

Arbres

Algorithmique et structures de données, 2022-2023

P. Albuquerque (B410), P. Künzli et O. Malaspinas (A401), ISC, HEPIA
2023-03-10

En partie inspirés des supports de cours de P. Albuquerque

Les arbres: définition

“Un arbre est un graphe acyclique orienté possédant une unique racine, et tel que tous les nœuds sauf la racine ont un unique parent.”

Les arbres: définition

“Un arbre est un graphe acyclique orienté possédant une unique racine, et tel que tous les nœuds sauf la racine ont un unique parent.”

Santé!

Plus sérieusement

- Ensemble de **nœuds** et d'**arêtes** (graphe),
- Les arêtes relient les nœuds entre eux, mais pas n'importe comment: chaque nœud a au plus un **parent**,
- Le seul nœud sans parent est la **racine**,
- Chaque nœud a un nombre fini de **fils**,
- La hiérarchie des nœuds rend les arêtes **orientées** (parent \rightarrow fils), et empêche les **cycles** (acyclique, orienté).
- La **feuille** ou **nœud terminal** est un nœud sans enfants,
- Le **niveau** est 1 à la racine et **niveau+1** pour les fils,
- Le **degré** d'un nœud est le nombre de fils du nœud.

Les arbres: définition

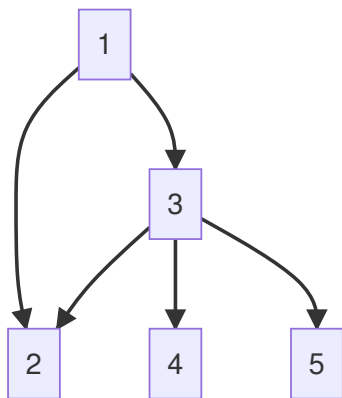
“Un arbre est un graphe acyclique orienté possédant une unique racine, et tel que tous les nœuds sauf la racine ont un unique parent.”

Santé!

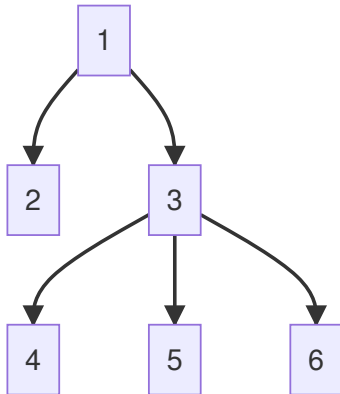
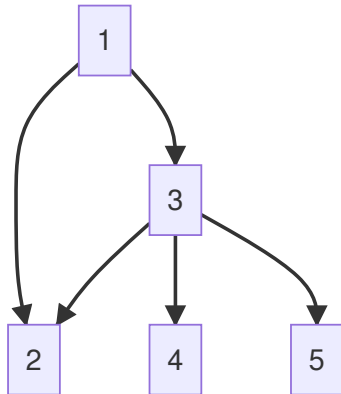
Plus sérieusement

- Ensemble de **nœuds** et d'**arêtes** (graphe),
- Les arêtes relient les nœuds entre eux, mais pas n'importe comment: chaque nœud a au plus un **parent**,
- Le seul nœud sans parent est la **racine**,
- Chaque nœud a un nombre fini de **fils**,
- La hiérarchie des nœuds rend les arêtes **orientées** (parent \rightarrow fils), et empêche les **cycles** (acyclique, orienté).
- La **feuille** ou **nœud terminal** est un nœud sans enfants,
- Le **niveau** est 1 à la racine et **niveau+1** pour les fils,
- Le **degré** d'un nœud est le nombre de fils du nœud.
- Chaque nœud est un arbre en lui même.
- La **récurtivité** sera très utile!

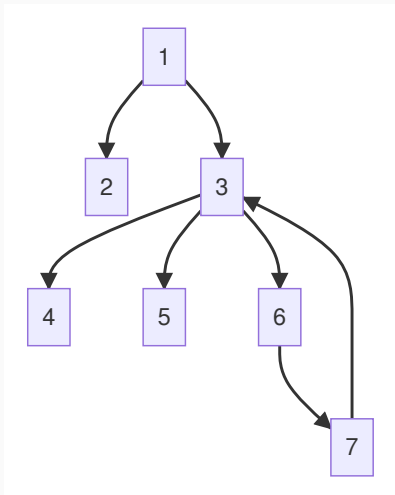
Arbre ou pas arbre?



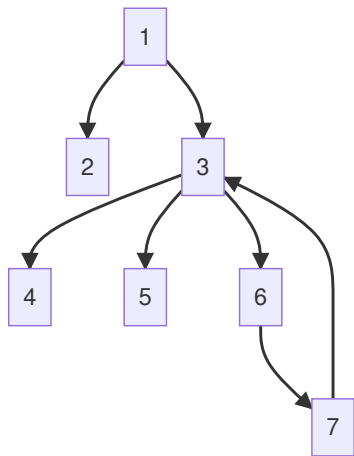
Arbre ou pas arbre?



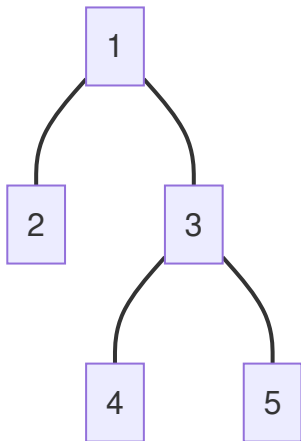
Arbre ou pas arbre?



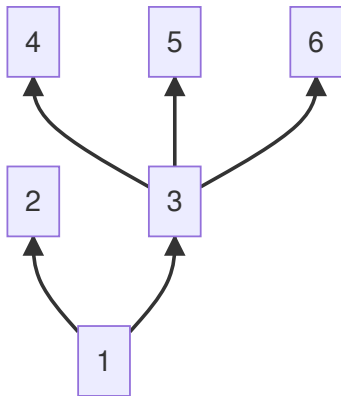
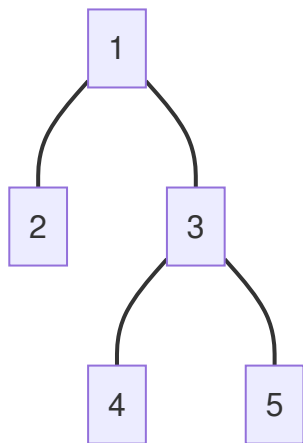
Arbre ou pas arbre?



Arbre ou pas arbre?

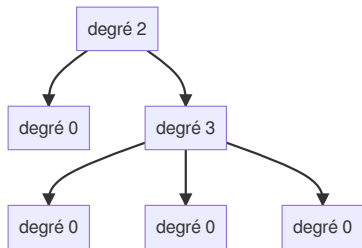


Arbre ou pas arbre?



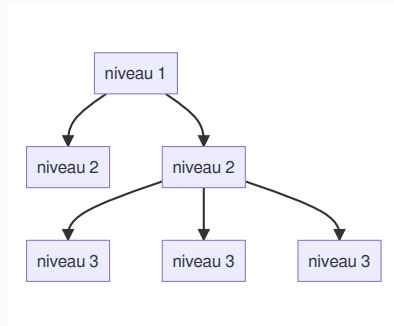
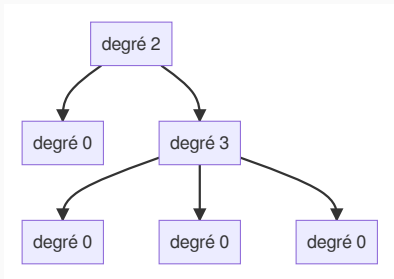
Degré et niveau

- Illustration du degré (nombre de fils) et du niveau (profondeur)



Degré et niveau

- Illustration du degré (nombre de fils) et du niveau (profondeur)



- Les nœuds de degré 0, sont des feuilles.

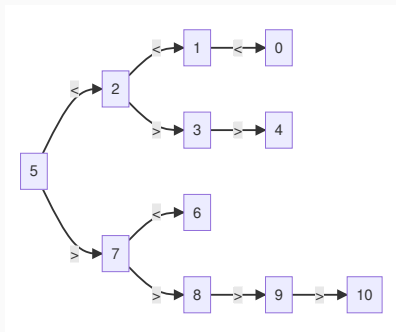
Application: recherche rapide

Pouvez vous construire un arbre pour résoudre le nombre secret?

Application: recherche rapide

Pouvez vous construire un arbre pour résoudre le nombre secret?

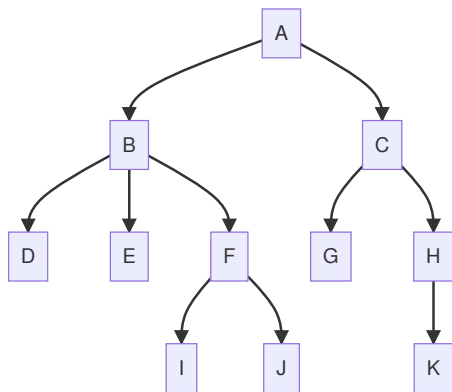
- Le nombre secret ou la recherche dichotomique (nombre entre 0 et 10).



Question: Quelle est la complexité pour trouver un nombre?

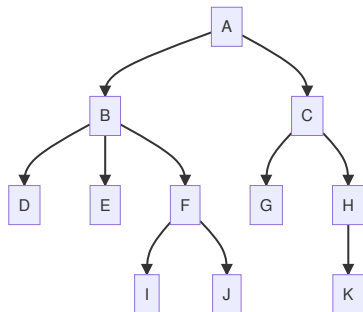
Autres représentation

- Botanique
- **Exercice:** Ajouter les degrés/niveaux et feuilles



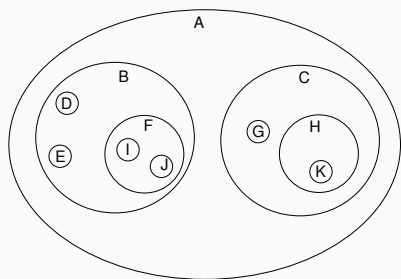
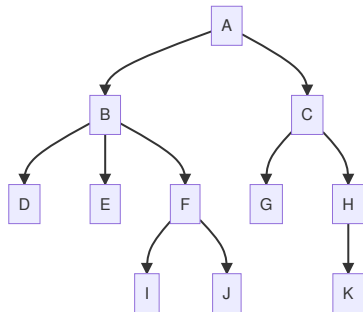
Autres représentation

- Ensembliste



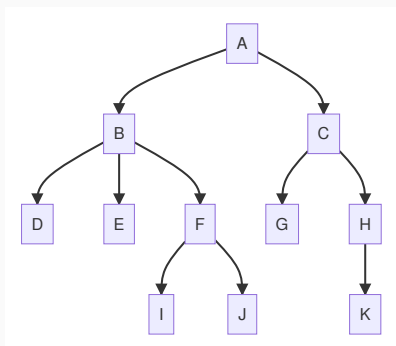
Autres représentation

- Ensembliste



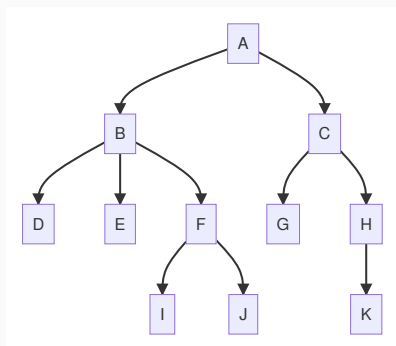
Autres représentation

- Liste



Autres représentation

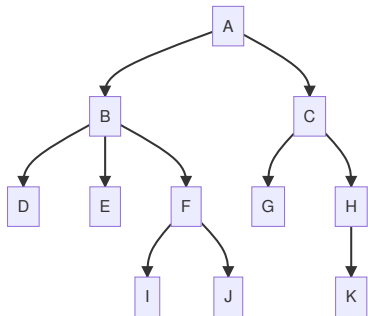
- Liste



(A
 (B
 (D)
 (E)
 (F
 (I)
 (J)
)
)
 (C
 (G)
 (H
 (K)
)
)
)

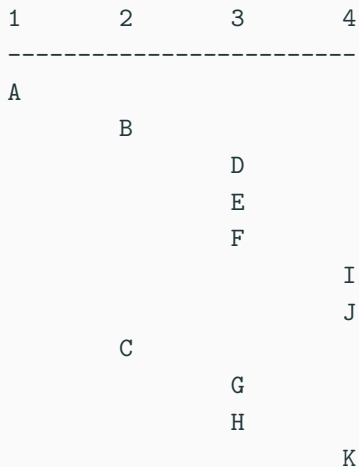
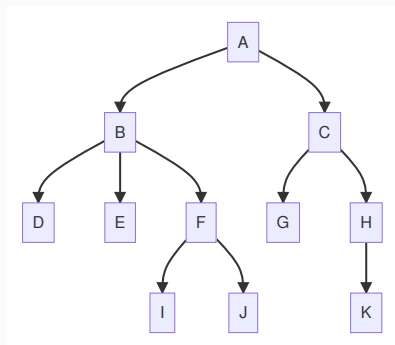
Autres représentation

- Par niveau



Autres représentation

- Par niveau



L'arbre binaire

- Structure de données abstraite,
- Chaque nœud a au plus deux fils: gauche et droite,
- Chaque fils est un arbre.

Comment représenteriez vous une telle structure?

L'arbre binaire

- Structure de données abstraite,
- Chaque nœud a au plus deux fils: gauche et droite,
- Chaque fils est un arbre.

Comment représenteriez vous une telle structure?

`<R, G, D>`

R: racine

G: sous-arbre gauche

D: sous-arbre droite

Comment cela s'écrirait en C?

L'arbre binaire

- Structure de données abstraite,
- Chaque nœud a au plus deux fils: gauche et droite,
- Chaque fils est un arbre.

Comment représenteriez vous une telle structure?

<R, G, D>

R: racine

G: sous-arbre gauche

D: sous-arbre droite

Comment cela s'écrirait en C?

```
typedef struct _node {  
    contenu info;  
    struct _node *left, *right;  
} node;  
typedef node *tree;
```


L'arbre binaire

Que se passerait-il avec

```
typedef struct _node {  
    int info;  
    struct _node left, right;  
} node;
```

- On ne sait pas quelle est la taille de node, on ne peut pas l'allouer!

Interface minimale

- Qu'y mettriez vous?

L'arbre binaire

Que se passerait-il avec

```
typedef struct _node {  
    int info;  
    struct _node left, right;  
} node;
```

- On ne sait pas quelle est la taille de node, on ne peut pas l'allouer!

Interface minimale

- Qu'y mettriez vous?

```
NULL          -> arbre (vide)  
<n, arbre, arbre> -> arbre  
visiter(arbre)  -> nœud (la racine de l'arbre)  
gauche(arbre)  -> arbre (sous-arbre de gauche)  
droite(arbre)   -> arbre (sous-arbre de droite)
```

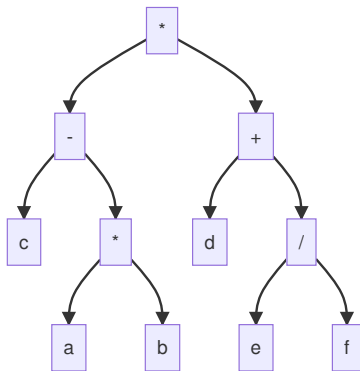
- Les autres opérations (insertion, parcours, etc) dépendent de ce qu'on stocke dans l'arbre.

Exemple d'arbre binaire

- Représentez $(c - a * b) * (d + e / f)$ à l'aide d'un arbre binaire (matrix)

Exemple d'arbre binaire

- Représentez $(c - a * b) * (d + e / f)$ à l'aide d'un arbre binaire (matrix)



Remarques

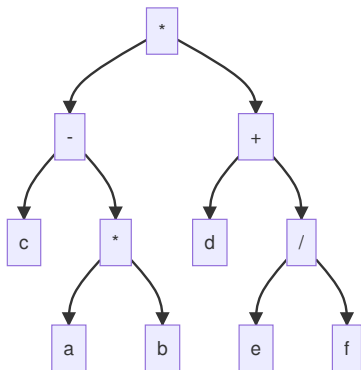
- L'arbre est **hétérogène**: le genre d'info est pas le même sur chaque nœud (opérateur, opérande).
 - Les feuilles contiennent les opérands.
 - Les nœuds internes contiennent les opérateurs.

Parcours d'arbres binaires

- Appliquer une opération à tous les nœuds de l'arbre,
- Nécessité de **parcourir** l'arbre,
- Utiliser uniquement l'interface: visiter, gauche, droite.

Une idée de comment parcourir cet arbre?

- 3 parcours (R: Racine, G: sous-arbre gauche, D: sous-arbre droit):



1. Parcours **préfixe** (R, G D),
2. Parcours **infixe** (G, R, D),
3. Parcours **postfixe** (G, D, R).

Le parcours infixe (G, R, D)

- Gauche, Racine, Droite:
 1. On descend dans l'arbre de gauche tant qu'il est pas vide,
 2. On visite la racine du sous arbre,
 3. On descend dans le sous-arbre de droite (s'il est pas vide),
 4. On recommence.

Le parcours infixe (G, R, D)

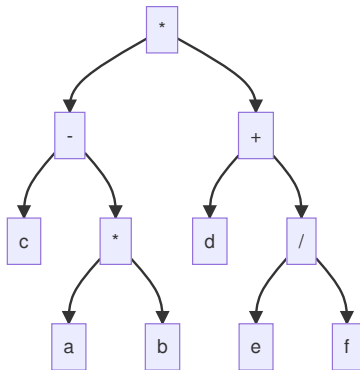
- Gauche, Racine, Droite:
 1. On descend dans l'arbre de gauche tant qu'il est pas vide,
 2. On visite la racine du sous arbre,
 3. On descend dans le sous-arbre de droite (s'il est pas vide),
 4. On recommence.

Incompréhensible?

- La récursivité c'est la vie.

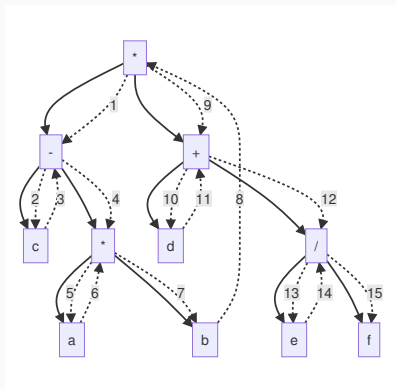
```
parcours_infixe(arbre a)
  si est_pas_vide(gauche(a))
    parcours_infixe(gauche(a))
  visiter(A)
  si est_pas_vide(droite(A))
    parcours_infixe(droite(A))
```

Graphiquement (dessins)



```
parcours_infixe(arbre a)
  si est_pas_vide(gauche(a))
    parcours_infixe(gauche(a))
  visiter(A)
  si est_pas_vide(droite(A))
    parcours_infixe(droite(A))
```


Graphiquement (mermaid c'est super)



```
parcours_infixe(arbre a)
  si est_pas_vide(gauche(a))
    parcours_infixe(gauche(a))
  visiter(A)
  si est_pas_vide(droite(A))
    parcours_infixe(droite(A))
```

Remarque

Le nœud est visité à la **remontée**.

Résultat

$c - a * b * d + e / f$

Live code

Et en C?

Live code

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

Question

Avez-vous compris le fonctionnement?

Question

Avez-vous compris le fonctionnement?

Vous en êtes sûr · e · s?

Question

Avez-vous compris le fonctionnement?

Vous en êtes sûr · e · s?

OK, alors deux exercices:

1. Écrire le pseudo-code pour le parcours R, G, D (matrix).
2. Écrire le pseudo-code pour la parcours G, D, R (matrix),

Rappel

```
parcours_infixe(arbre a)
    si est_pas_vide(gauche(a))
        parcours_infixe(gauche(a))
    visiter(A)
    si est_pas_vide(droite(A))
        parcours_infixe(droite(A))
```

Correction

- Les deux parcours sont des modifications **triviales**¹ de l'algorithme infixe.

Le parcours postfixe

```
parcours_postfixe(arbre a)
  si est_pas_vider(gauche(a))
    parcours_postfixe(gauche(a))
  si est_pas_vider(droite(a))
    parcours_postfixe(droite(a))
  visiter(a)
```

Le parcours préfixe

```
parcours_prefixe(arbre a)
  visiter(a)
  si est_pas_vider(gauche(a))
    parcours_prefixe(gauche(a))
  si est_pas_vider(droite(a))
    parcours_prefixe(droite(a))
```

¹Copyright cours de mathématiques pendant trop d'années.

Correction

- Les deux parcours sont des modifications **triviales**¹ de l'algorithme infixe.

Le parcours postfixe

```
parcours_postfixe(arbre a)
  si est_pas_vider(gauche(a))
    parcours_postfixe(gauche(a))
  si est_pas_vider(droite(a))
    parcours_postfixe(droite(a))
  visiter(a)
```

Le parcours préfixe

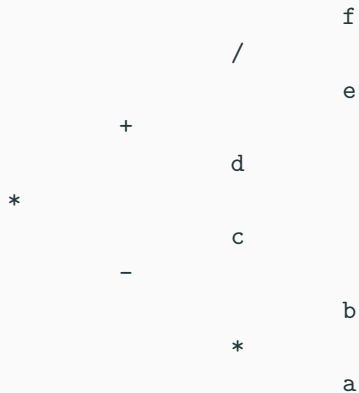
```
parcours_prefixe(arbre a)
  visiter(a)
  si est_pas_vider(gauche(a))
    parcours_prefixe(gauche(a))
  si est_pas_vider(droite(a))
    parcours_prefixe(droite(a))
```

Attention: L'implémentation de ces fonctions en C sont à **faire** en exercice (inspirez vous de ce qu'on a fait avant)!_____

¹Copyright cours de mathématiques pendant trop d'années.

Exercice: parcours

Comment imprimer l'arbre ci-dessous?



Exercice: parcours

Comment imprimer l'arbre ci-dessous?



Bravo vous avez trouvé!

- Il s'agissait du parcours D, R, G.

Implémentation

Vous avez 5 min pour implémenter cette fonction et la poster sur matrix!

Implémentation

Vous avez 5 min pour implémenter cette fonction et la poster sur matrix!

```
void pretty_print(tree_t tree, int n) {
    if (NULL != tree) {
        pretty_print(tree->right, n+1);
        for (int i = 0; i < n; ++i) {
            printf(" ");
        }
        printf("%d\n", tree->info);
        pretty_print(tree->left, n+1);
    }
}
```

Exercice supplémentaire (sans corrigé)

Écrire le code de la fonction

```
int depth(tree_t t);
```

qui retourne la profondeur maximale d'un arbre.

Indice: la profondeur à chaque niveau peut-être calculée à partir du niveau des sous-arbres de gauche et de droite.

La recherche dans un arbre binaire

- Les arbres binaires peuvent retrouver une information très rapidement.
- À quelle complexité? À quelle condition?

La recherche dans un arbre binaire

- Les arbres binaires peuvent retrouver une information très rapidement.
- À quelle complexité? À quelle condition?

Condition

- Le contenu de l'arbre est **ordonné** (il y a une relation d'ordre (<, > entre les éléments)).

Complexité

- La profondeur de l'arbre (ou le $\mathcal{O}(\log_2(N))$)

La recherche dans un arbre binaire

- Les arbres binaires peuvent retrouver une information très rapidement.
- À quelle complexité? À quelle condition?

Condition

- Le contenu de l'arbre est **ordonné** (il y a une relation d'ordre (<, > entre les éléments)).

Complexité

- La profondeur de l'arbre (ou le $\mathcal{O}(\log_2(N))$)

Exemple: les arbres lexicographiques

- Chaque nœud contient une information de type ordonné, la **clé**,
- Par construction, pour chaque nœud N :
 - Toutes clé du sous-arbre à gauche de N sont inférieurs à la clé de N .
 - Toutes clé du sous-arbre à droite de N sont inférieurs à la clé de N .

Algorithme de recherche

- Retourner le nœud si la clé est trouvée dans l'arbre.

```
arbre recherche(clé, arbre)
  tante_que est_non_vide(arbre)
  si clé < clé(arbre)
    arbre = gauche(arbre)
  sinon si clé > clé(arbre)
    arbre = droite(arbre)
  sinon
    retourne arbre
retourne NULL
```

Algorithme de recherche, implémentation (live)

Algorithme de recherche, implémentation (live)

```
typedef int key_t;
typedef struct _node {
    key_t key;
    struct _node* left;
    struct _node* right;
} node;
typedef node* tree_t;
tree_t search(key_t key, tree_t tree) {
    tree_t current = tree;
    while (NULL != current) {
        if (current->key > X) {
            current = current->gauche;
        } else if (current->key < X){
            current = current->droite;
        } else {
            return current;
        }
    }
    return NULL;
}
```

Exercice (5-10min)

Écrire le code de la fonction

```
int tree_size(tree_t tree);
```

qui retourne le nombre total de nœuds d'un arbre et poster le résultat sur matrix.

Indication: la taille, est $1 +$ le nombre de nœuds du sous-arbre de gauche additionné au nombre de nœuds dans le sous-arbre de droite.

Exercice (5-10min)

Écrire le code de la fonction

```
int tree_size(tree_t tree);
```

qui retourne le nombre total de nœuds d'un arbre et poster le résultat sur matrix.

Indication: la taille, est $1 +$ le nombre de nœuds du sous-arbre de gauche additionné au nombre de nœuds dans le sous-arbre de droite.

```
int arbre_size(tree_t tree) {
    if (NULL == tree) {
        return 0;
    } else {
        return 1 + tree_size(tree->left)
            + tree_size(tree->right);
    }
}
```

L'insertion dans un arbre binaire

- C'est bien joli de pouvoir faire des parcours, recherches, mais si on peut pas construire l'arbre...

Pour un arbre lexicographique

- Rechercher la position dans l'arbre où insérer.
- Créer un nœud avec la clé et le rattacher à l'arbre.

Exemple d'insertions

- Clés uniques pour simplifier.
- Insertion de 5, 15, 10, 25, 2, -5, 12, 14, 11.
- Rappel:
 - Plus petit que la clé courante => gauche,
 - Plus grand que la clé courante => droite.
- Faisons le dessin ensemble

Exercice (3min, puis matrix)

- Dessiner l'arbre en insérant 20, 30, 60, 40, 10, 15, 25, -5

Pseudo-code d'insertion (1/2)

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

Recherche du parent

```
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)
```


Pseudo-code d'insertion (2/2)

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

Ajout du fils

```
ajout(arbre, clé)
```

```
  si est_vide(arbre)
```

```
    arbre = nœud(clé)
```

```
  sinon
```

```
    si clé < clé(arbre)
```

```
      gauche(arbre) = nœud(clé)
```

```
    sinon si clé > clé(arbre)
```

```
      droite(arbre) = nœud(clé)
```

```
    sinon
```

```
      retourne
```

Recherche du parent (ensemble)

Code d'insertion en C (1/2)

Recherche du parent (ensemble)

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