Intelligence Artificielle

basé sur "Artificial Intelligence : A modern approach" de Russel et Nowig

ENSISA 2A

Jonathan Weber

Hiver 2021

Recherche

Plan du chapitre

1. Recherche
    - Problème de Recherche
    - Recherche de solutions
    - Recherche non-informées (aveugles)

Recherche

Problème de Recherche

Résoudre des problèmes par la recherche

1. Définir le problème :

Résoudre des problèmes par la recherche

1. Définir le problème :
   - ▷ Formulation de l'objectif

Résoudre des problèmes par la recherche

1. Définir le problème :
   - ▷ Formulation de l'objectif
   - ▷ Formulation du problème

Résoudre des problèmes par la recherche

1. Définir le problème :
   - ▷ Formulation de l'objectif
   - ▷ Formulation du problème
2. Résoudre le problème en "deux" étapes :

Résoudre des problèmes par la recherche

1. Définir le problème :
   - ▷ Formulation de l'objectif
   - ▷ Formulation du problème
2. Résoudre le problème en "deux" étapes :
   - ▷ Recherche : exploration des différentes possibilités

Résoudre des problèmes par la recherche

1. Définir le problème :
   - ▷ Formulation de l'objectif
   - ▷ Formulation du problème
2. Résoudre le problème en "deux" étapes :
   - ▷ Recherche : exploration des différentes possibilités
   - ▷ Exécuter la solution trouvée

Formulation du problème

- État initial : état de départ de l'agent

Formulation du problème

- État initial : état de départ de l'agent
- États : Ensemble des états atteignables depuis l'état initial par une séquence d'actions (espace des états)

Formulation du problème

- État initial : état de départ de l'agent
- États : Ensemble des états atteignables depuis l'état initial par une séquence d'actions (espace des états)
- Actions : Ensemble des actions possibles pour l'agent (espace des actions).

Formulation du problème

- État initial : état de départ de l'agent
- États : Ensemble des états atteignables depuis l'état initial par une séquence d'actions (espace des états)
- Actions : Ensemble des actions possibles pour l'agent (espace des actions).
- Modèle de transition : description de ce que fait chaque action

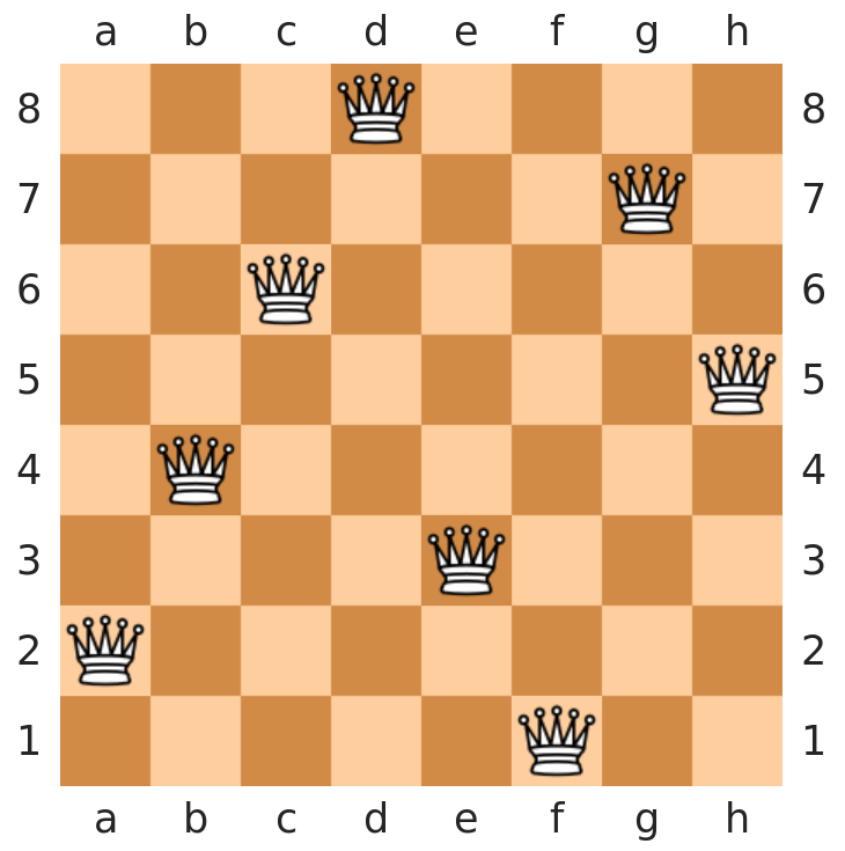
Formulation du problème

- État initial : état de départ de l'agent
- États : Ensemble des états atteignables depuis l'état initial par une séquence d'actions (espace des états)
- Actions : Ensemble des actions possibles pour l'agent (espace des actions).
- Modèle de transition : description de ce que fait chaque action
- Test de l'objectif : détermine si un état est un objectif

Formulation du problème

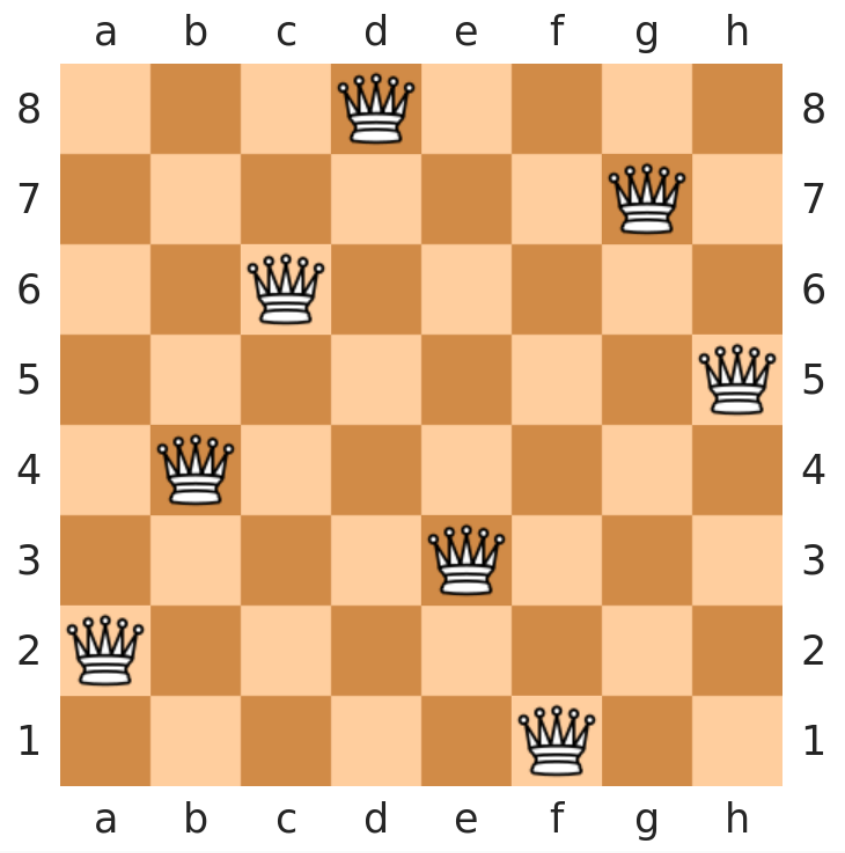
- État initial : état de départ de l'agent
- États : Ensemble des états atteignables depuis l'état initial par une séquence d'actions (espace des états)
- Actions : Ensemble des actions possibles pour l'agent (espace des actions).
- Modèle de transition : description de ce que fait chaque action
- Test de l'objectif : détermine si un état est un objectif
- Coût du chemin : fonction qui évalue numériquement le coût d'un chemin (mesure de performance)

Exemple : problème des huit reines



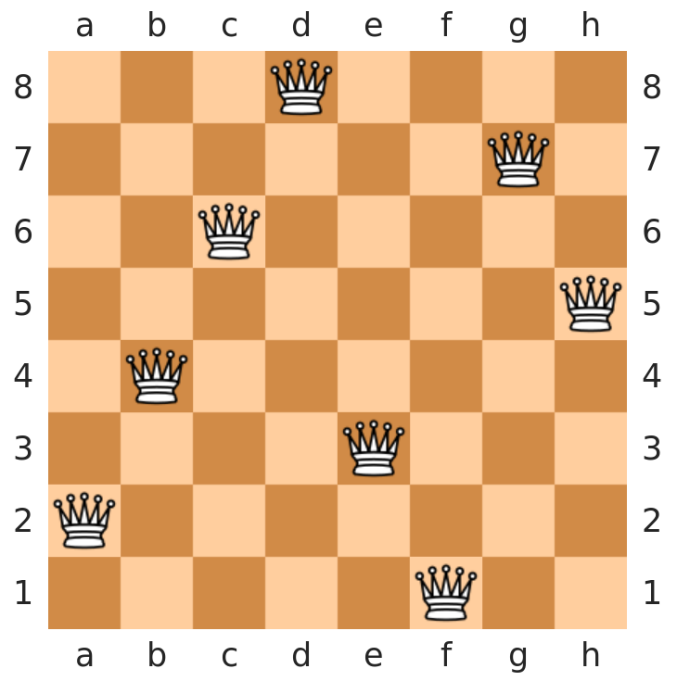
- ▷ Énoncé : placer huit reines telles qu'aucune ne puisse attaquer une autre reine

Exemple : problème des huit reines



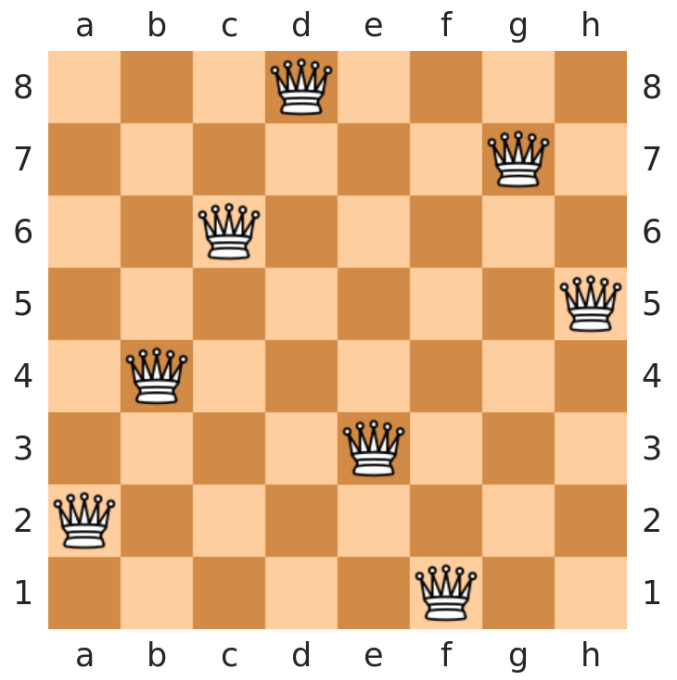
- ▷ Énoncé : placer huit reines telles qu'aucune ne puisse attaquer une autre reine
- ▷ Combinaisons possibles : $64 \times 63 \times 62 \times \ldots \times 57 \Rightarrow 1,8 \times 10^{14}$

Exemple : problème des huit reines



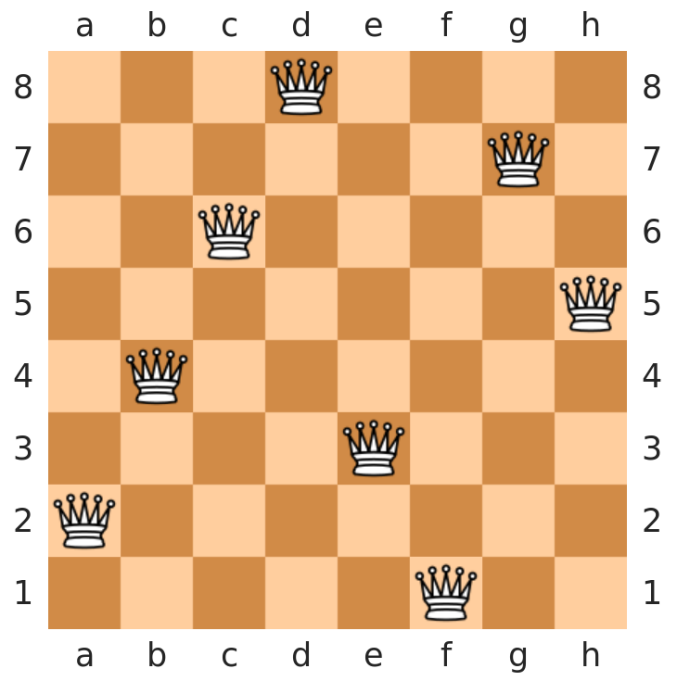
- ▷ État initial : échiquier vide

Exemple : problème des huit reines



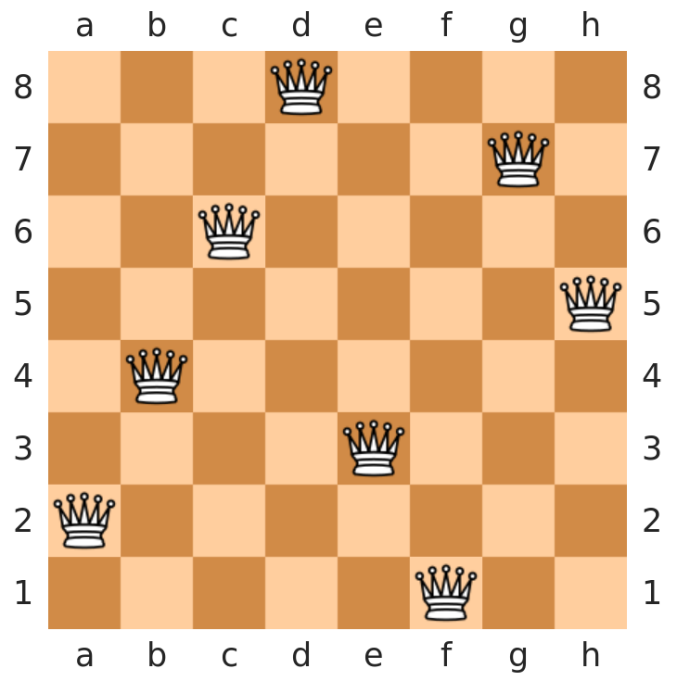
- ▷ État initial : échiquier vide
- ▷ États : Toutes les combinaisons de 0 à 8 reines sur l'échiquier

Exemple : problème des huit reines



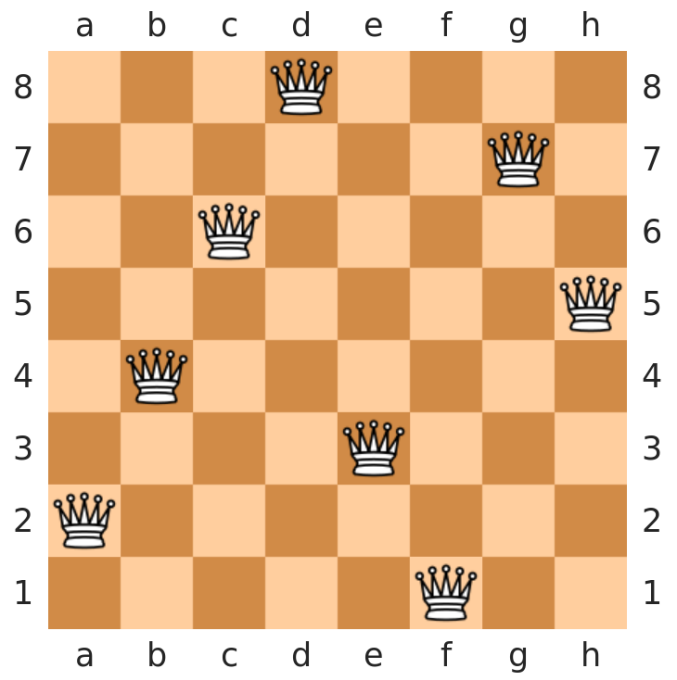
- ▷ État initial : échiquier vide
- ▷ États : Toutes les combinaisons de 0 à 8 reines sur l'échiquier
- ▷ Actions : Ajouter une reine sur une case vide

Exemple : problème des huit reines



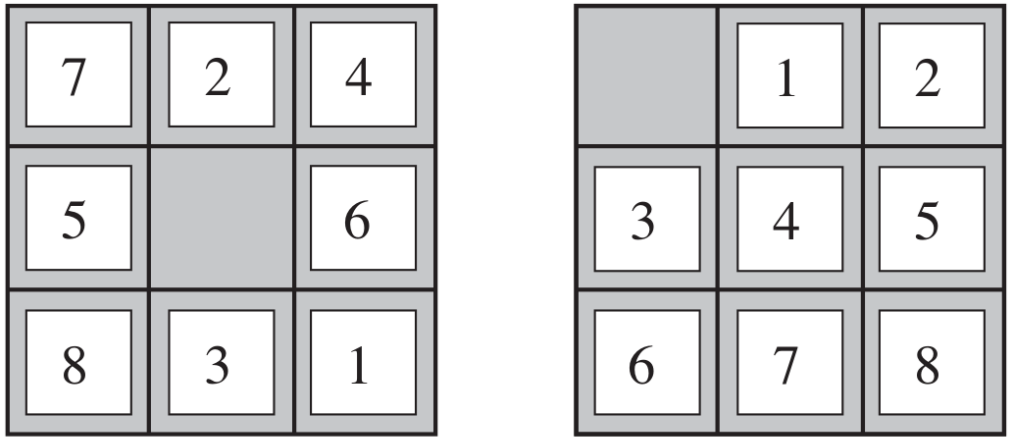
- État initial : échiquier vide
- États : Toutes les combinaisons de 0 à 8 reines sur l'échiquier
- Actions : Ajouter une reine sur une case vide
- Modèle de transition : Mettre à jour l'échiquier

Exemple : problème des huit reines



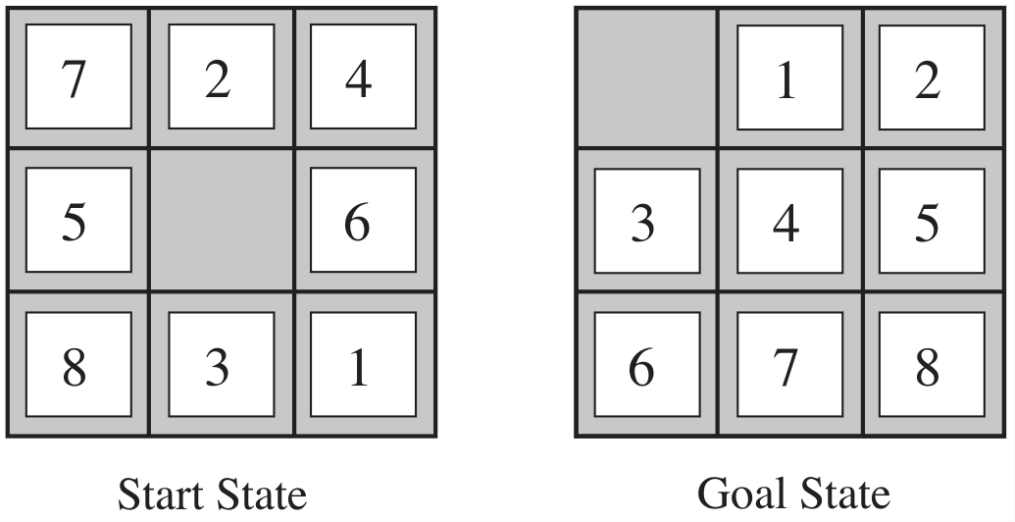
- État initial : échiquier vide
- États : Toutes les combinaisons de 0 à 8 reines sur l'échiquier
- Actions : Ajouter une reine sur une case vide
- Modèle de transition : Mettre à jour l'échiquier
- Test de l'objectif : 8 reines sur l'échiquier sans qu'aucune ne soit menacée

Exemple : Jeu du taquin



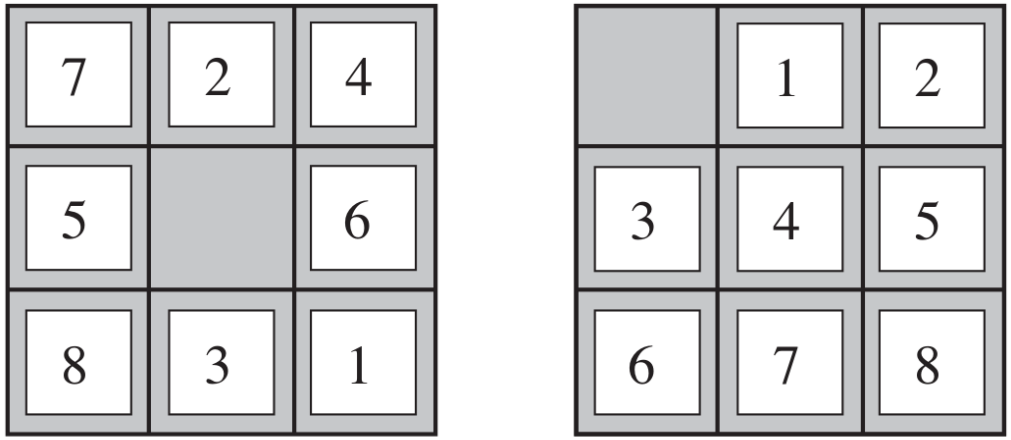
- ▷ État initial : N'importe quel état

Exemple : Jeu du taquin



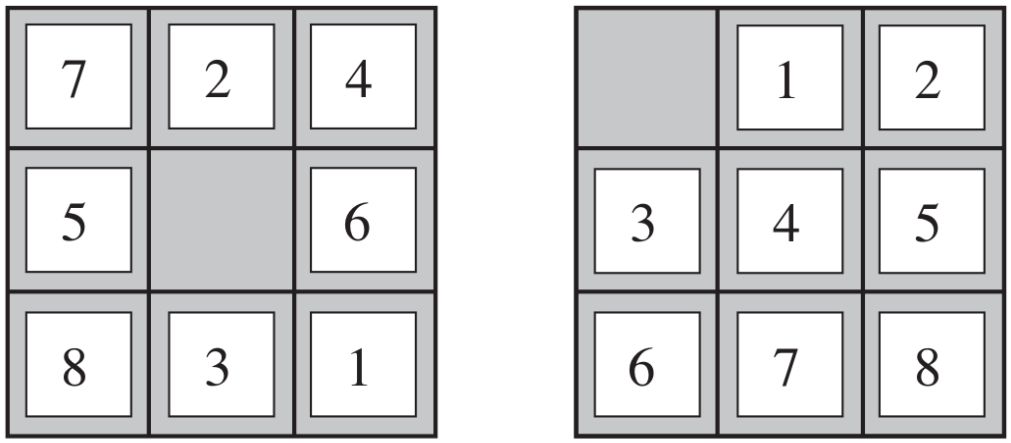
- ▷ État initial : N'importe quel état
- ▷ États : Position de chaque tuile dans la grille 3×3

Exemple : Jeu du taquin



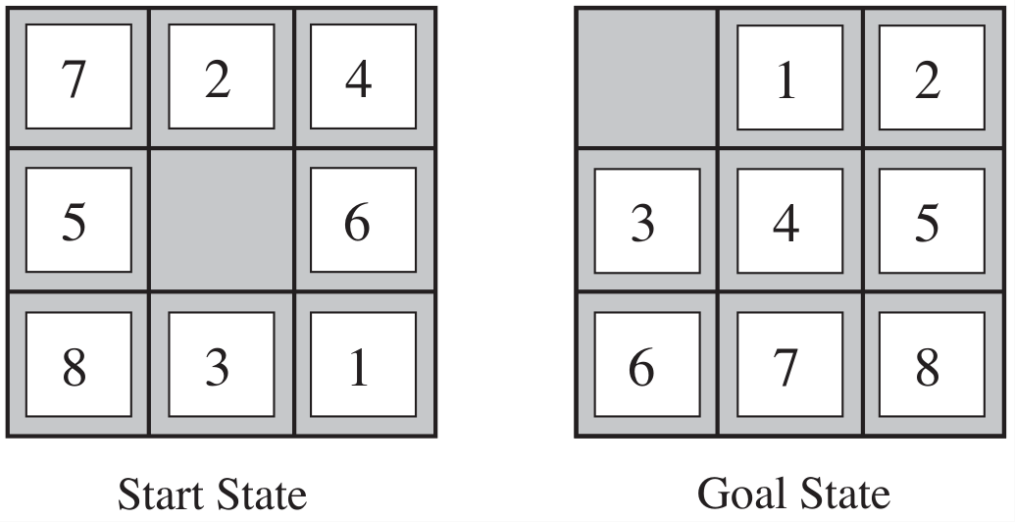
- État initial : N'importe quel état
- États : Position de chaque tuile dans la grille 3×3
- Actions : Gauche, Droite, Haut et Bas

Exemple : Jeu du taquin



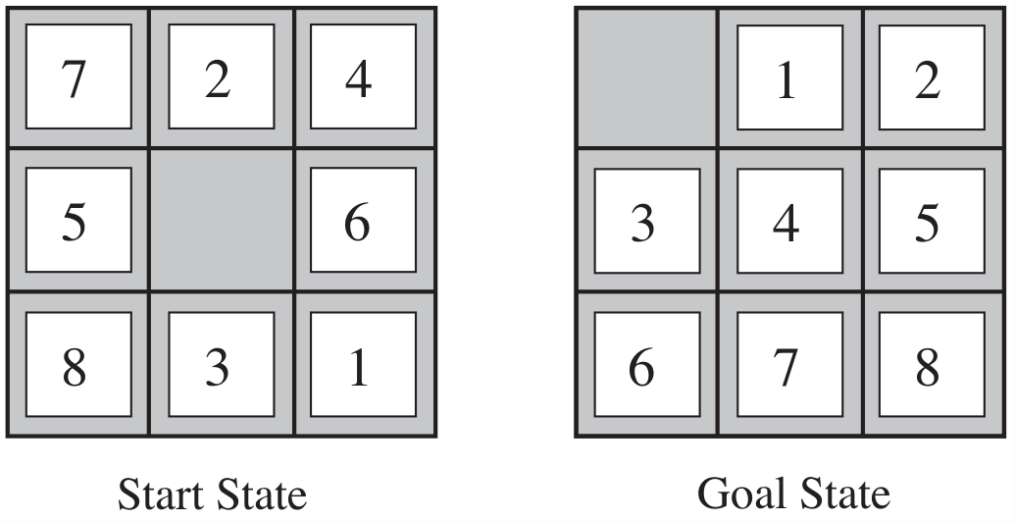
- État initial : N'importe quel état
- États : Position de chaque tuile dans la grille 3×3
- Actions : Gauche, Droite, Haut et Bas
- Modèle de transition : Selon état et action, calculer le nouvel état

Exemple : Jeu du taquin



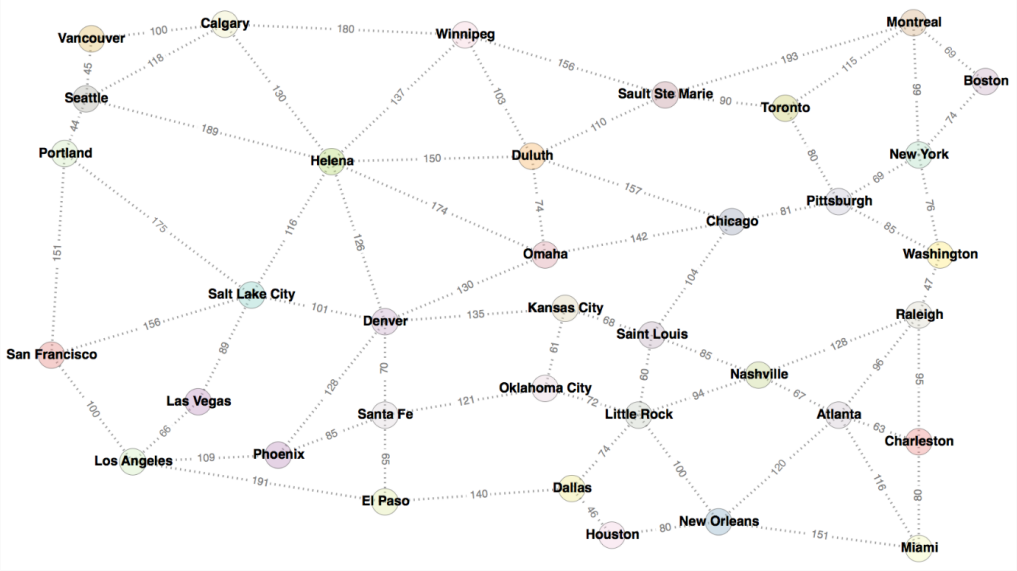
- État initial : N'importe quel état
- États : Position de chaque tuile dans la grille 3×3
- Actions : Gauche, Droite, Haut et Bas
- Modèle de transition : Selon état et action, calculer le nouvel état
- Test de l'objectif : État courant est-il état objectif ?

Exemple : Jeu du taquin



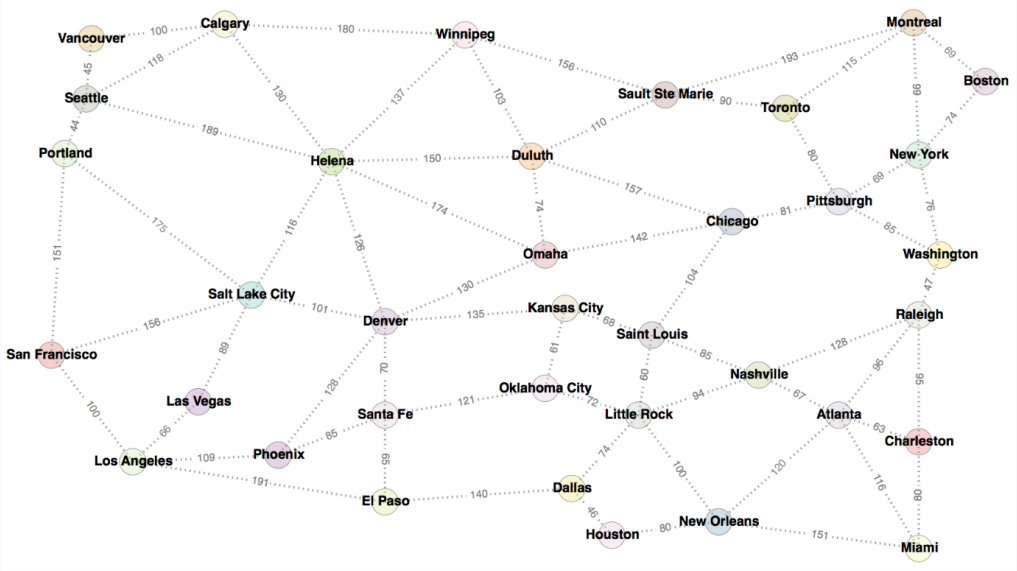
- État initial : N'importe quel état
- États : Position de chaque tuile dans la grille 3×3
- Actions : Gauche, Droite, Haut et Bas
- Modèle de transition : Selon état et action, calculer le nouvel état
- Test de l'objectif : État courant est-il état objectif ?
- Coût du chemin : Chaque action coûte 1 point

Exemple : Itinéraire



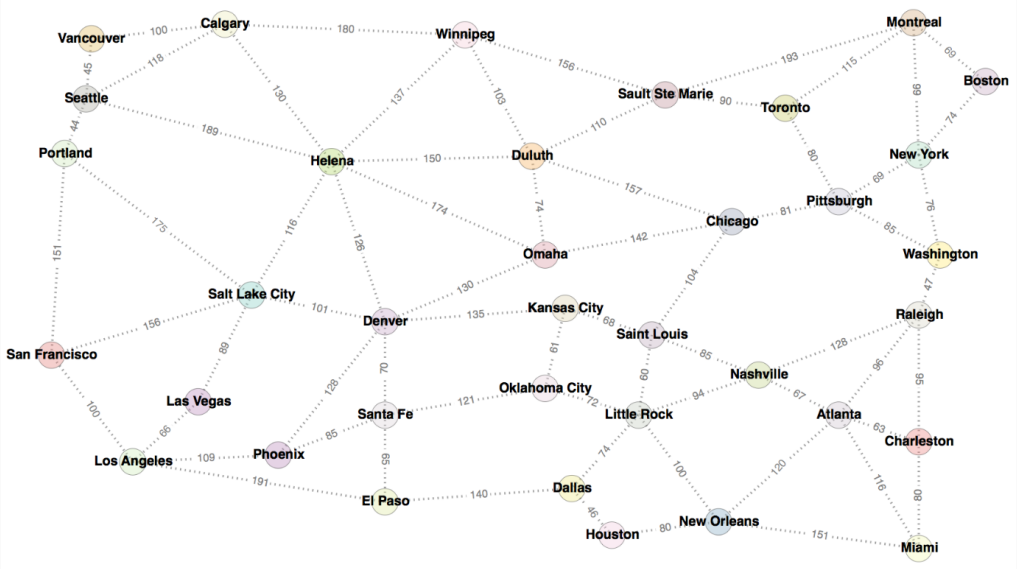
▷ État initial : Dans n'importe quelle **ville**

Exemple : Itinéraire



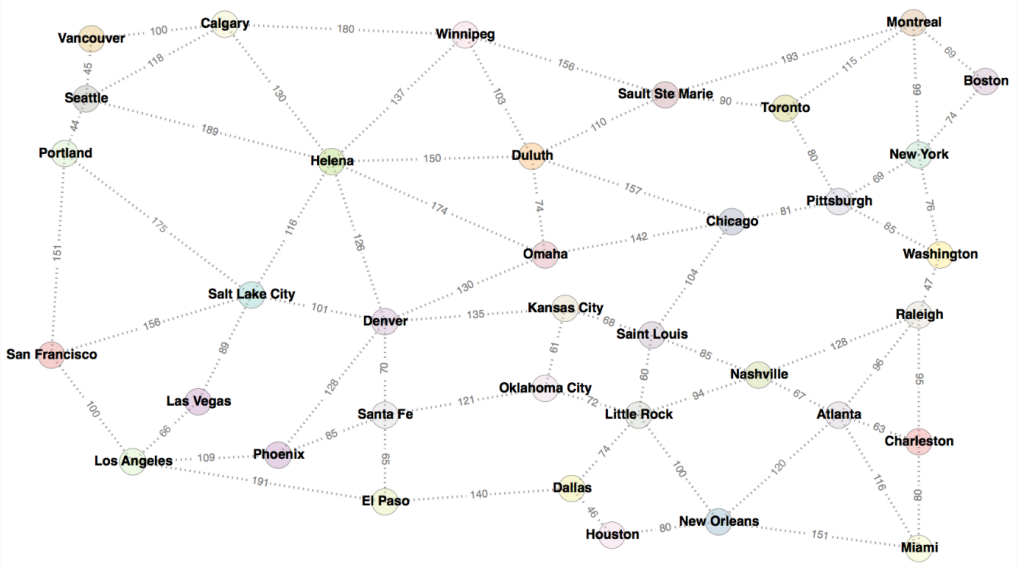
- État initial : Dans n'importe quelle **ville**
- États : Dans une **ville**

Exemple : Itinéraire



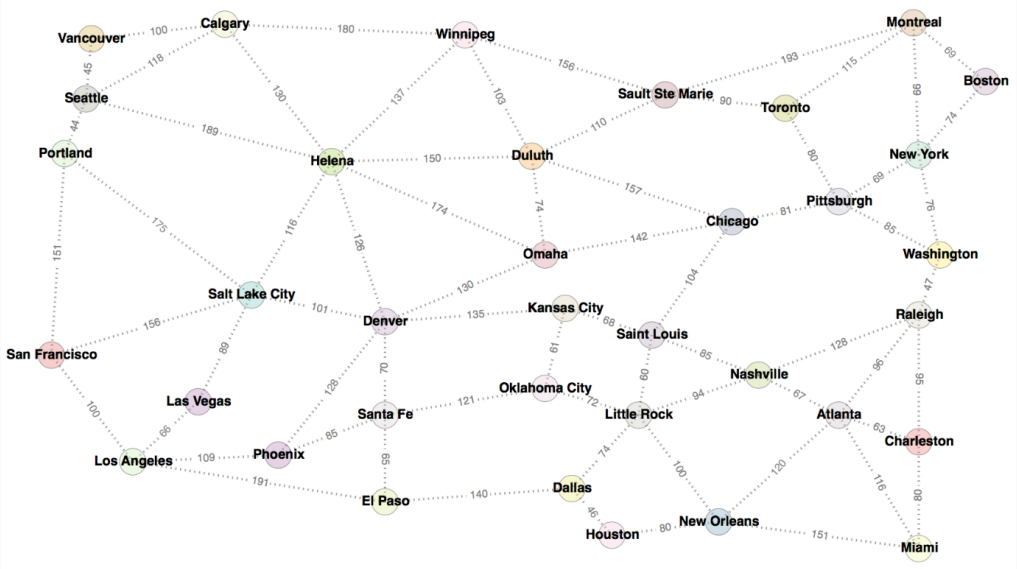
- État initial : Dans n'importe quelle **ville**
- États : Dans une **ville**
- Actions : Aller dans une **ville voisine**

Exemple : Itinéraire



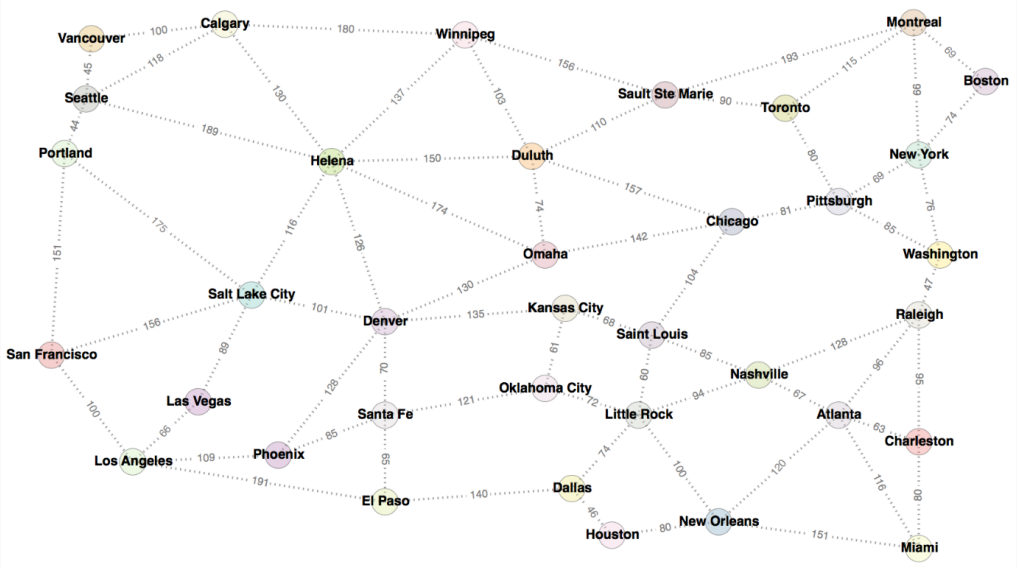
- ▷ État initial : Dans n'importe quelle **ville**
- ▷ États : Dans une **ville**
- ▷ Actions : Aller dans une **ville voisine**
- ▷ Modèle de transition : Dans **ville** V_1 + Aller **ville** V_2 ⇒ Dans **ville** V_2

Exemple : Itinéraire



- ▷ État initial : Dans n'importe quelle **ville**
- ▷ États : Dans une **ville**
- ▷ Actions : Aller dans une **ville voisine**
- ▷ Modèle de transition : Dans **ville** V_1 + Aller **ville** V_2 ⇒ Dans **ville** V_2
- ▷ Test de l'objectif : Dans **ville** d'arrivée ?

Exemple : Itinéraire



- ▷ État initial : Dans n'importe quelle **ville**
- ▷ États : Dans une **ville**
- ▷ Actions : Aller dans une **ville voisine**
- ▷ Modèle de transition : Dans **ville** V_1 + Aller **ville** V_2 ⇒ Dans **ville** V_2
- ▷ Test de l'objectif : Dans **ville** d'arrivée ?
- ▷ Coût du chemin : Coût du chemin en kilomètre

Exemples du monde réel

- Recherche de parcours :
  - Itinéraires automatiques, guidage routier, planification de routes aériennes, routage sur les réseaux informatiques, ...

Exemples du monde réel

- Recherche de parcours :
  - Itinéraires automatiques, guidage routier, planification de routes aériennes, routage sur les réseaux informatiques, ...
- Robotique :
  - Assemblage automatique, navigation autonome, ...

Exemples du monde réel

- Recherche de parcours :
  - Itinéraires automatiques, guidage routier, planification de routes aériennes, routage sur les réseaux informatiques, ...
- Robotique :
  - Assemblage automatique, navigation autonome, ...
- Planification et ordonnancement
  - Horaires, organisation de tâches, allocation de ressources, ...

Exemples du monde réel

- Recherche de parcours :
  - Itinéraires automatiques, guidage routier, planification de routes aériennes, routage sur les réseaux informatiques, ...
- Robotique :
  - Assemblage automatique, navigation autonome, ...
- Planification et ordonnancement
  - Horaires, organisation de tâches, allocation de ressources, ...
- ...

Recherche

Recherche de solutions

Algorithme de recherche de base

- Idée :

function TREE-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure
  initialize the frontier using the initial state of *problem*
  loop do
    if the frontier is empty **then return** failure
    choose a leaf node and remove it from the frontier
    if the node contains a goal state **then return** the corresponding solution
    expand the chosen node, adding the resulting nodes to the frontier

---

function GRAPH-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure
  initialize the frontier using the initial state of *problem*
  initialize the explored set to be empty
  loop do
    if the frontier is empty **then return** failure
    choose a leaf node and remove it from the frontier
    if the node contains a goal state **then return** the corresponding solution
    add the node to the explored set
    expand the chosen node, adding the resulting nodes to the frontier
      only if not in the frontier or explored set

- Idée :
  - Recherche hors ligne, i.e. exploration de l'espace d'états en générant des successeurs d'états déjà générés (développer des états)

function TREE-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure
  initialize the frontier using the initial state of *problem*
  loop do
    if the frontier is empty **then return** failure
    choose a leaf node and remove it from the frontier
    if the node contains a goal state **then return** the corresponding solution
    expand the chosen node, adding the resulting nodes to the frontier

---

function GRAPH-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure
  initialize the frontier using the initial state of *problem*
  initialize the explored set to be empty
  loop do
    if the frontier is empty **then return** failure
    choose a leaf node and remove it from the frontier
    if the node contains a goal state **then return** the corresponding solution
    add the node to the explored set
    expand the chosen node, adding the resulting nodes to the frontier
      only if not in the frontier or explored set

Algorithme de recherche de base

- Idée :
  - Recherche hors ligne, i.e. exploration de l'espace d'états en générant des successeurs d'états déjà générés (développer des états)
  - Génération d'un arbre de recherche (ou d'un graphe)

function TREE-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure
  initialize the frontier using the initial state of *problem*
  loop do
    if the frontier is empty **then return** failure
    choose a leaf node and remove it from the frontier
    if the node contains a goal state **then return** the corresponding solution
    expand the chosen node, adding the resulting nodes to the frontier

---

function GRAPH-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure
  initialize the frontier using the initial state of *problem*
  initialize the explored set to be empty
  loop do
    if the frontier is empty **then return** failure
    choose a leaf node and remove it from the frontier
    if the node contains a goal state **then return** the corresponding solution
    add the node to the explored set
    expand the chosen node, adding the resulting nodes to the frontier
      only if not in the frontier or explored set

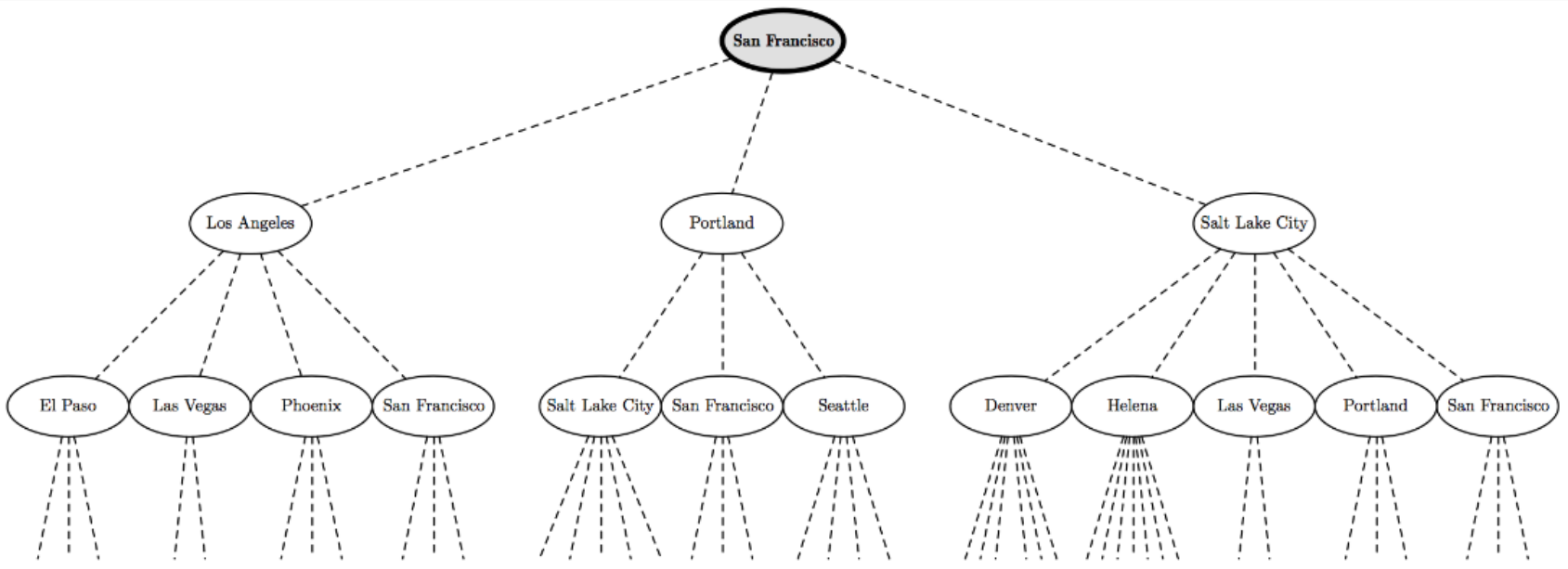
- Idée :
  - Recherche hors ligne, i.e. exploration de l'espace d'états en générant des successeurs d'états déjà générés (développer des états)
  - Génération d'un arbre de recherche (ou d'un graphe)
  - Fin : développement d'un nœud qui est un état objectif

function TREE-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure
  initialize the frontier using the initial state of *problem*
  loop do
    if the frontier is empty **then return** failure
    choose a leaf node and remove it from the frontier
    if the node contains a goal state **then return** the corresponding solution
    expand the chosen node, adding the resulting nodes to the frontier

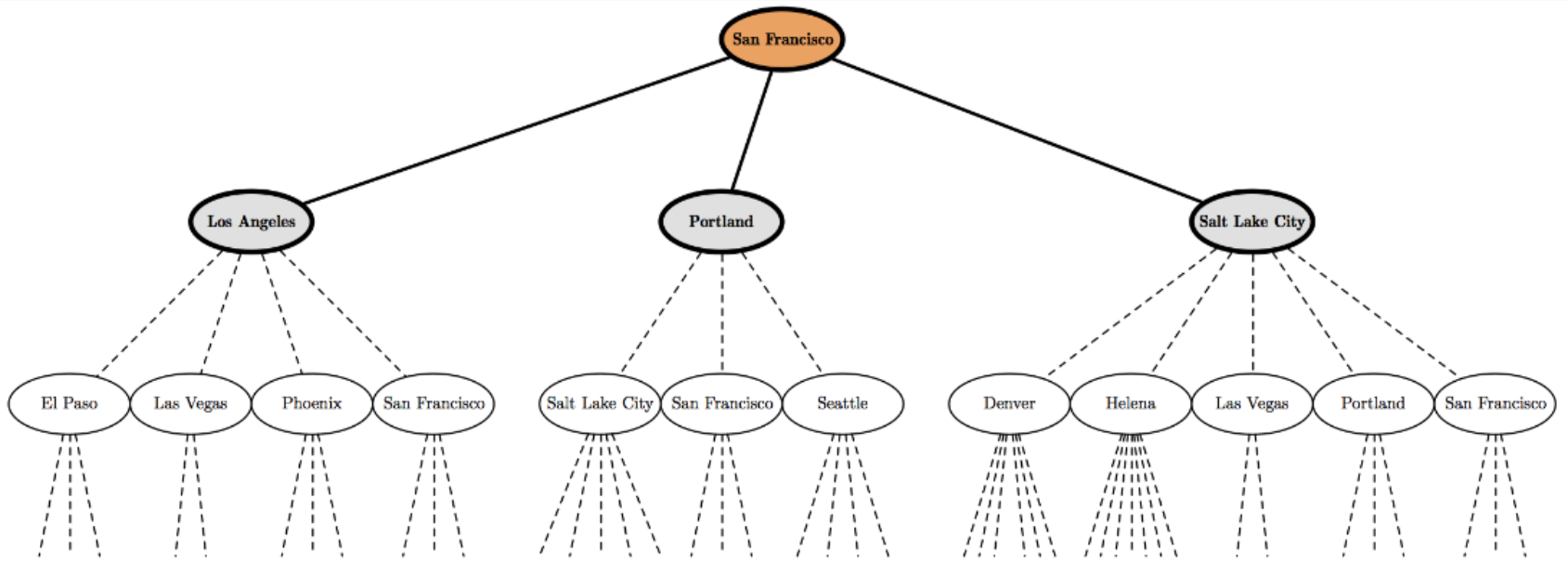
---

function GRAPH-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure
  initialize the frontier using the initial state of *problem*
  initialize the explored set to be empty
  loop do
    if the frontier is empty **then return** failure
    choose a leaf node and remove it from the frontier
    if the node contains a goal state **then return** the corresponding solution
    add the node to the explored set
    expand the chosen node, adding the resulting nodes to the frontier
      only if not in the frontier or explored set

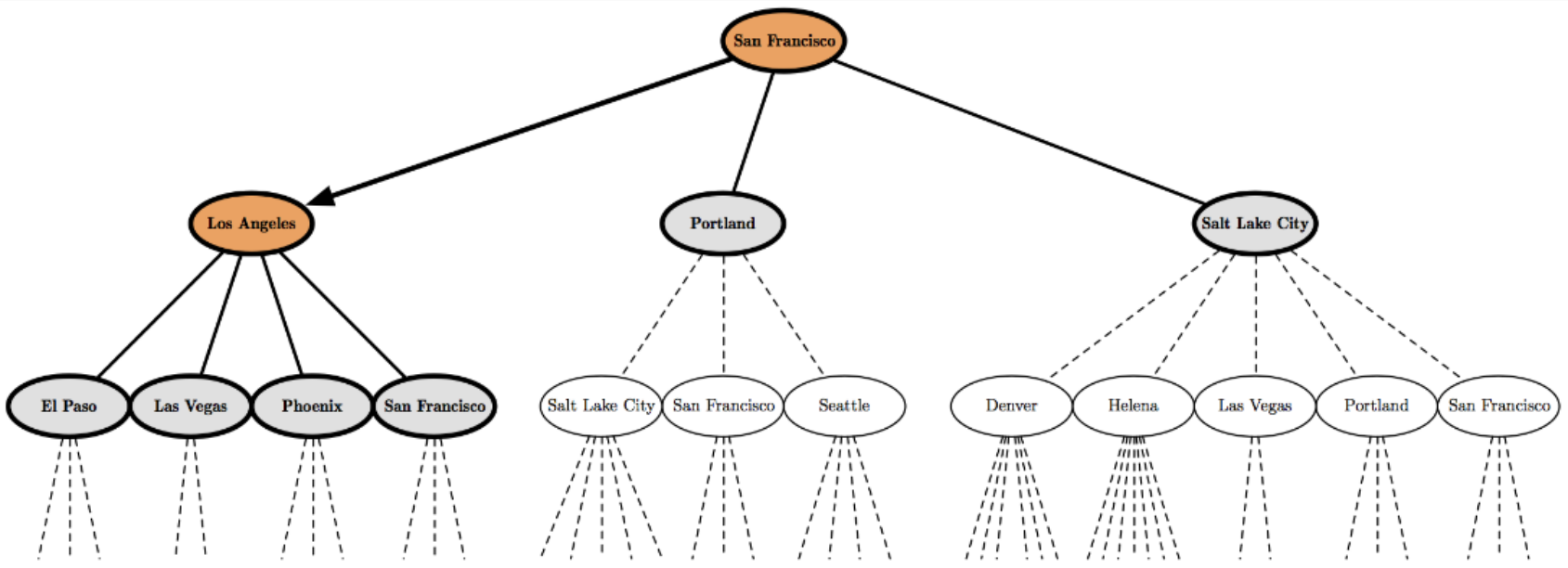
Algorithme de recherche de base



Algorithme de recherche de base

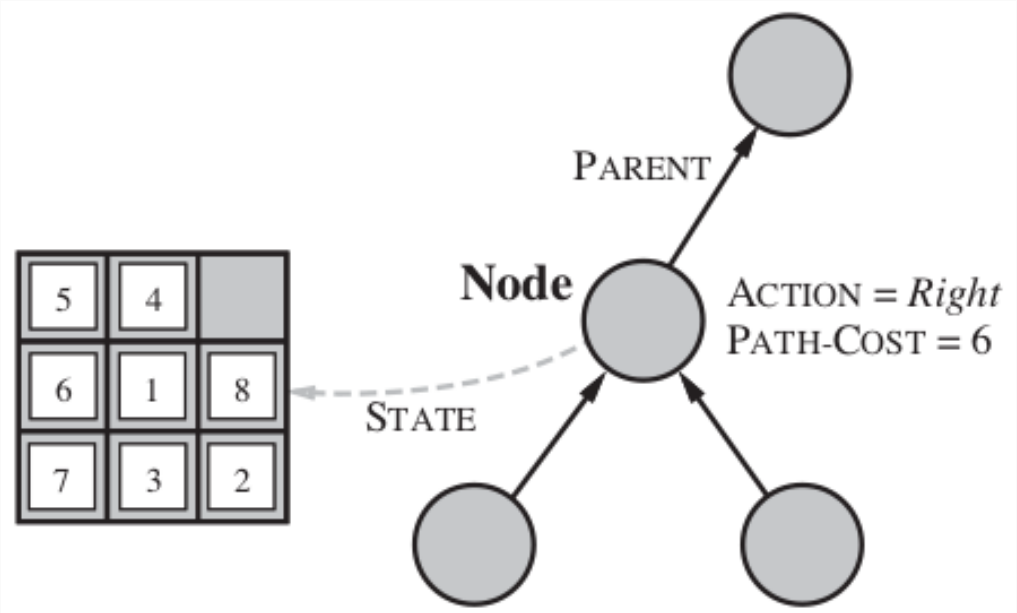


Algorithme de recherche de base



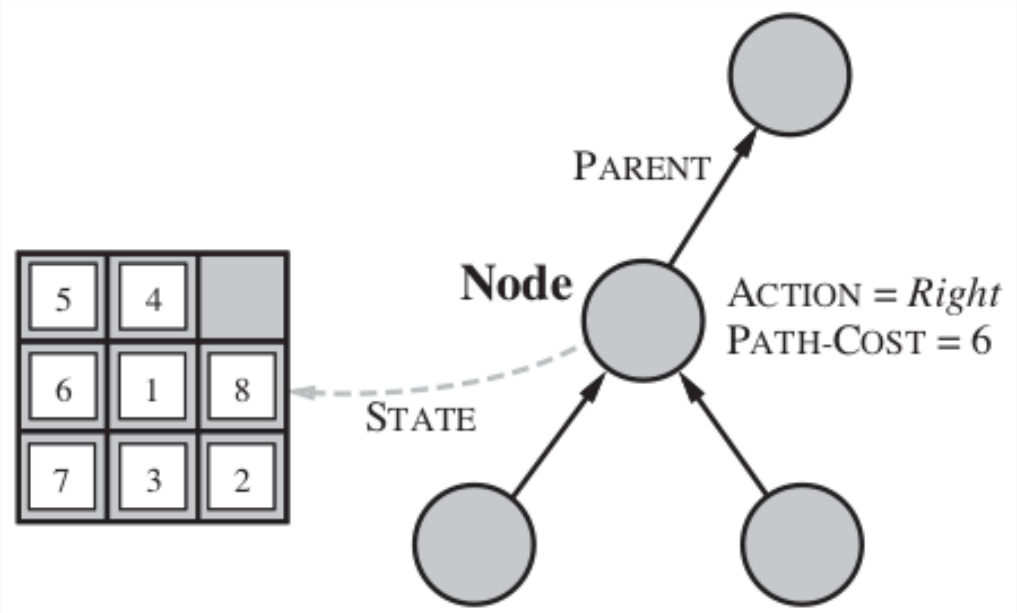
État vs. Nœud

- État : représentation d'une configuration physique du monde



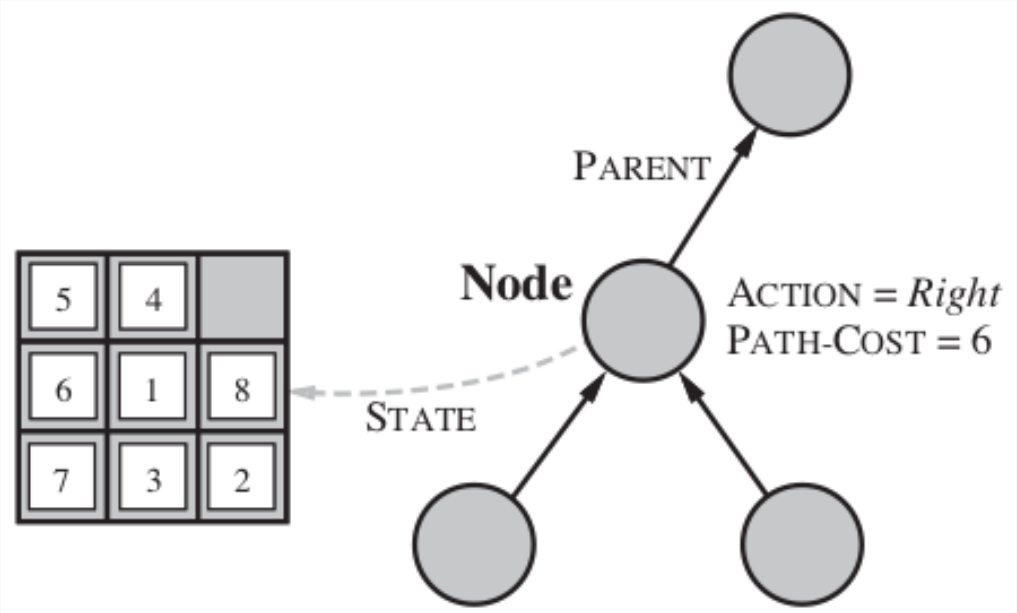
État vs. Nœud

- État : représentation d'une configuration physique du monde
- Nœud : structure de données qui est partie intégrante de l'arbre/graphe de recherche et qui inclue :



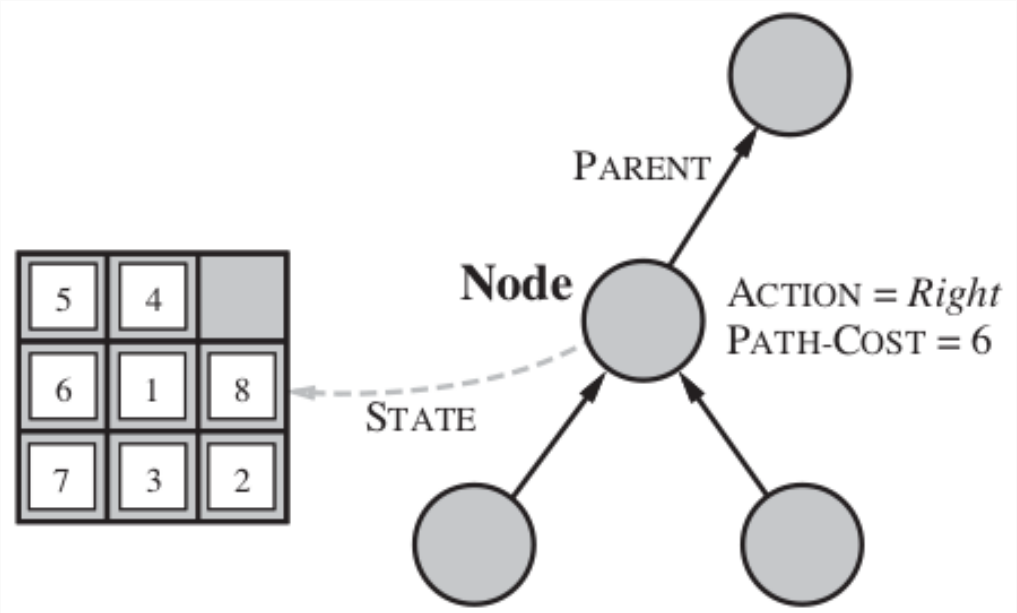
État vs. Nœud

- État : représentation d'une configuration physique du monde
- Nœud : structure de données qui est partie intégrante de l'arbre/graphe de recherche et qui inclue :
  - l'état



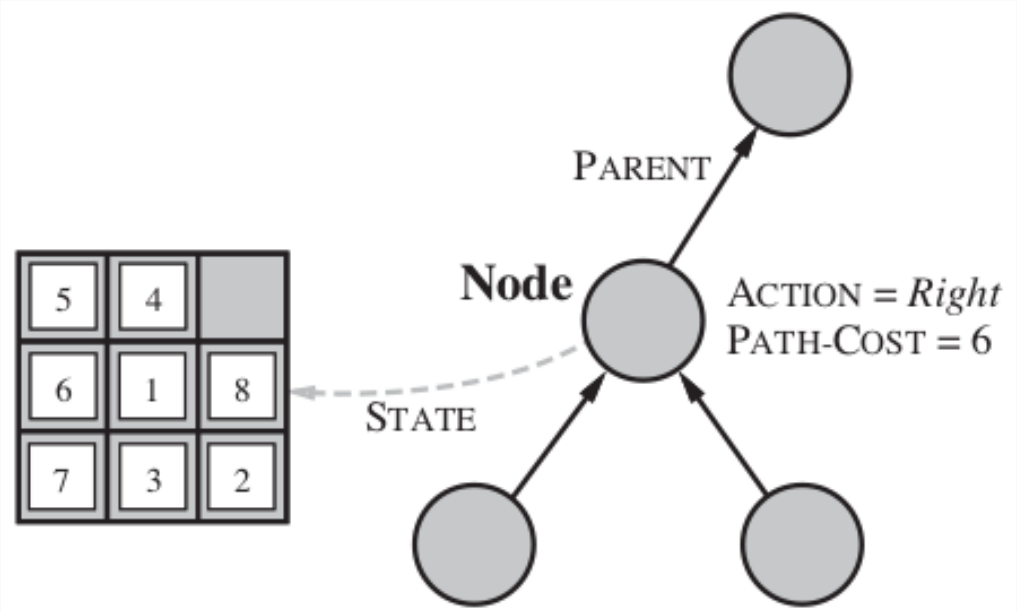
État vs. Nœud

- État : représentation d'une configuration physique du monde
- Nœud : structure de données qui est partie intégrante de l'arbre/graphe de recherche et qui inclue :
  - l'état
  - le parent, i.e. le nœud père



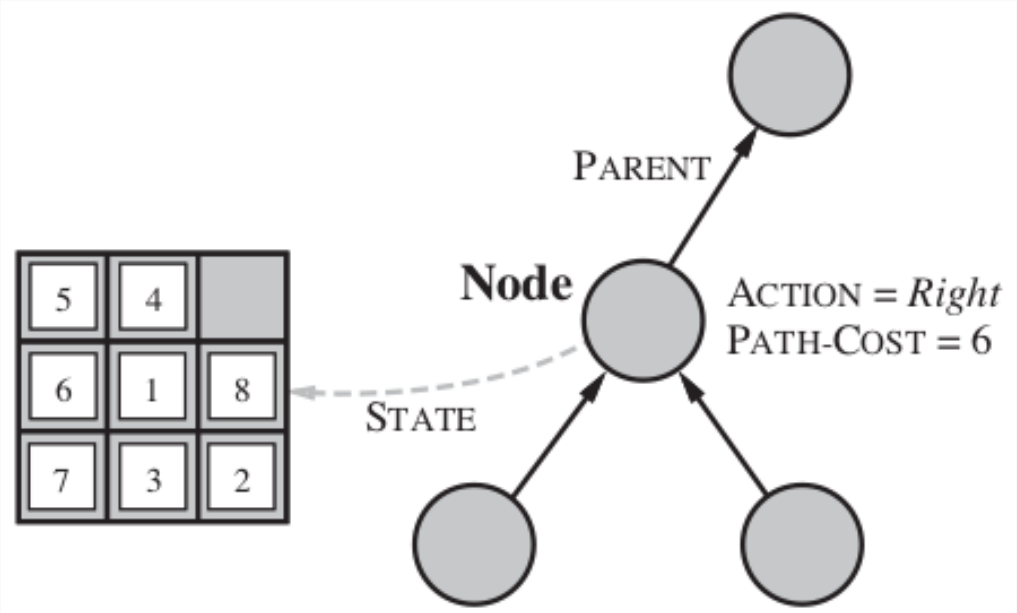
État vs. Nœud

- État : représentation d'une configuration physique du monde
- Nœud : structure de données qui est partie intégrante de l'arbre/graphe de recherche et qui inclue :
  - l'état
  - le parent, i.e. le nœud père
  - l'action réalisée pour obtenir l'état contenu dans le nœud



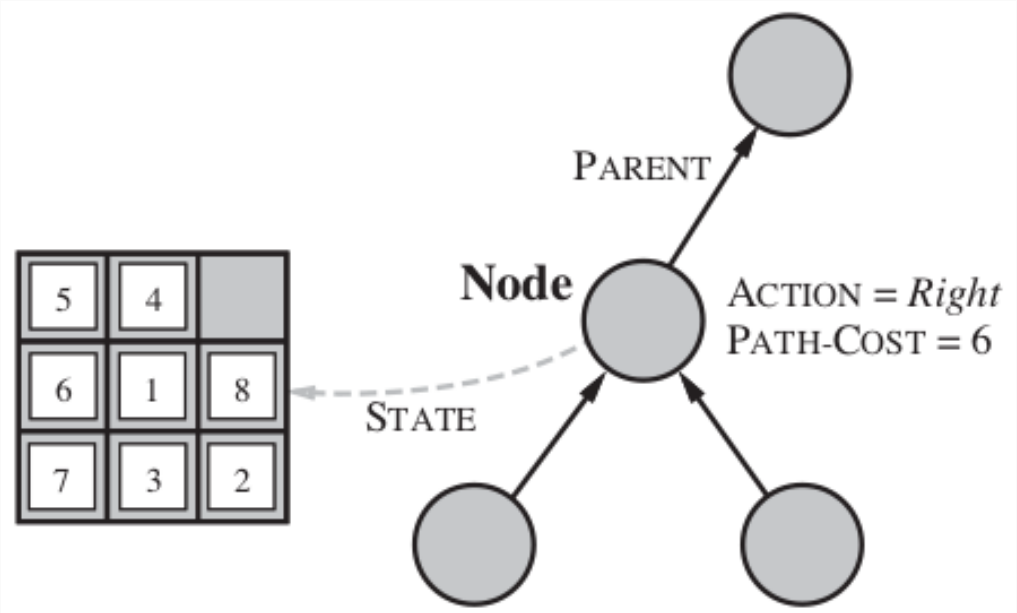
État vs. Nœud

- État : représentation d'une configuration physique du monde
- Nœud : structure de données qui est partie intégrante de l'arbre/graphe de recherche et qui inclue :
  - l'état
  - le parent, i.e. le nœud père
  - l'action réalisée pour obtenir l'état contenu dans le nœud
  - le coût pour atteindre l'état contenu dans le nœud depuis l'état initial



État vs. Nœud

- État : représentation d'une configuration physique du monde
- Nœud : structure de données qui est partie intégrante de l'arbre/graphe de recherche et qui inclue :
  - l'état
  - le parent, i.e. le nœud père
  - l'action réalisée pour obtenir l'état contenu dans le nœud
  - le coût pour atteindre l'état contenu dans le nœud depuis l'état initial
  - la profondeur du nœud, i.e., la distance entre le nœud et la racine



Stratégie de recherche

- Stratégie de recherche = ordre dans lequel les nœuds sont développés

Stratégie de recherche

- Stratégie de recherche = ordre dans lequel les nœuds sont développés
- Une stratégie s'évalue en fonction de 4 dimensions :

Stratégie de recherche

- Stratégie de recherche = ordre dans lequel les nœuds sont développés
- Une stratégie s'évalue en fonction de 4 dimensions :
  - complétude : est ce que cette stratégie trouve toujours une solution si elle existe ?

Stratégie de recherche

- Stratégie de recherche = ordre dans lequel les nœuds sont développés
- Une stratégie s'évalue en fonction de 4 dimensions :
  - complétude : est ce que cette stratégie trouve toujours une solution si elle existe ?
  - complexité en temps : le nombre de nœuds créés

Stratégie de recherche

- Stratégie de recherche = ordre dans lequel les nœuds sont développés
- Une stratégie s'évalue en fonction de 4 dimensions :
  - complétude : est ce que cette stratégie trouve toujours une solution si elle existe ?
  - complexité en temps : le nombre de nœuds créés
  - complexité en mémoire : le nombre maximum de nœuds en mémoire

Stratégie de recherche

- Stratégie de recherche = ordre dans lequel les nœuds sont développés
- Une stratégie s'évalue en fonction de 4 dimensions :
  - complétude : est ce que cette stratégie trouve toujours une solution si elle existe ?
  - complexité en temps : le nombre de nœuds créés
  - complexité en mémoire : le nombre maximum de nœuds en mémoire
  - optimalité : est ce que la stratégie trouve toujours la solution la moins coûteuse ?

Stratégie de recherche

- Stratégie de recherche = ordre dans lequel les nœuds sont développés
- Une stratégie s'évalue en fonction de 4 dimensions :
  - complétude : est ce que cette stratégie trouve toujours une solution si elle existe ?
  - complexité en temps : le nombre de nœuds créés
  - complexité en mémoire : le nombre maximum de nœuds en mémoire
  - optimalité : est ce que la stratégie trouve toujours la solution la moins coûteuse ?
- Complexité en temps et en mémoire se mesure en termes de :

Stratégie de recherche

- Stratégie de recherche = ordre dans lequel les nœuds sont développés
- Une stratégie s'évalue en fonction de 4 dimensions :
  - complétude : est ce que cette stratégie trouve toujours une solution si elle existe ?
  - complexité en temps : le nombre de nœuds créés
  - complexité en mémoire : le nombre maximum de nœuds en mémoire
  - optimalité : est ce que la stratégie trouve toujours la solution la moins coûteuse ?
- Complexité en temps et en mémoire se mesure en termes de :
  - b : facteur maximum de branchement de l'arbre de recherche, i.e., le nombre maximum de fils des nœuds de l'arbre de recherche

Stratégie de recherche

- Stratégie de recherche = ordre dans lequel les nœuds sont développés
- Une stratégie s'évalue en fonction de 4 dimensions :
  - complétude : est ce que cette stratégie trouve toujours une solution si elle existe ?
  - complexité en temps : le nombre de nœuds créés
  - complexité en mémoire : le nombre maximum de nœuds en mémoire
  - optimalité : est ce que la stratégie trouve toujours la solution la moins coûteuse ?
- Complexité en temps et en mémoire se mesure en termes de :
  - b : facteur maximum de branchement de l'arbre de recherche, i.e., le nombre maximum de fils des nœuds de l'arbre de recherche
  - d : profondeur de la solution la moins coûteuse

Stratégie de recherche

- Stratégie de recherche = ordre dans lequel les nœuds sont développés
- Une stratégie s'évalue en fonction de 4 dimensions :
  - complétude : est ce que cette stratégie trouve toujours une solution si elle existe ?
  - complexité en temps : le nombre de nœuds créés
  - complexité en mémoire : le nombre maximum de nœuds en mémoire
  - optimalité : est ce que la stratégie trouve toujours la solution la moins coûteuse ?
- Complexité en temps et en mémoire se mesure en termes de :
  - b : facteur maximum de branchement de l'arbre de recherche, i.e., le nombre maximum de fils des nœuds de l'arbre de recherche
  - d : profondeur de la solution la moins coûteuse
  - m : profondeur maximale de l'arbre de recherche

Stratégie de recherche

- Stratégie de recherche = ordre dans lequel les nœuds sont développés
- Une stratégie s'évalue en fonction de 4 dimensions :
  - complétude : est ce que cette stratégie trouve toujours une solution si elle existe ?
  - complexité en temps : le nombre de nœuds créés
  - complexité en mémoire : le nombre maximum de nœuds en mémoire
  - optimalité : est ce que la stratégie trouve toujours la solution la moins coûteuse ?
- Complexité en temps et en mémoire se mesure en termes de :
  - b : facteur maximum de branchement de l'arbre de recherche, i.e., le nombre maximum de fils des nœuds de l'arbre de recherche
  - d : profondeur de la solution la moins coûteuse
  - m : profondeur maximale de l'arbre de recherche
    - ⚠ peut-être ∞

Recherche

Recherche non-informées (aveugles)

Stratégie de recherche non-informées

- Aucune connaissance du domaine !

Stratégie de recherche non-informées

- Aucune connaissance du domaine !
- Stratégies :

Stratégie de recherche non-informées

- Aucune connaissance du domaine !
- Stratégies :
  - Breadth-first search (BFS)
    - $\Rightarrow$ parcours en largeur

Stratégie de recherche non-informées

- Aucune connaissance du domaine !
- Stratégies :
  - Breadth-first search (BFS)
    - ⇒ parcours en largeur
  - Depth-first search (DFS)
    - ⇒ parcours en profondeur

Stratégie de recherche non-informées

- Aucune connaissance du domaine !
- Stratégies :
  - Breadth-first search (BFS)
    - ⇒ parcours en largeur
  - Depth-first search (DFS)
    - ⇒ parcours en profondeur
  - Depth-limited search (DLS)
    - ⇒ parcours en profondeur limitée

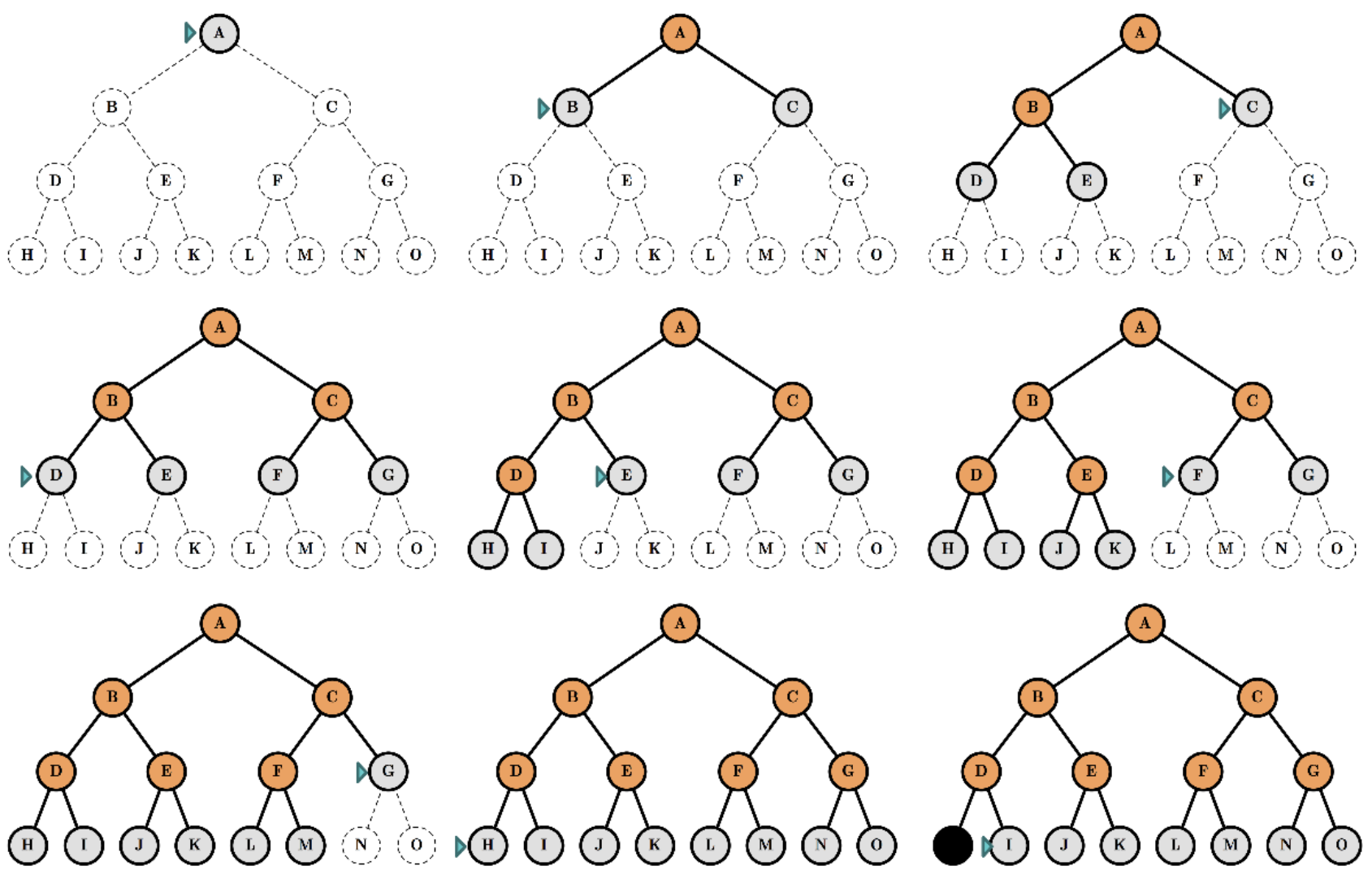
Stratégie de recherche non-informées

- Aucune connaissance du domaine !
- Stratégies :
  - Breadth-first search (BFS)
    - ⇒ parcours en largeur
  - Depth-first search (DFS)
    - ⇒ parcours en profondeur
  - Depth-limited search (DLS)
    - ⇒ parcours en profondeur limitée
  - Iterative-deepening search (IDS)
    - ⇒ parcours itératif en profondeur

Stratégie de recherche non-informées

- Aucune connaissance du domaine !
- Stratégies :
  - Breadth-first search (BFS)
    - ⇒ parcours en largeur
  - Depth-first search (DFS)
    - ⇒ parcours en profondeur
  - Depth-limited search (DLS)
    - ⇒ parcours en profondeur limitée
  - Iterative-deepening search (IDS)
    - ⇒ parcours itératif en profondeur
  - Uniform-cost search (UCS)
    - ⇒ parcours à coût uniforme

Breadth-first search (BFS)



Breadth-first search (BFS)

```
function BREADTH-FIRST-SEARCH(problem) returns a solution, or failure
    node ← a node with STATE = problem.INITIAL-STATE, PATH-COST = 0
    if problem.GOAL-TEST(node.STATE) then return SOLUTION(node)
    frontier ← a FIFO queue with node as the only element
    explored ← an empty set
    loop do
        if EMPTY?(frontier) then return failure
        node ← POP(frontier)   /* chooses the shallowest node in frontier */
        add node.STATE to explored
        for each action in problem.ACTIONS(node.STATE) do
            child ← CHILD-NODE(problem, node, action)
            if child.STATE is not in explored or frontier then
                if problem.GOAL-TEST(child.STATE) then return SOLUTION(child)
                frontier ← INSERT(child, frontier)
```

Breadth-first search (BFS)

- complétude : Oui (si b est fini)

Breadth-first search (BFS)

- complétude : Oui (si b est fini)
- complexité en temps : $1 + b + b^2 + b^3 + ... + b^d = O(b^d)$

Breadth-first search (BFS)

- complétude : Oui (si b est fini)
- complexité en temps : $1 + b + b^2 + b^3 + ... + b^d = O(b^d)$
- complexité en mémoire : $O(b^d)$

Breadth-first search (BFS)

- complétude : Oui (si b est fini)
- complexité en temps : $1 + b + b^2 + b^3 + ... + b^d = O(b^d)$
- complexité en mémoire : $O(b^d)$
- optimalité : Oui (si coût=1 pour toutes les actions)

Breadth-first search (BFS)

- complétude : Oui (si b est fini)
- complexité en temps : $1 + b + b^2 + b^3 + ... + b^d = O(b^d)$
- complexité en mémoire : $O(b^d)$
- optimalité : Oui (si coût=1 pour toutes les actions)

Depth	Nodes	Time	Memory
2	110	.11 milliseconds	107 kilobytes
4	11,110	11 milliseconds	10.6 megabytes
6	10^6	1.1 seconds	1 gigabyte
8	10^8	2 minutes	103 gigabytes
10	10^{10}	3 hours	10 terabytes
12	10^{12}	13 days	1 petabyte
14	10^{14}	3.5 years	99 petabytes
16	10^{16}	350 years	10 exabytes

b=10 ; 1 million nœuds/seconde ; 1 000 octets par nœuds

Breadth-first search (BFS)

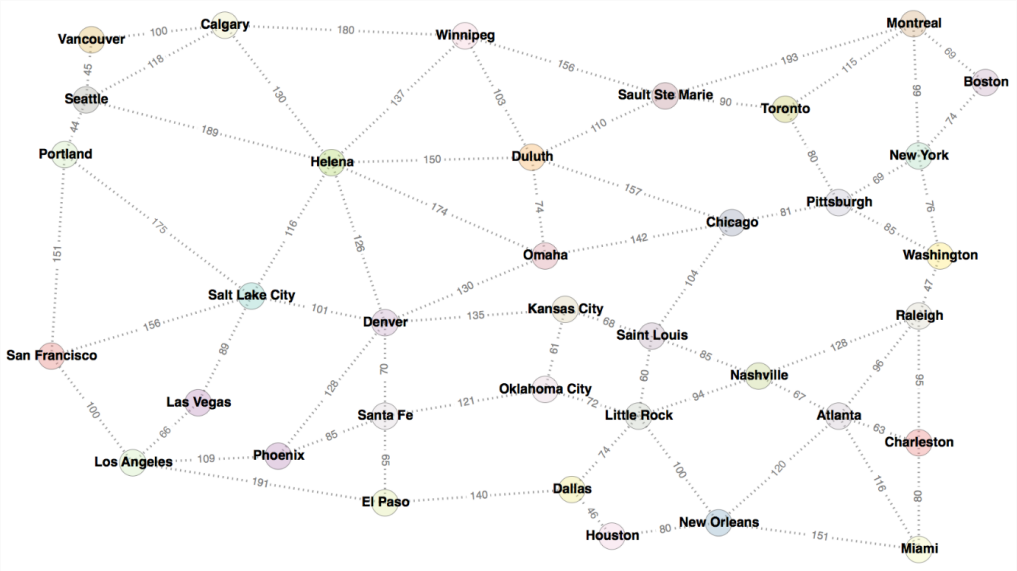
- complétude : Oui (si b est fini)
- complexité en temps : $1 + b + b^2 + b^3 + ... + b^d = O(b^d)$
- complexité en mémoire : $O(b^d)$
- optimalité : Oui (si coût=1 pour toutes les actions)

Depth	Nodes	Time	Memory
2	110	.11 milliseconds	107 kilobytes
4	11,110	11 milliseconds	10.6 megabytes
6	10^6	1.1 seconds	1 gigabyte
8	10^8	2 minutes	103 gigabytes
10	10^{10}	3 hours	10 terabytes
12	10^{12}	13 days	1 petabyte
14	10^{14}	3.5 years	99 petabytes
16	10^{16}	350 years	10 exabytes

b=10 ; 1 million nœuds/seconde ; 1 000 octets par nœuds

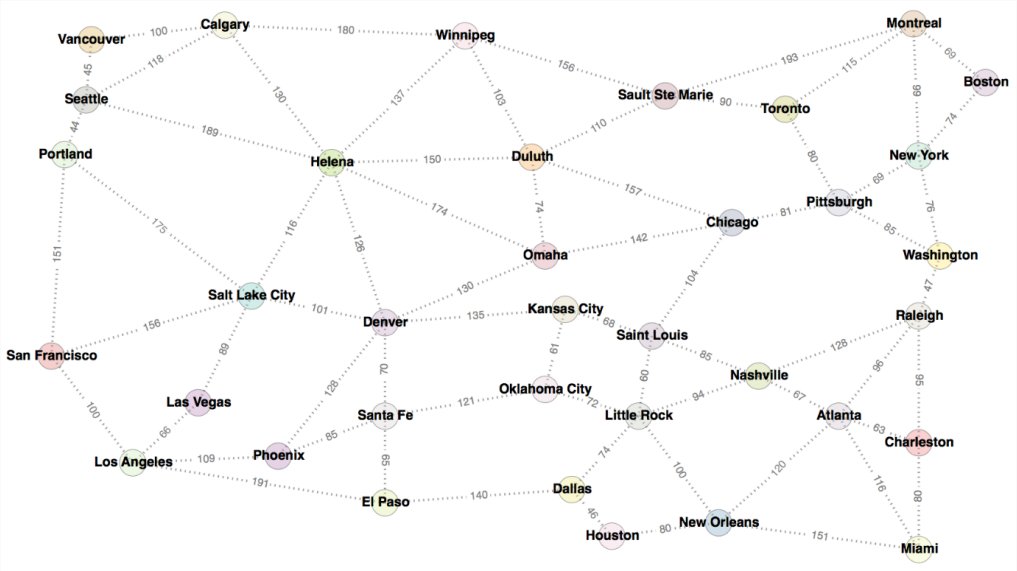
⚠complexité en temps et en mémoire beaucoup trop élevées !

Uniform-cost search (UCS)



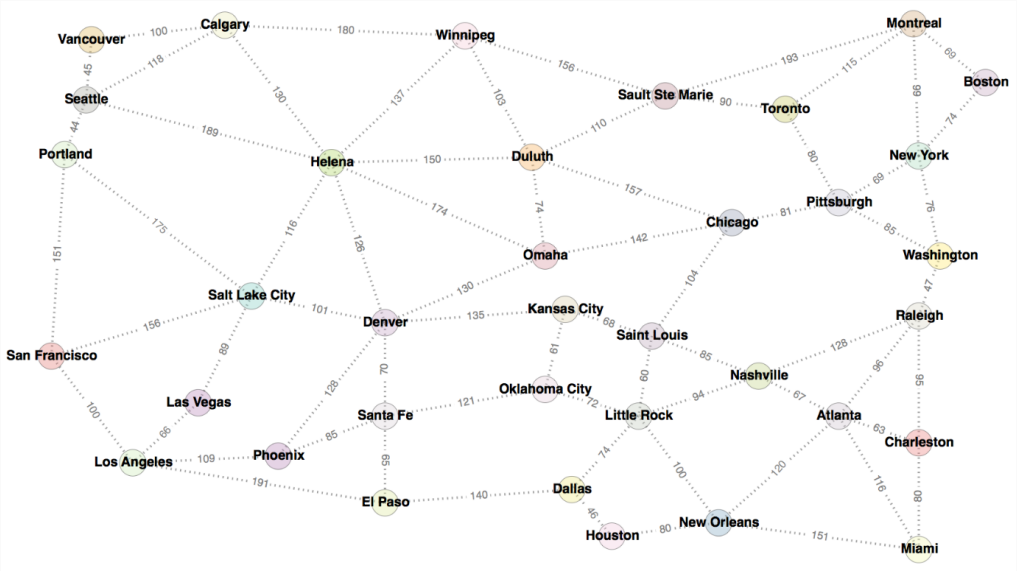
- Les arcs de l'arbre/graphe de recherche peuvent avoir des coûts différents

Uniform-cost search (UCS)



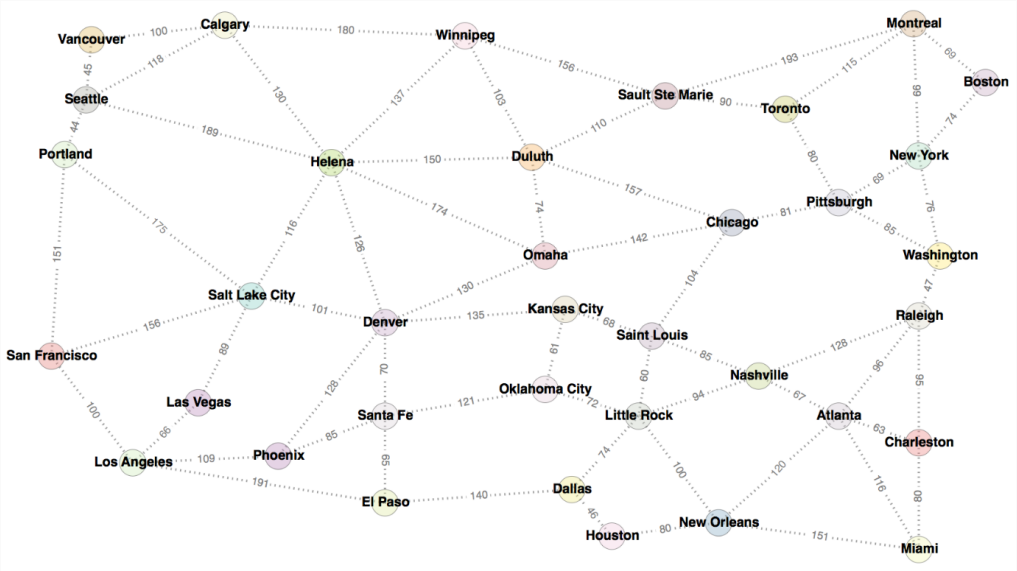
- Les arcs de l'arbre/graphe de recherche peuvent avoir des coûts différents
- BFS va trouver le plus court mais il peut être coûteux

Uniform-cost search (UCS)



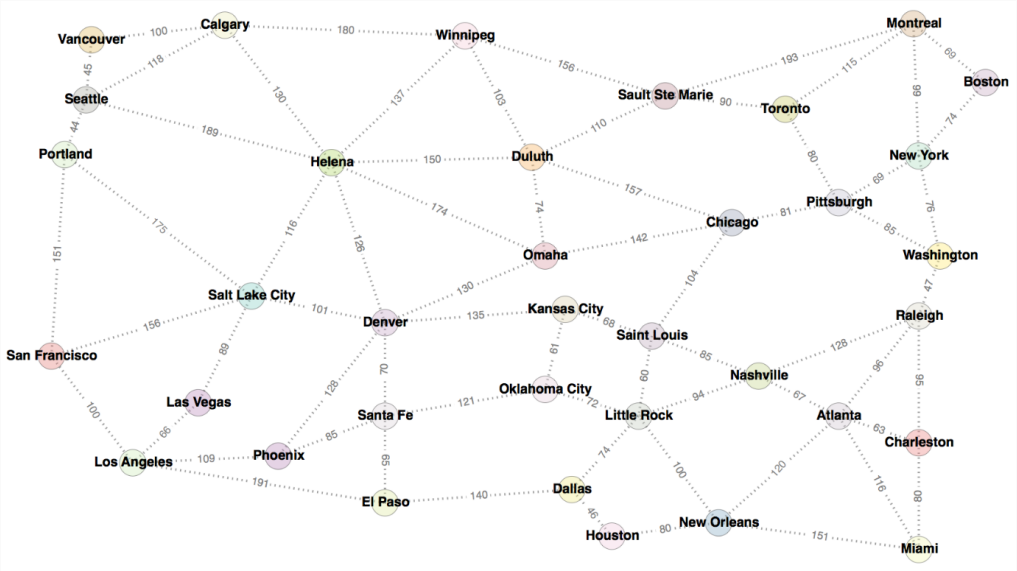
- Les arcs de l'arbre/graphe de recherche peuvent avoir des coûts différents
- BFS va trouver le plus court mais il peut être coûteux
- Nous voulons le moins coûteux :

Uniform-cost search (UCS)



- Les arcs de l'arbre/graphe de recherche peuvent avoir des coûts différents
- BFS va trouver le plus court mais il peut être coûteux
- Nous voulons le moins coûteux :
  - ⇒ Modification de BFS : On étend le nœud avec le coût de chemin le plus faible

Uniform-cost search (UCS)



- Les arcs de l'arbre/graphe de recherche peuvent avoir des coûts différents
- BFS va trouver le plus court mais il peut être coûteux
- Nous voulons le moins coûteux :
  - ⇒ Modification de BFS : On étend le nœud avec le coût de chemin le plus faible
    - Exploration par coût croissant

Uniform-cost search (UCS)

function UNIFORM-COST-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure

```
node ← a node with STATE = problem.INITIAL-STATE, PATH-COST = 0
frontier ← a priority queue ordered by PATH-COST, with node as the only element
explored ← an empty set
loop do
    if EMPTY?(frontier) then return failure
    node ← POP(frontier)   /* chooses the lowest-cost node in frontier */
    if problem.GOAL-TEST(node.STATE) then return SOLUTION(node)
    add node.STATE to explored
    for each action in problem.ACTIONS(node.STATE) do
        child ← CHILD-NODE(problem, node, action)
        if child.STATE is not in explored or frontier then
            frontier ← INSERT(child, frontier)
        else if child.STATE is in frontier with higher PATH-COST then
            replace that frontier node with child
```

Uniform-cost search (UCS)

- complétude : Oui (si la solution a un coût fini)

Uniform-cost search (UCS)

- complétude : Oui (si la solution a un coût fini)
- complexité en temps :

Uniform-cost search (UCS)

- complétude : Oui (si la solution a un coût fini)
- complexité en temps :
  - Soit C^* : coût de la solution optimale

Uniform-cost search (UCS)

- complétude : Oui (si la solution a un coût fini)
- complexité en temps :
  - Soit C^* : coût de la solution optimale
  - Chaque action coûte au moins ϵ (coût minimum)

Uniform-cost search (UCS)

- complétude : Oui (si la solution a un coût fini)
- complexité en temps :
  - Soit C^* : coût de la solution optimale
  - Chaque action coûte au moins ϵ (coût minimum)
  - La profondeur maximale de la solution est au pire C^*/ϵ

Uniform-cost search (UCS)

- complétude : Oui (si la solution a un coût fini)
- complexité en temps :
  - Soit C^* : coût de la solution optimale
  - Chaque action coûte au moins ϵ (coût minimum)
  - La profondeur maximale de la solution est au pire C^*/ϵ
  - $O(b^{\frac{C^*}{epsilon}})$

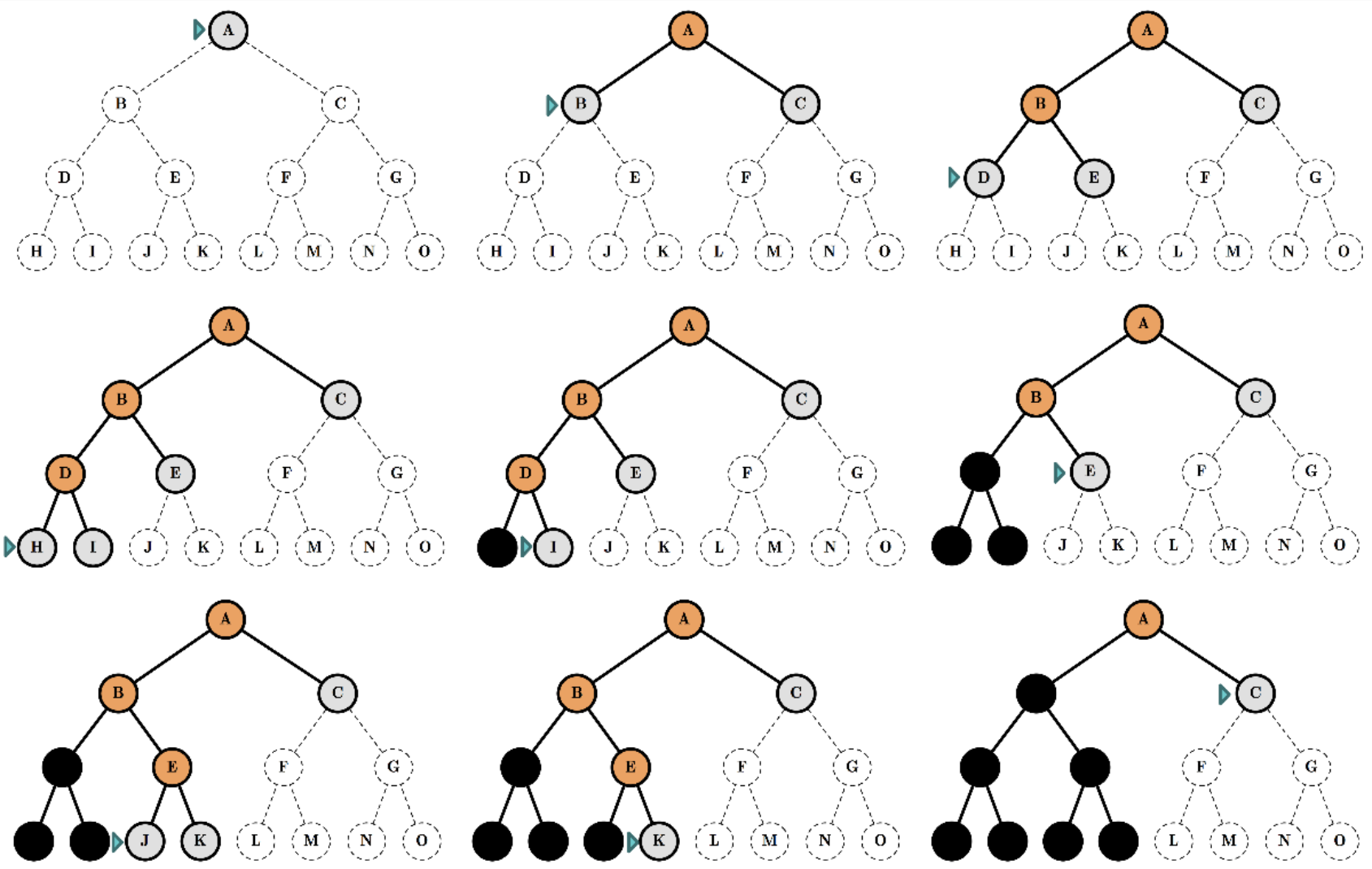
Uniform-cost search (UCS)

- complétude : Oui (si la solution a un coût fini)
- complexité en temps :
  - Soit C^* : coût de la solution optimale
  - Chaque action coûte au moins ϵ (coût minimum)
  - La profondeur maximale de la solution est au pire C^*/ϵ
  - $O(b^{\frac{C^*}{epsilon}})$
- complexité en mémoire : $O(b^{\frac{C^*}{epsilon}})$

Uniform-cost search (UCS)

- complétude : Oui (si la solution a un coût fini)
- complexité en temps :
  - Soit C^* : coût de la solution optimale
  - Chaque action coûte au moins ϵ (coût minimum)
  - La profondeur maximale de la solution est au pire C^*/ϵ
  - $O(b^{\frac{C^*}{epsilon}})$
- complexité en mémoire : $O(b^{\frac{C^*}{epsilon}})$
- optimalité : Oui

Depth-first search (DFS)



Depth-first search (DFS)

- complétude : Non

Depth-first search (DFS)

- complétude : Non
  - Problème dans les espaces de profondeur infini

Depth-first search (DFS)

- complétude : Non
  - Problème dans les espaces de profondeur infini
  - Problème dans les espaces avec boucles

Depth-first search (DFS)

- complétude : Non
  - Problème dans les espaces de profondeur infini
  - Problème dans les espaces avec boucles
- complexité en temps : $1 + b + b^2 + b^3 + ... + b^m = O(b^m)$

Depth-first search (DFS)

- complétude : Non
  - Problème dans les espaces de profondeur infini
  - Problème dans les espaces avec boucles
- complexité en temps : $1 + b + b^2 + b^3 + ... + b^m = O(b^m)$
  - Mauvais si $m > d$

Depth-first search (DFS)

- complétude : Non
  - Problème dans les espaces de profondeur infini
  - Problème dans les espaces avec boucles
- complexité en temps : $1 + b + b^2 + b^3 + ... + b^m = O(b^m)$
  - Mauvais si $m > d$
- complexité en mémoire : $O(bm)$ complexité mémoire linéaire

Depth-first search (DFS)

- complétude : Non
  - Problème dans les espaces de profondeur infini
  - Problème dans les espaces avec boucles
- complexité en temps : $1 + b + b^2 + b^3 + ... + b^m = O(b^m)$
  - Mauvais si $m > d$
- complexité en mémoire : $O(bm)$ complexité mémoire linéaire
  - Stocke seulement un chemin depuis la racine (+les nœuds non développés)

Depth-first search (DFS)

- complétude : Non
  - Problème dans les espaces de profondeur infini
  - Problème dans les espaces avec boucles
- complexité en temps : $1 + b + b^2 + b^3 + ... + b^m = O(b^m)$
  - Mauvais si $m > d$
- complexité en mémoire : $O(bm)$ complexité mémoire linéaire
  - Stocke seulement un chemin depuis la racine (+les nœuds non développés)
- optimalité : Non

Depth-limited search (DLS)

- DFS avec une profondeur maximum l

```
function DEPTH-LIMITED-SEARCH(problem, limit) returns a solution, or failure/cutoff
  return RECURSIVE-DLS(MAKE-NODE(problem.INITIAL-STATE), problem, limit)

function RECURSIVE-DLS(node, problem, limit) returns a solution, or failure/cutoff
  if problem.GOAL-TEST(node.STATE) then return SOLUTION(node)
  else if limit = 0 then return cutoff
  else
      cutoff_occurred? ← false
      for each action in problem.ACTIONS(node.STATE) do
          child ← CHILD-NODE(problem, node, action)
          result ← RECURSIVE-DLS(child, problem, limit − 1)
          if result = cutoff then cutoff_occurred? ← true
          else if result ≠ failure then return result
      if cutoff_occurred? then return cutoff else return failure
```

Depth-limited search (DLS)

- DFS avec une profondeur maximum l
  - Nœuds à la profondeur l n'ont pas de successeur

```
function DEPTH-LIMITED-SEARCH(problem, limit) returns a solution, or failure/cutoff
  return RECURSIVE-DLS(MAKE-NODE(problem.INITIAL-STATE), problem, limit)

function RECURSIVE-DLS(node, problem, limit) returns a solution, or failure/cutoff
  if problem.GOAL-TEST(node.STATE) then return SOLUTION(node)
  else if limit = 0 then return cutoff
  else
      cutoff_occurred? ← false
      for each action in problem.ACTIONS(node.STATE) do
          child ← CHILD-NODE(problem, node, action)
          result ← RECURSIVE-DLS(child, problem, limit − 1)
          if result = cutoff then cutoff_occurred? ← true
          else if result ≠ failure then return result
      if cutoff_occurred? then return cutoff else return failure
```

Depth-limited search (DLS)

- complétude : Seulement si $l \geq d$

Depth-limited search (DLS)

- complétude : Seulement si $l \geq d$
- complexité en temps : $O(b^l)$

Depth-limited search (DLS)

- complétude : Seulement si $l \geq d$
- complexité en temps : $O(b^l)$
- complexité en mémoire : $O(bl)$

Depth-limited search (DLS)

- complétude : Seulement si $l \geq d$
- complexité en temps : $O(b^l)$
- complexité en mémoire : $O(bl)$
- optimalité : Non

Iterative-deepening search (IDS)

- ▷ Profondeur limitée, mais en essayant toutes les profondeurs : 0, 1, 2, 3, . . .

function ITERATIVE-DEEPENING-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure
  for *depth* = 0 **to** ∞ **do**
    result $\leftarrow$ DEPTH-LIMITED-SEARCH(*problem*, *depth*)
    if *result* $\neq$ cutoff **then return** *result*

Iterative-deepening search (IDS)

- Profondeur limitée, mais en essayant toutes les profondeurs : 0, 1, 2, 3, . . .
- Évite le problème de trouver une limite pour la recherche profondeur limitée

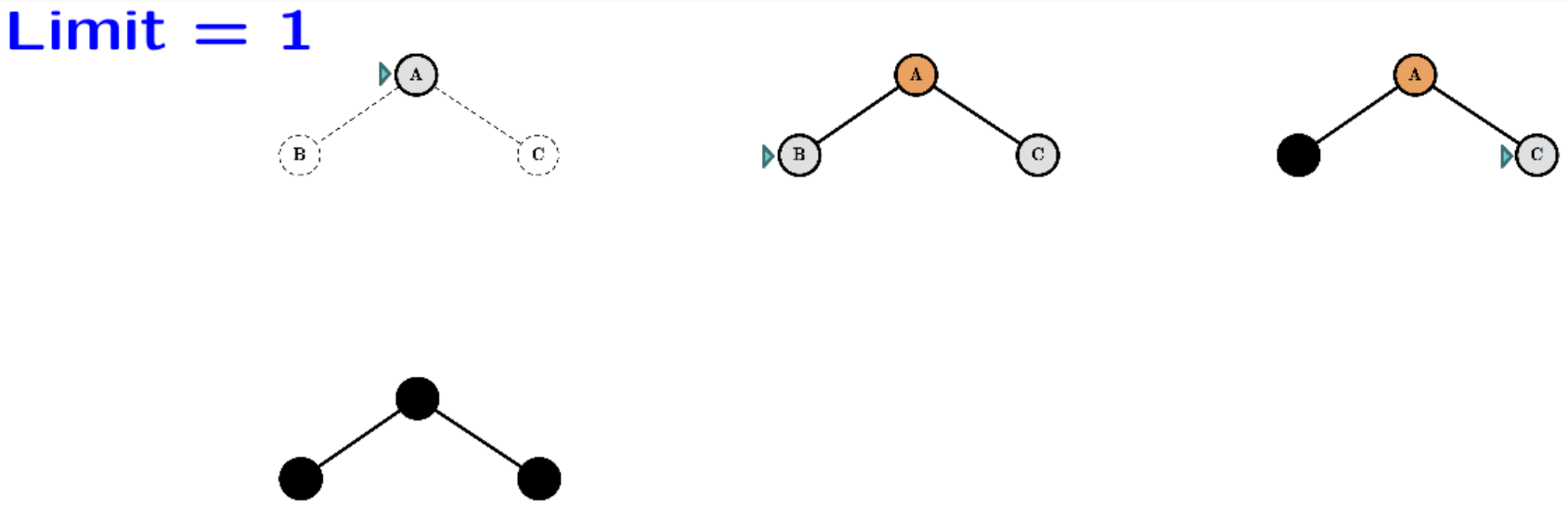
function ITERATIVE-DEEPENING-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure
  for *depth* = 0 **to** ∞ **do**
    result $\leftarrow$ DEPTH-LIMITED-SEARCH(*problem*, *depth*)
    if *result* $\neq$ cutoff **then return** *result*

Iterative-deepening search (IDS)

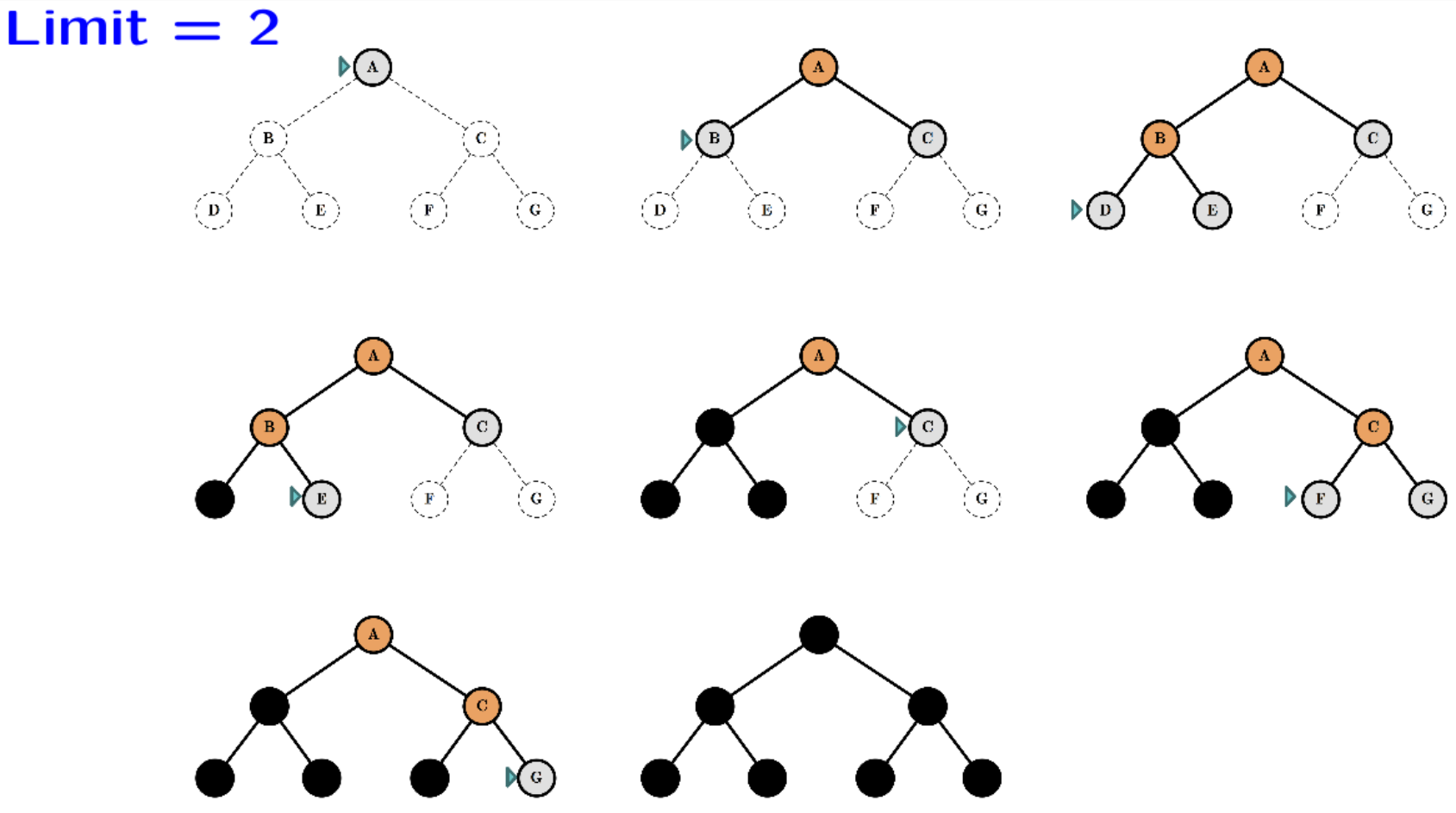
- ▷ Profondeur limitée, mais en essayant toutes les profondeurs : 0, 1, 2, 3, . . .
- ▷ Évite le problème de trouver une limite pour la recherche profondeur limitée
- ▷ Combine les avantages du parcours en largeur d'abord (complète et optimale), mais a la complexité du parcours en profondeur d'abord

function ITERATIVE-DEEPENING-SEARCH(*problem*) **returns** a solution, or failure
  for *depth* = 0 **to** ∞ **do**
    result $\leftarrow$ DEPTH-LIMITED-SEARCH(*problem*, *depth*)
    if *result* $\neq$ cutoff **then return** *result*

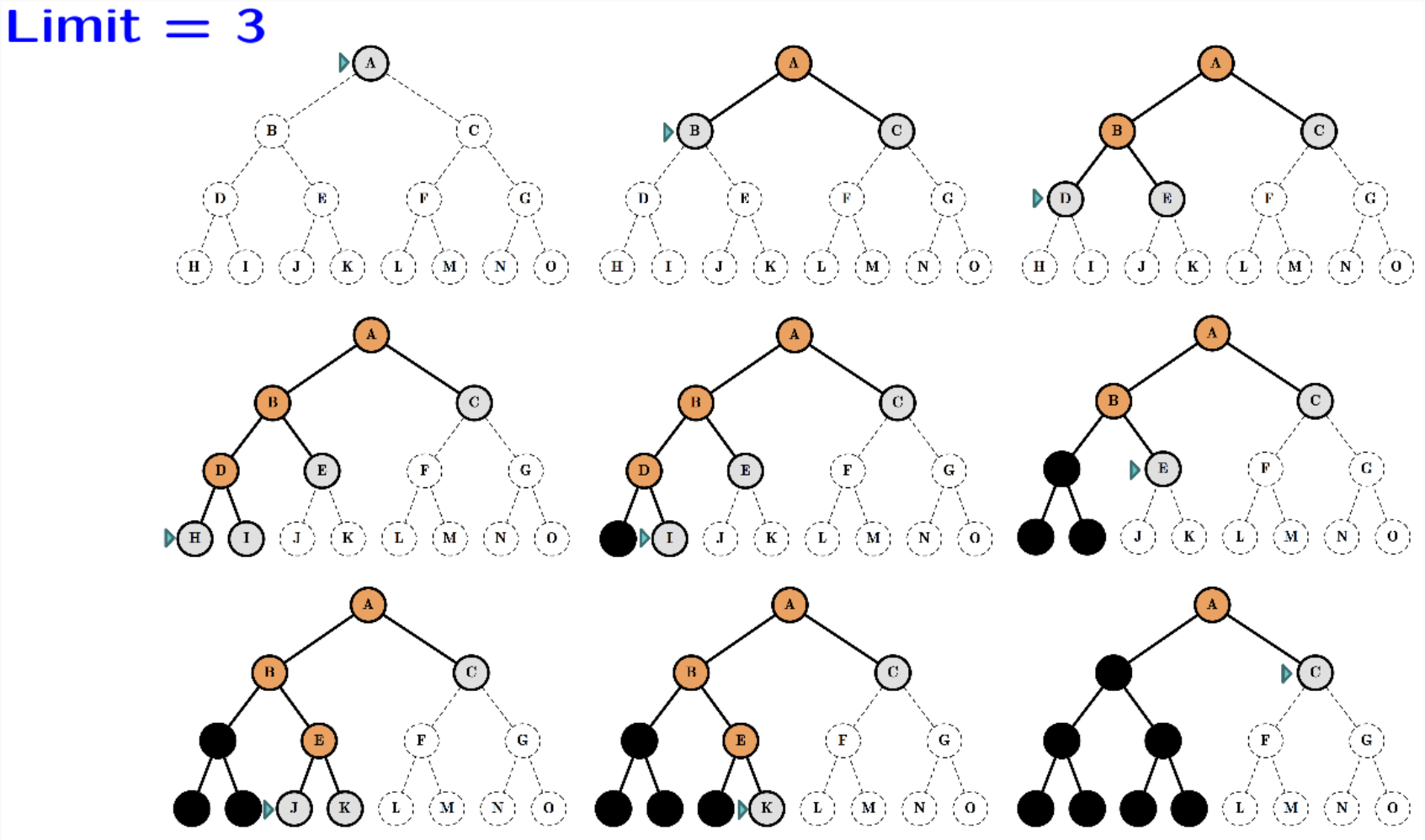
Iterative-deepening search (IDS)



Iterative-deepening search (IDS)



Iterative-deepening search (IDS)



Iterative-deepening search (IDS)

- ▷ complétude : Oui

Iterative-deepening search (IDS)

- complétude : Oui
- complexité en temps : $(d+1)b^0 + db^1 + (d1)b^2 + ... + b^d = O(b^d)$

Iterative-deepening search (IDS)

- complétude : Oui
- complexité en temps : $(d+1)b^0 + db^1 + (d1)b^2 + ... + b^d = O(b^d)$
- complexité en mémoire : $O(bd)$

Iterative-deepening search (IDS)

- complétude : Oui
- complexité en temps : $(d+1)b^0 + db^1 + (d1)b^2 + ... + b^d = O(b^d)$
- complexité en mémoire : $O(bd)$
- optimalité : Oui (si coût=1 pour toutes les actions)

Iterative-deepening search (IDS)

- ▷ complétude : Oui
- ▷ complexité en temps : $(d+1)b^0 + db^1 + (d1)b^2 + ... + b^d = O(b^d)$
- ▷ complexité en mémoire : $O(bd)$
- ▷ optimalité : Oui (si coût=1 pour toutes les actions)

⚠ impression de gaspillage car de nombreux nœuds seront développés plusieurs fois

Iterative-deepening search (IDS)

- ▷ complétude : Oui
- ▷ complexité en temps : $(d+1)b^0 + db^1 + (d1)b^2 + ... + b^d = O(b^d)$
- ▷ complexité en mémoire : $O(bd)$
- ▷ optimalité : Oui (si coût=1 pour toutes les actions)

⚠ impression de gaspillage car de nombreux nœuds seront développés plusieurs fois

⇒ Nœuds proches de la racine donc coût ”faibles”