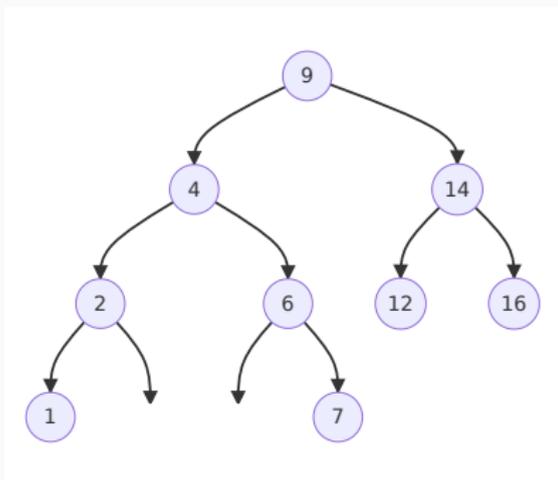
Suppression dans un arbre AVL

Algorithme par problème:
rotation de 12



Suppression dans un arbre AVL

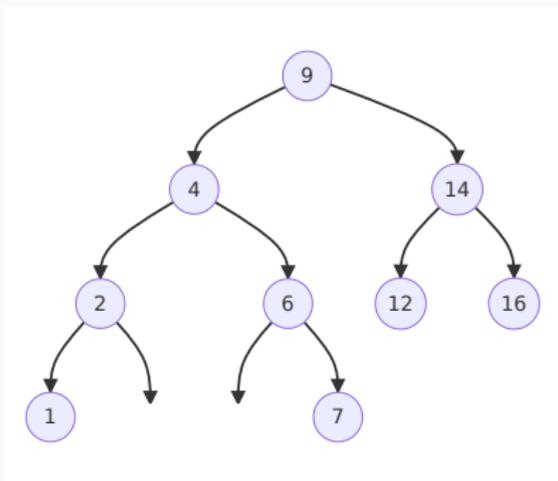
Algorithme par problème: rotation de 12



1. On supprime comme d'habitude.
2. On rééquilibre si besoin à l'endroit de la suppression.
 - Facile non?

Suppression dans un arbre AVL

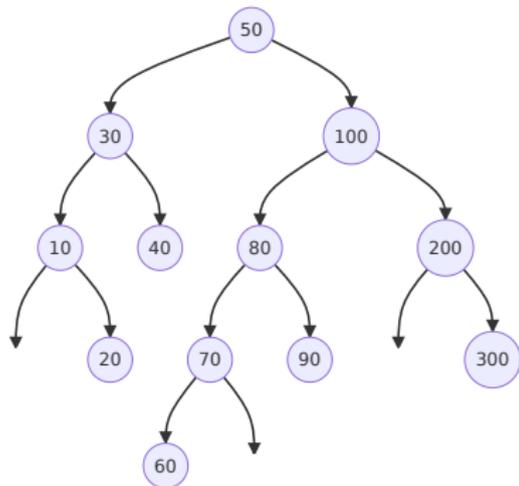
Algorithme par problème: rotation de 12



1. On supprime comme d'habitude.
2. On rééquilibre si besoin à l'endroit de la suppression.
 - Facile non?
 - Plus dur...

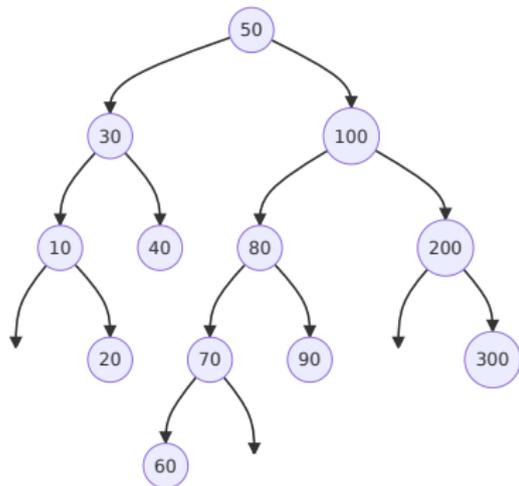
Suppression dans un arbre AVL 2.0

Algorithme par problème:
suppression de 30

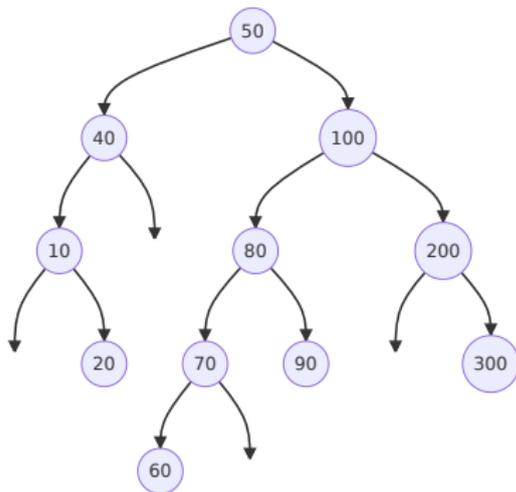


Suppression dans un arbre AVL 2.0

Algorithme par problème:
suppression de 30

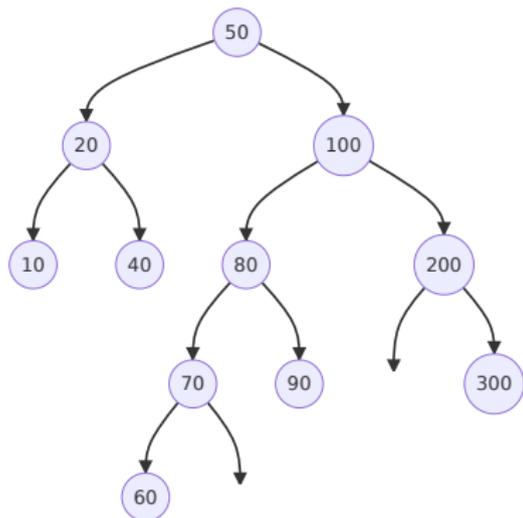


Algorithme par problème:
rotation GD autour de 40



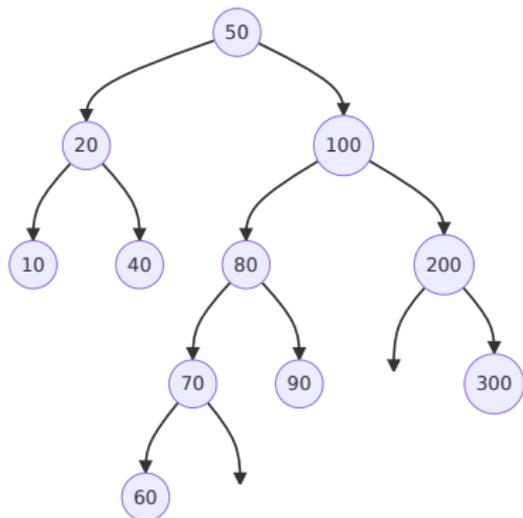
Suppression dans un arbre AVL 2.0

Arg! 50 est déséquilibré!

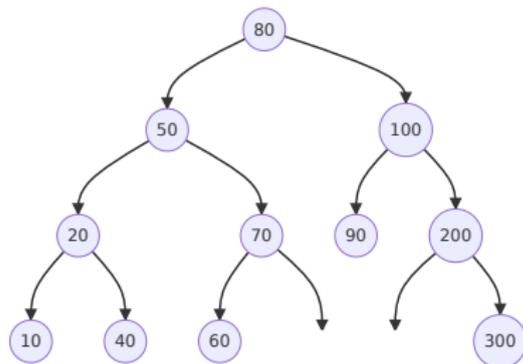


Suppression dans un arbre AVL 2.0

Arg! 50 est déséquilibré!



Algorithme par problème:
rotation DG autour de 50



Résumé de la suppression

1. On supprime comme pour un arbre binaire de recherche.
2. Si un nœud est déséquilibré, on le rééquilibre.
 - Cette opération peut déséquilibrer un autre nœud sur le chemin menant au nœud supprimé.
3. On continue à rééquilibrer tant qu'il y a des nœuds à équilibrer en remontant le chemin.

Les arbres quaternaires

Les arbres quaternaires

Définition

Arbre dont chaque nœud a 4 enfants ou aucun.

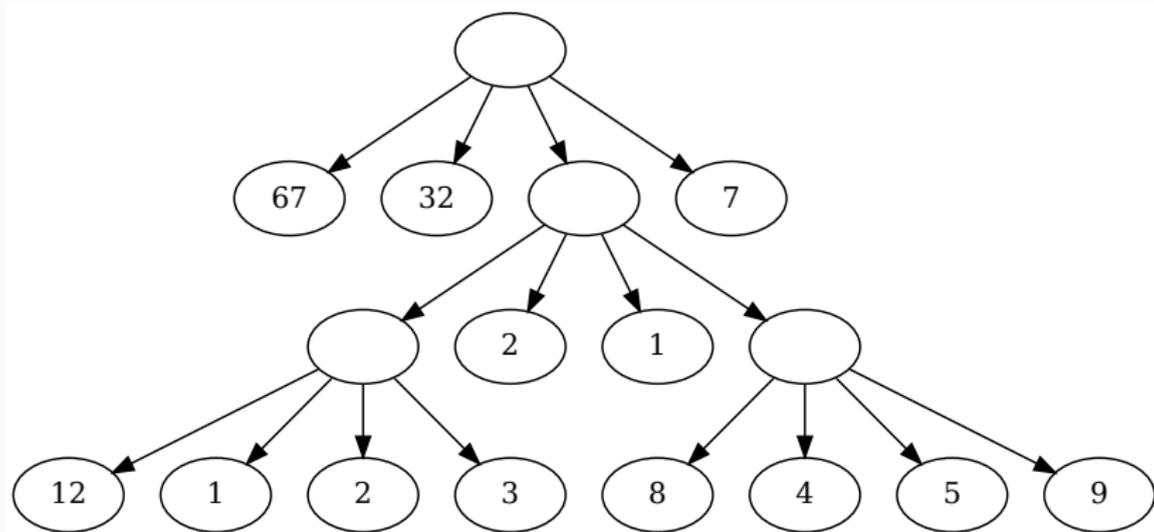


Figure 7: Un exemple d'arbre quaternaire.

Cas d'utilisation

Typiquement utilisés pour représenter des données bidimensionnelles.

Son équivalent tri-dimensionnel est l'octree (chaque nœud a 8 enfants ou aucun).

Cas d'utilisation: images

- Stockage: compression.
- Transformations: symétries, rotations, etc.

Cas d'utilisation: simulation

- Indexation spatiale.
- Détection de collisions.
- Simulation de galaxies (algorithme de Barnes-Hut).

Exemple de compression

Comment représenter l'image

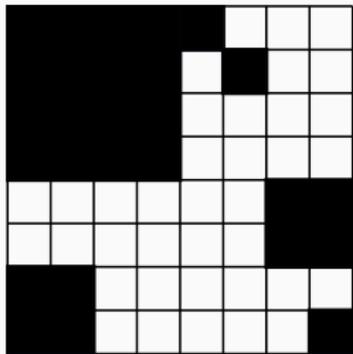


Figure 8: Image noir/blanc.

Sous la forme d'un arbre quaternaire?

Exemple de compression

Comment représenter l'image

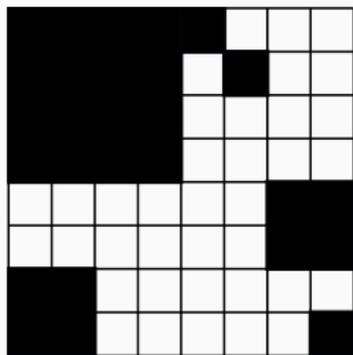


Figure 8: Image noir/blanc.

Sous la forme d'un arbre quaternaire?

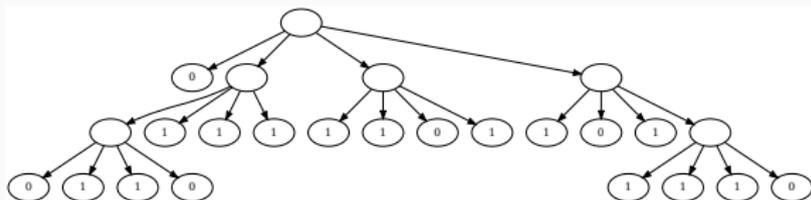


Figure 9: L'arbre quaternaire correspondant.

Économie?

Exemple de compression

Comment représenter l'image

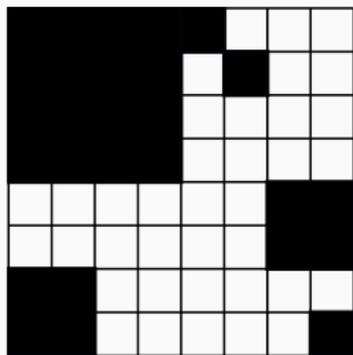


Figure 8: Image noir/blanc.

Sous la forme d'un arbre quaternaire?

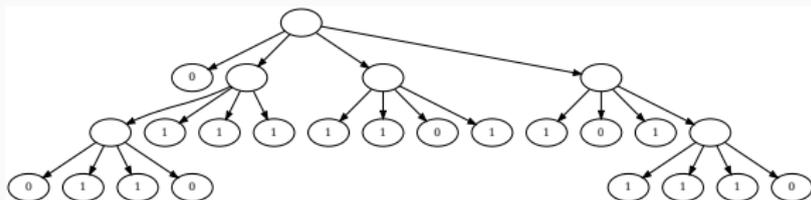


Figure 9: L'arbre quaternaire correspondant.

Économie?

Image 64 pixels, arbre 25 nœuds.

Pseudo-code?

Pseudo-code?

```
struct node
    info
    node sup_gauche, sup_droit,
        inf_gauche, inf_droit
```

En C?

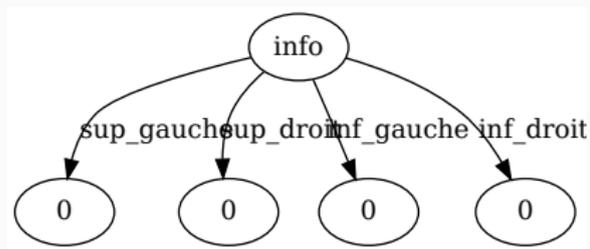


Figure 10: Un nœud d'arbre quaternaire.

Structure de données

Pseudo-code?

```
struct node
    info
    node sup_gauche, sup_droit,
        inf_gauche, inf_droit
```

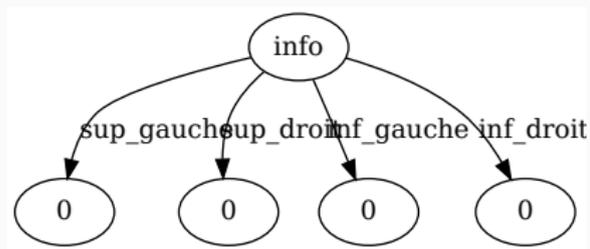


Figure 10: Un nœud d'arbre quaternaire.

En C?

```
struct _node {
    int info;
    struct _node *sup_left;
    struct _node *sup_right;
    struct _node *inf_left;
    struct _node *inf_right;
};
```

- Pourquoi le * est important?

Structure de données

Pseudo-code?

```
struct node
    info
    node sup_gauche, sup_droit,
        inf_gauche, inf_droit
```

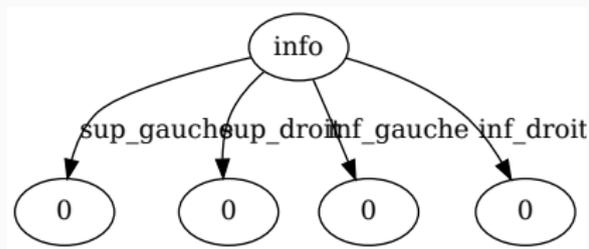


Figure 10: Un nœud d'arbre quaternaire.

En C?

```
struct _node {
    int info;
    struct _node *sup_left;
    struct _node *sup_right;
    struct _node *inf_left;
    struct _node *inf_right;
};
```

- Pourquoi le * est important?
- Type récursif => taille inconnue à la compilation.

Une fonctionnalité simple

La fonction `est_feuille`(noeud)

- Problème avec cette implémentation?

```
bool est_feuille(noeud)
    retourne
        est_vider(sup_gauche(noeud)) &&
        est_vider(sup_droit(noeud)) &&
        est_vider(inf_gauche(noeud)) &&
        est_vider(inf_droit(noeud))
```

Une fonctionnalité simple

La fonction `est_feuille`(noeud)

- Problème avec cette implémentation?

```
bool est_feuille(noeud)
    retourne
        est_vide(sup_gauche(noeud)) &&
        est_vide(sup_droit(noeud)) &&
        est_vide(inf_gauche(noeud)) &&
        est_vide(inf_droit(noeud))
```

- Inutile d'avoir 4 conditions (soit 4 enfants soit aucun!)
- Facile d'en oublier un!
- Comment changer la structure pour que ça soit moins terrible?

Une fonctionnalité simple

La fonction `est_feuille`(noeud)

- Problème avec cette implémentation?

```
bool est_feuille(noeud)
    retourne
        est_vide(sup_gauche(noeud)) &&
        est_vide(sup_droit(noeud)) &&
        est_vide(inf_gauche(noeud)) &&
        est_vide(inf_droit(noeud))
```

- Inutile d'avoir 4 conditions (soit 4 enfants soit aucun!)
- Facile d'en oublier un!
- Comment changer la structure pour que ça soit moins terrible?

```
struct node
    info
    node enfant[4]
```

En C?

Structure de données

En C?

```
typedef struct _node {  
    int info;  
    struct _node *child[4];  
} node;
```

Fonction `is_leaf(node *tree)?`

Structure de données

En C?

```
typedef struct _node {  
    int info;  
    struct _node *child[4];  
} node;
```

Fonction is_leaf(node *tree)?

```
bool is_leaf(node *tree) {  
    return (NULL == tree->child[0]); // only first matters  
}
```

Problème à résoudre

- Construire un arbre quaternaire à partir d'une image:
 - Créer l'arbre (allouer la mémoire pour tous les nœuds)
 - Remplir l'arbre avec les valeurs des pixels
- Compression de l'image:
 - Si les pixels sont les mêmes dans le quadrant on supprime le sous-arbre (sans perte)
 - Si les pixels ne dévient pas trop, on supprime le quadrant (avec perte)

Création de l'arbre

Comment créer un arbre de profondeur prof (3min)?

Création de l'arbre

Comment créer un arbre de profondeur prof (3min)?

```
arbre creer_arbre(prof)
    n = nouveau_noeud() # alloue la mémoire
    si prof > 0
        pour i = 0 à 3
            n.enfant[i] = creer_arbre(prof-1)
    retourne n
```

En C (3 min, matrix)?

Création de l'arbre

Comment créer un arbre de profondeur prof (3min)?

```
arbre creer_arbre(prof)
  n = nouveau_noeud() # alloue la mémoire
  si prof > 0
    pour i = 0 à 3
      n.enfant[i] = creer_arbre(prof-1)
  retourne n
```

En C (3 min, matrix)?

```
node *qt_create(int depth) {
  node *n = calloc(1, sizeof(node));
  if (depth > 0) {
    for (int i = 0; i < 4; ++i) {
      n->child[i] = qt_create(depth-1);
    }
  }
  return n;
}
```

Le nombre de nœuds?

Comment implémenter la fonction (pseudo-code, 5min, matrix)?

Le nombre de nœuds?

Comment implémenter la fonction (pseudo-code, 5min, matrix)?

```
entier nombre_nœuds(arbre)
  si est_feuille(arbre)
    retourne 1
  sinon
    somme = 1
    pour i de 0 à 3
      somme += nombre_nœuds(arbre.enfant[i])
    retourne somme
```

Le nombre de nœuds?

Comment implémenter la fonction en C (3min, matrix)?

Le nombre de nœuds?

Comment implémenter la fonction en C (3min, matrix)?

```
int size(node *qt) {
    if (is_leaf(qt)) {
        return 1;
    } else {
        int sum = 1;
        for (int i = 0; i < 4; ++i) {
            sum += size(qt->child[i]);
        }
        return sum;
    }
}
```

La profondeur en C?

Implémentation (5min, matrix)

La profondeur en C?

Implémentation (5min, matrix)

```
int max(int x, int y) {
    return (x >= y ? x : y);
}

int max_depth(int depths[4]) {
    int m = depths[0];
    for (int i = 1; i < 4; ++i) {
        m = max(m, depths[i]);
    }
    return m;
}

int depth(node *qt) {
    int depths[] = {0, 0, 0, 0};
    if (is_leaf(qt)) {
        return 0;
    } else {
        for (int i = 0; i < 4; ++i) {
            depths[i] = depth(qt->child[i]);
        }
        return 1 + max_depth(depths);
    }
}
```

Fonctions utiles (1/4)

Comment remplir un arbre depuis une matrice?

SG=0 | SD=1

21 | 12 | 4 | 4

9 | 7 | 4 | 4

1 | 1 | 0 | 31

1 | 1 | 3 | 27

IG=2 | ID=3

Quel arbre cela représente?

Fonctions utiles (1/4)

Comment remplir un arbre depuis une matrice?

SG=0 | SD=1

21 | 12 | 4 | 4

9 | 7 | 4 | 4

1 | 1 | 0 | 31

1 | 1 | 3 | 27

IG=2 | ID=3

Quel arbre cela représente?

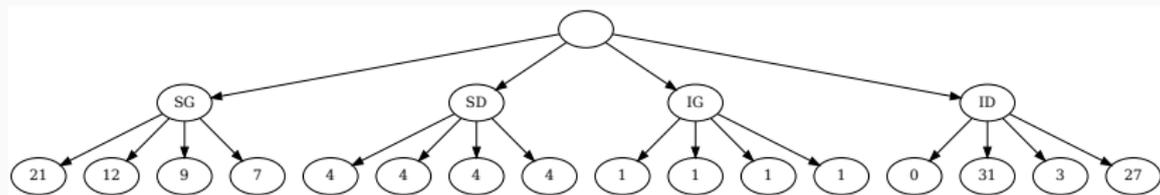


Figure 11: L'arbre correspondant

Fonctions utiles (2/4)

- On veut transférer la valeur d'une case ligne/colonne dans une feuille.
- Comment?

Soit ligne=2, colonne=3

SG=0		SD=1	
21		12	4 4
9		7	4 4

1		1	0 31
1		1	3 27
IG=2		ID=3	

Trouver un algorithme

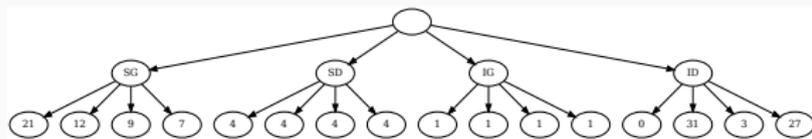


Figure 12: Déterminer un algorithme.

- Quelle feuille pour 31 (li=2, co=3)?
- Plus important: quel chemin?

Fonctions utiles (2/4)

- On veut transférer la valeur d'une case ligne/colonne dans une feuille.
- Comment?

Soit ligne=2, colonne=3

SG=0		SD=1	
21		12	4 4
9		7	4 4

1		1	0 31
1		1	3 27
IG=2		ID=3	

Trouver un algorithme

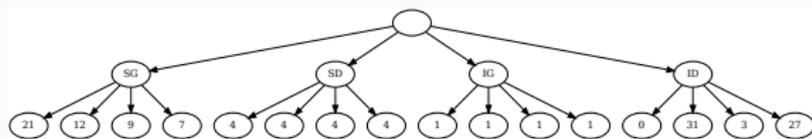


Figure 12: Déterminer un algorithme.

- Quelle feuille pour 31 (li=2, co=3)?
- Plus important: quel chemin?
- $co \rightarrow G/D, li \rightarrow S/I,$
- $2 * (li / 2) + co / 2 \rightarrow 2 * 1 + 1 = 3$
- $2 * ((li \% 2) / 1) + (co \% 2) / 1 \rightarrow 2 * 0 + 1 = 1$

Fonctions utiles (3/4)

Soit ligne=2, colonne=3

SG=0 | SD=1

21 | 12 | 4 | 4

9 | 7 | 4 | 4

1 | 1 | 0 | 31

1 | 1 | 3 | 27

IG=2 | ID=3

Trouver un algorithme (prendre plusieurs exemples, 15min, matrix)

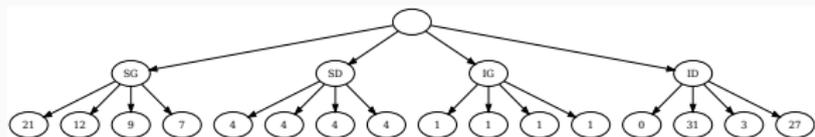


Figure 13: Déterminer un algorithme.

- Comment généraliser?

Fonctions utiles (3/4)

Soit ligne=2, colonne=3

SG=0 | SD=1

21 | 12 | 4 | 4

9 | 7 | 4 | 4

1 | 1 | 0 | 31

1 | 1 | 3 | 27

IG=2 | ID=3

Trouver un algorithme (prendre plusieurs exemples, 15min, matrix)

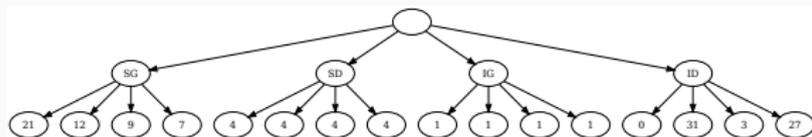


Figure 13: Déterminer un algorithme.

- Comment généraliser?

```
noeud position(li, co, arbre)
d = profondeur(arbre);
tant_que (d >= 1)
    index = 2 * ((li % 2^d) / 2^(d-1))
            (col % 2^d) / 2^(d-1)
    arbre = arbre.enfant[index]
    d -= 1
retourne arbre
```

Fonctions utiles (4/4)

Pseudo-code

```
noeud position(li, co, arbre)
  d = profondeur(arbre);
  tant_que (d >= 1)
    index = 2 * ((li % 2^d) / 2^(d-1)) +
            (col % 2^d) / 2^(d-1)
    arbre = arbre.enfant[index]
    d -= 1
  retourne arbre
```

Écrire le code C correspondant (5min, matrix)

Remplir l'arbre

A partir d'une matrice (pseudo-code, 5min, matrix)?

Remplir l'arbre

A partir d'une matrice (pseudo-code, 5min, matrix)?

```
arbre matrice_vers_arbre(matrice)
  arbre = creer_arbre(profondeur)
  pour li de 0 à nb_lignes(matrice)
    pour co de 0 à nb_colonnes(matrice)
      noeud = position(li, co, arbre)
      noeud.info = matrice[co][li]
  retourne arbre
```

Remplir l'arbre

A partir d'une matrice (pseudo-code, 5min, matrix)?

```
arbre matrice_vers_arbre(matrice)
    arbre = creer_arbre(profondeur)
    pour li de 0 à nb_lignes(matrice)
        pour co de 0 à nb_colonnes(matrice)
            noeud = position(li, co, arbre)
            noeud.info = matrice[co][li]
    retourne arbre
```

A partir d'une matrice (C, 5min, matrix)?

Remplir l'arbre

A partir d'une matrice (pseudo-code, 5min, matrix)?

```
arbre matrice_vers_arbre(matrice)
    arbre = creer_arbre(profondeur)
    pour li de 0 à nb_lignes(matrice)
        pour co de 0 à nb_colonnes(matrice)
            noeud = position(li, co, arbre)
            noeud.info = matrice[co][li]
    retourne arbre
```

A partir d'une matrice (C, 5min, matrix)?

```
node *matrix_to_qt(int nb_li, int nb_co, int matrix[nb_li][nb_co], int depth) {
    node *qt = qt_create(depth);
    for (int li = 0; li < nb_li; ++li) {
        for (int co = 0; co < nb_co; ++co) {
            node *current = position(li, co, qt);
            current->info = matrix[li][co];
        }
    }
    return qt;
}
```

Remplir la matrice

A partir de l'arbre (pseudo-code, 3min, matrix)?

Remplir la matrice

A partir de l'arbre (pseudo-code, 3min, matrix)?

```
matrice arbre_vers_matrice(arbre)
  matrice = creer_matrice(nb_lignes(arbre), nb_colonnes(arbre))
  pour li de 0 à nb_lignes(matrice)
    pour co de 0 à nb_colonnes(matrice)
      noeud = position(li, co, arbre)
      matrice[co][li] = noeud.info
  retourne matrice
```

Remplir la matrice

A partir de l'arbre (pseudo-code, 3min, matrix)?

```
matrice arbre_vers_matrice(arbre)
  matrice = creer_matrice(nb_lignes(arbre), nb_colonnes(arbre))
  pour li de 0 à nb_lignes(matrice)
    pour co de 0 à nb_colonnes(matrice)
      noeud = position(li, co, arbre)
      matrice[co][li] = noeud.info
  retourne matrice
```

A partir de l'arbre (C, 3min, matrix)?

Remplir la matrice

A partir de l'arbre (pseudo-code, 3min, matrix)?

```
matrice arbre_vers_matrice(arbre)
    matrice = creer_matrice(nb_lignes(arbre), nb_colonnes(arbre))
    pour li de 0 à nb_lignes(matrice)
        pour co de 0 à nb_colonnes(matrice)
            noeud = position(li, co, arbre)
            matrice[co][li] = noeud.info
    retourne matrice
```

A partir de l'arbre (C, 3min, matrix)?

```
void qt_to_matrix(node *qt, int nb_li, int nb_co, int matrix[nb_li][nb_co]) {
    for (int li = 0; li < nb_li; ++li) {
        for (int co = 0; co < nb_co; ++co) {
            node *current = position(li, co, qt);
            matrix[li][co] = current->info;
        }
    }
}
```