

# Résolution de niveaux du Sokoban

---

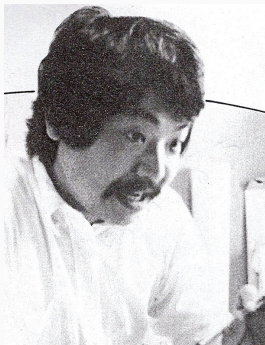
Carrez Valentin

Candidat n°31593

# Introduction

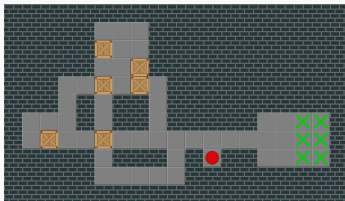
---

# Le jeu du Sokoban

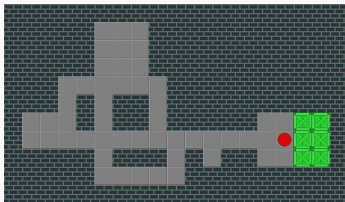


<https://shmuplations.com/wp-content/uploads/2022/03/thinkingrabbit04.jpg>

Hiroyuki Imabayashi



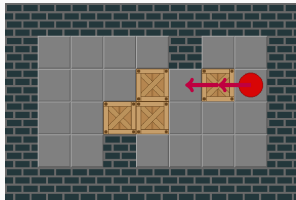
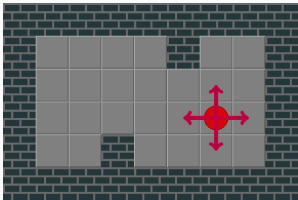
*XSokoban 1*



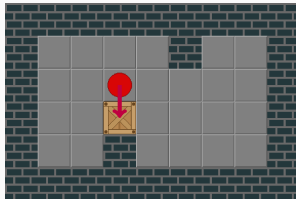
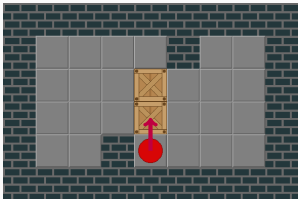
*XSokoban 1 résolu*

Problème **PSPACE-complet**

# Règles



Déplacements autorisés



Déplacements interdits

**Quelles stratégies adopter pour trouver une solution le plus rapidement possible à un niveau de Sokoban ?**

```
Welcome to sokoshell - Version 1.0  
Type 'help' to show help. More help for a command with 'help command'  
sokoshell> █
```

Introduction

Principe de résolution

Réduction de l'espace de recherche

- Analyse statique

- Analyse dynamique

Recherche dirigée par une heuristique

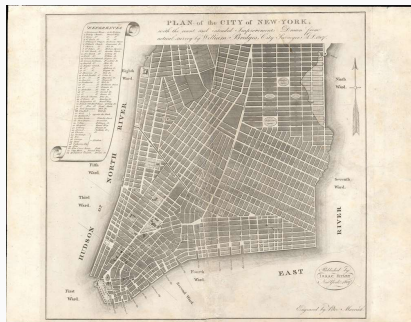
Résultats

Annexe

# Lien avec le thème de l'année



Source : *Indiana Jones et les Aventuriers de l'arche perdue* (scène de fin), Steven Spielberg, 1981  
<https://pbs.twimg.com/media/EyjVShEVEAAQZjK.jpg>



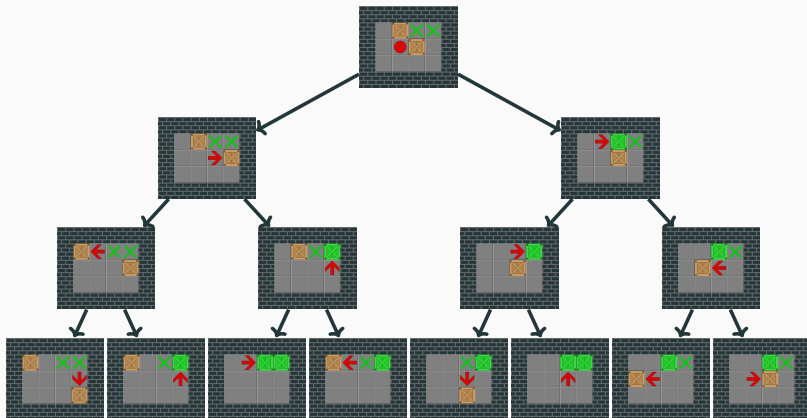
Source : <https://www.geographicus.com/mm5/graphics/00000001/L/NewYork-bridgesmaverick-1807.jpg>

# Principe de résolution

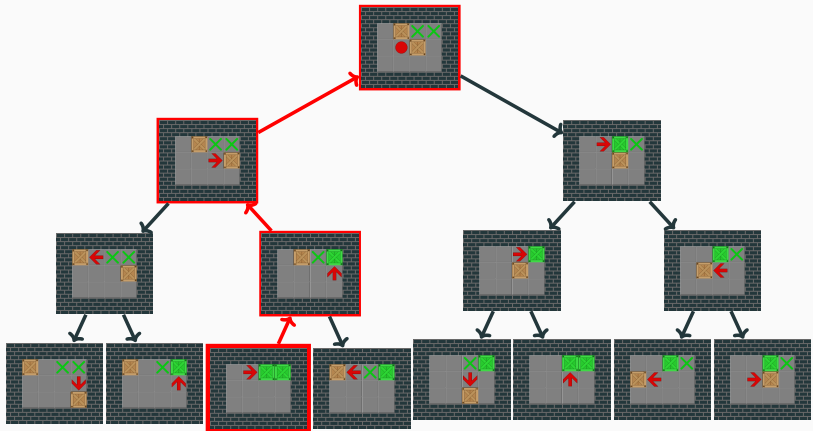
---



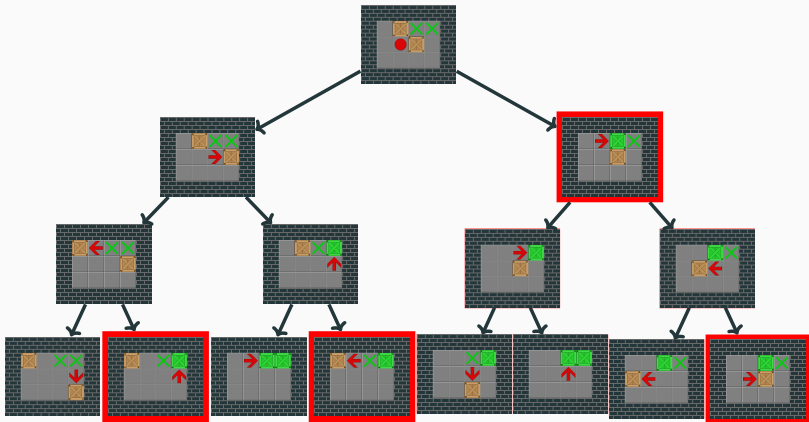
# Arbre des états



# Arbre des états



## Arbre des états



## Calcul du *hash* d'un état - Hash de Zobrist

Propriétés du **XOR** :

1.  $a \mathbf{XOR} a = 0$
2. **XOR** commutatif, associatif
3. **XOR** préserve l'aléatoire

Initialisation :

$$T = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{caisse} & \text{joueur} & \text{case} \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} 6357 & 31593 \\ -1378 & 42 \\ \vdots & \vdots \\ 93268 & -278 \end{pmatrix} & \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ wh - 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

## Calcul du *hash* d'un état - Hash de Zobrist

- $(c_1, \dots, c_n)$   $n$  caisses et  $p$  position du joueur :

$$h = \mathbf{XOR}_{i=0}^n T[c_i][0] \mathbf{XOR} T[p][1]$$

en  $\mathcal{O}(n)$

- **Connaissant le hash de l'état parent** :  $c_i \rightarrow c'_i, p \rightarrow p'$

$$h' = h \mathbf{XOR} T[c_i][0] \mathbf{XOR} T[c'_i][0] \mathbf{XOR} T[p][1] \mathbf{XOR} T[p'][1]$$

en  $\mathcal{O}(1)$

# Réduction de l'espace de recherche

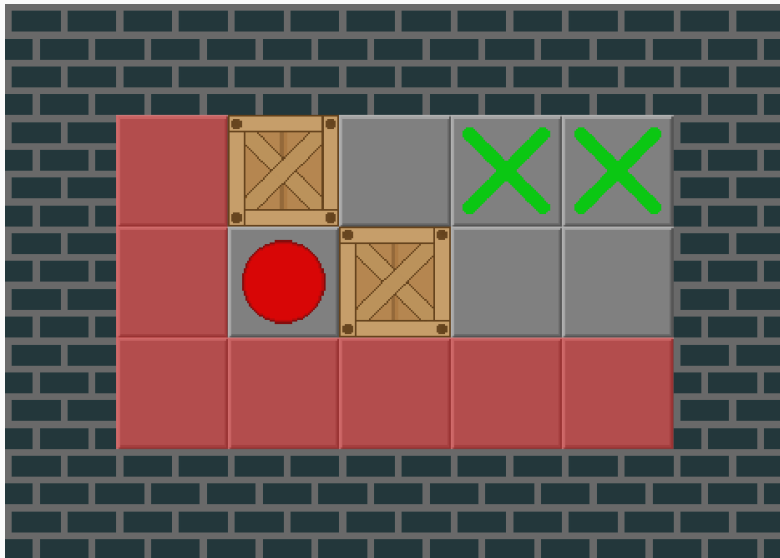
---

# Réduction de l'espace de recherche



Analyse statique

## Détection des positions mortes (*dead tiles*)

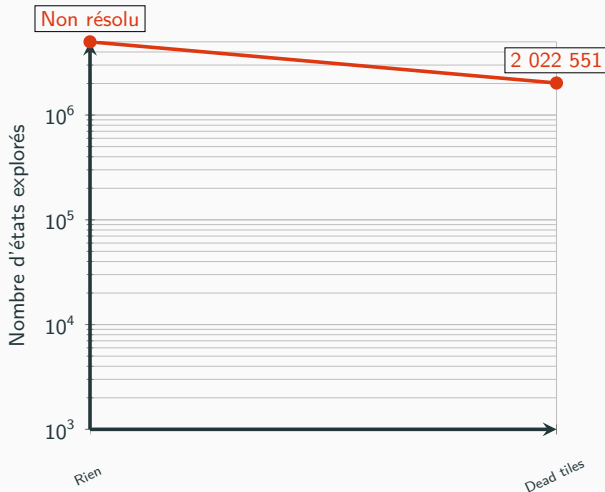




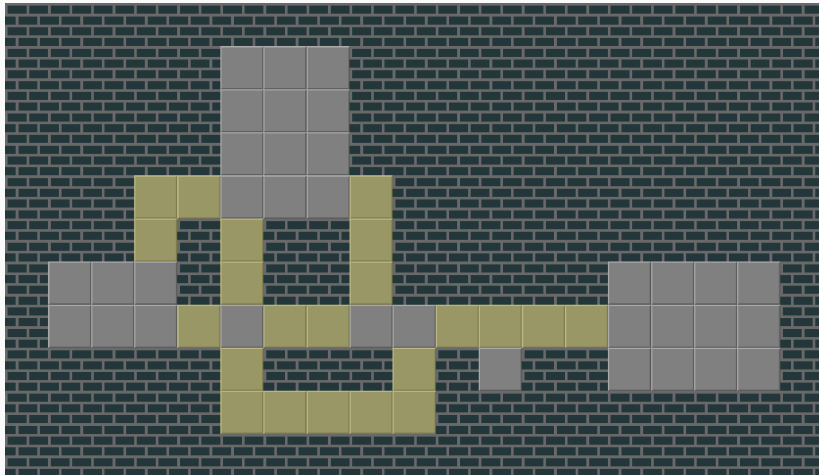
# Résultats intermédiaires

Niveaux résolus dans *XSokoban* : 1 / 90 (+ 0)

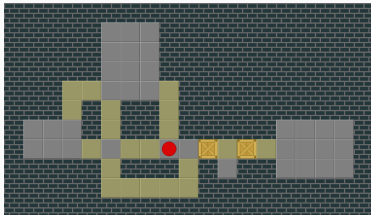
Niveau 24 du pack *Boxxle* :



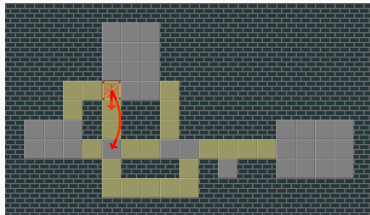
# Détection de tunnels



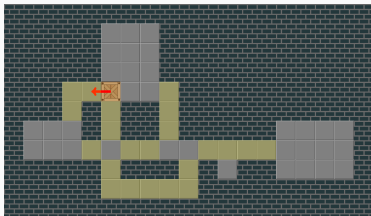
# Détection de tunnels



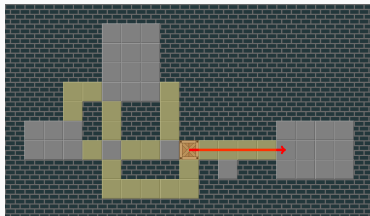
Au plus une caisse



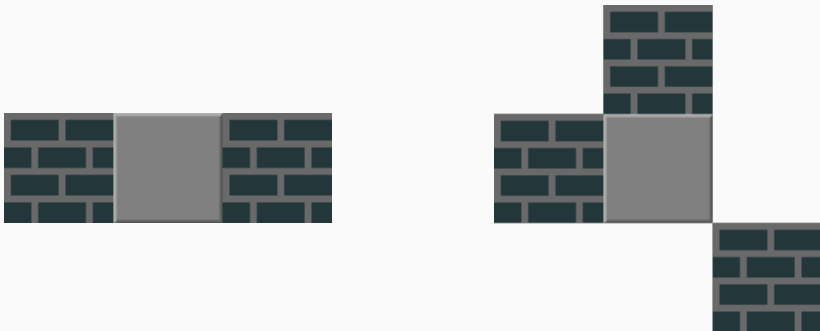
Deux états fils



Coin  $\Rightarrow$  un état fils



Tunnel *oneway*

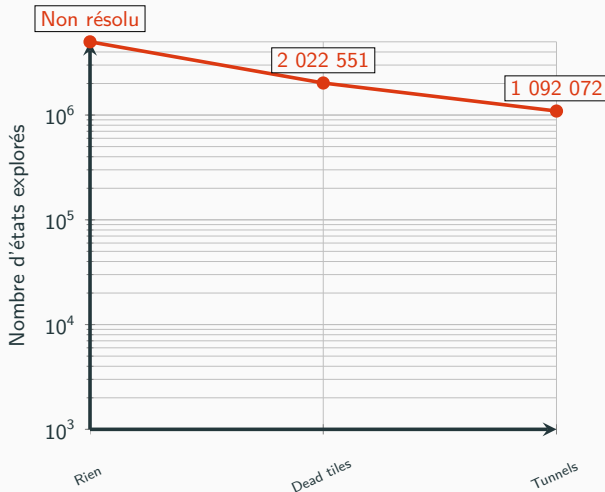


Composition d'un tunnel

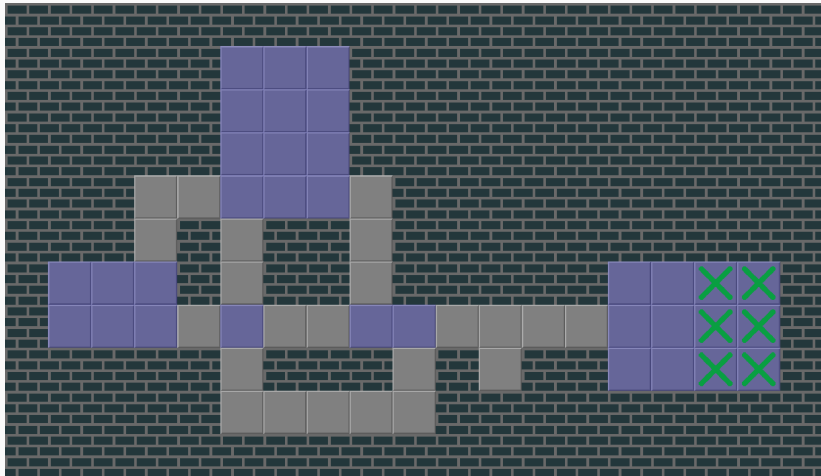
# Résultats intermédiaires

Niveaux résolus dans *XSokoban* : 1 / 90 (+ 0)

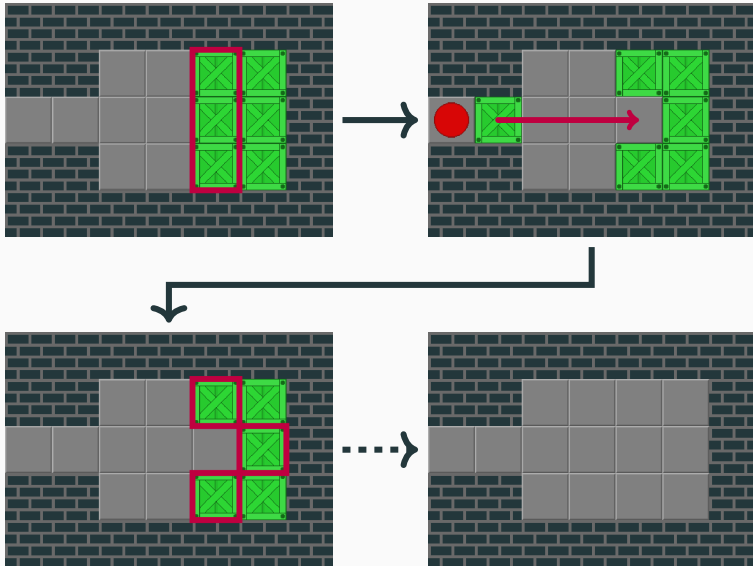
Niveau 24 du pack *Boxxle* :



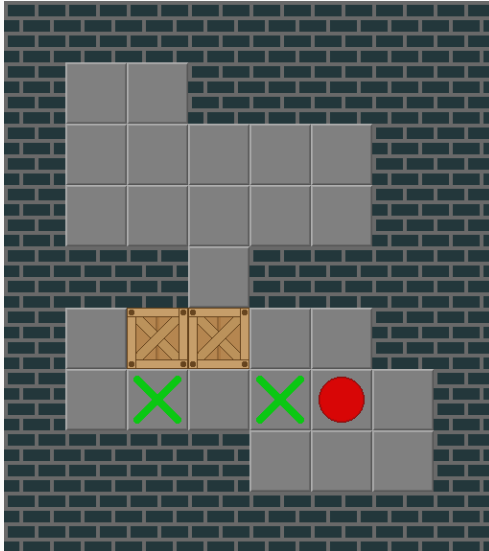
## Salles et ordre de rangement (*packing order*)



## Salles et ordre de rangement (*packing order*)



## Salles et ordre de rangement (*packing order*)

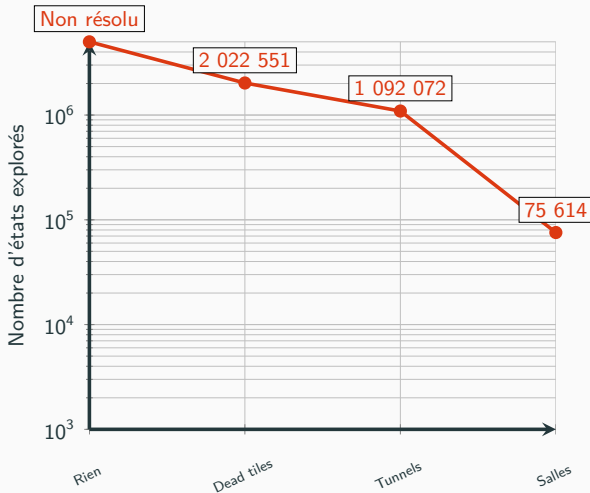




# Résultats intermédiaires

Niveaux résolus dans *XSokoban* : 1 / 90 (+ 0)

Niveau 24 du pack *Boxxle* :

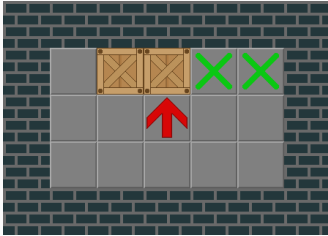


# Réduction de l'espace de recherche

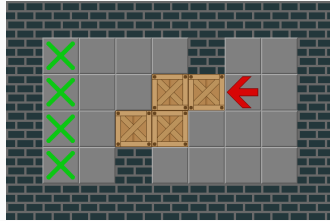


Analyse dynamique

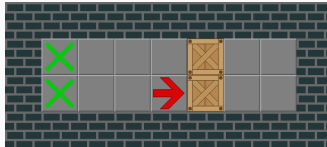
# Détection d'impasses (*deadlocks*)



(a) *Freeze deadlock n°1*



(b) *Freeze deadlock n°2*

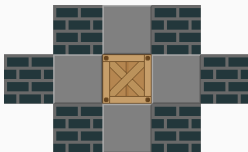


(c) *PI Corral deadlock*

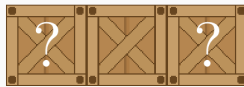
# Détection de *freeze deadlocks*



(a) Règle n°1

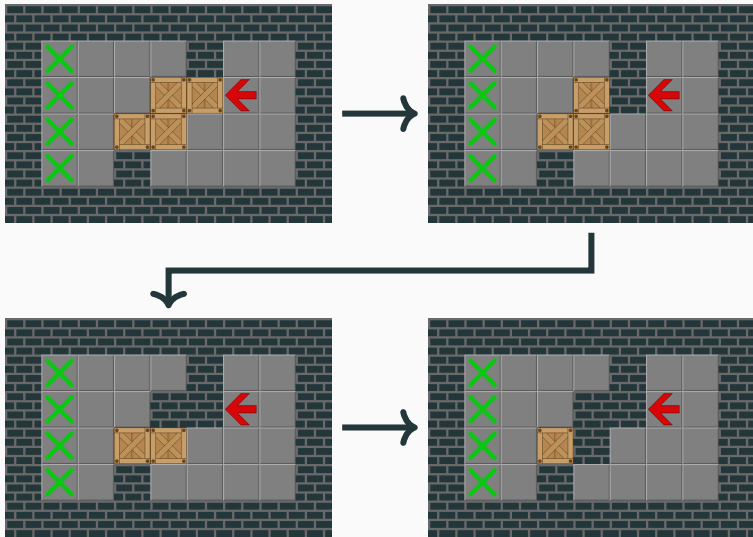


(b) Règle n°2



(c) Règle n°3

## Détection de *freeze deadlocks*

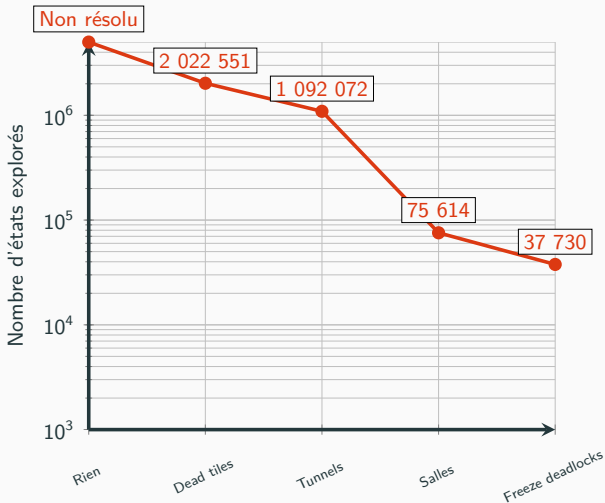


Gelée!

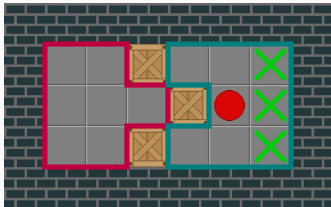
# Résultats intermédiaires

Niveaux résolus dans *XSokoban* : 2 / 90 (+ 1)

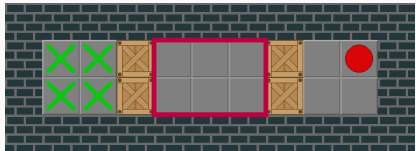
Niveau 24 du pack *Boxxle* :



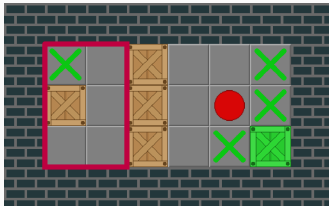
# Détection de *PI Corral* deadlocks



(a) *Corral*



(b) *I Corral*



(c) *PI Corral*

d

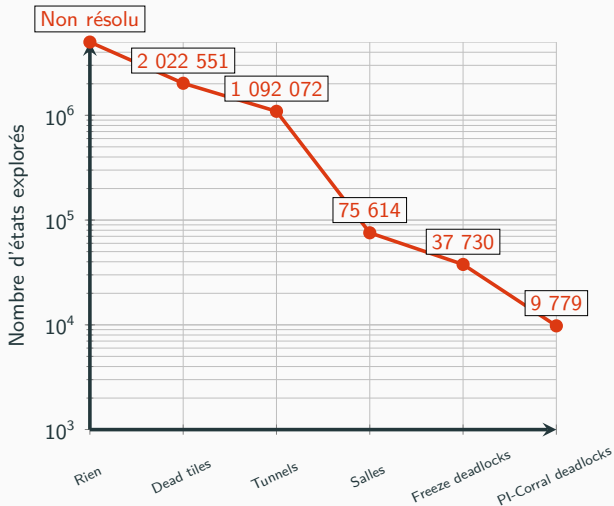


Brian Damgaard : émonde l'arbre de recherche d'au moins **20%** !

# Résultats intermédiaires

Niveaux résolus dans *XSokoban* : **6 / 90 (+ 4)**

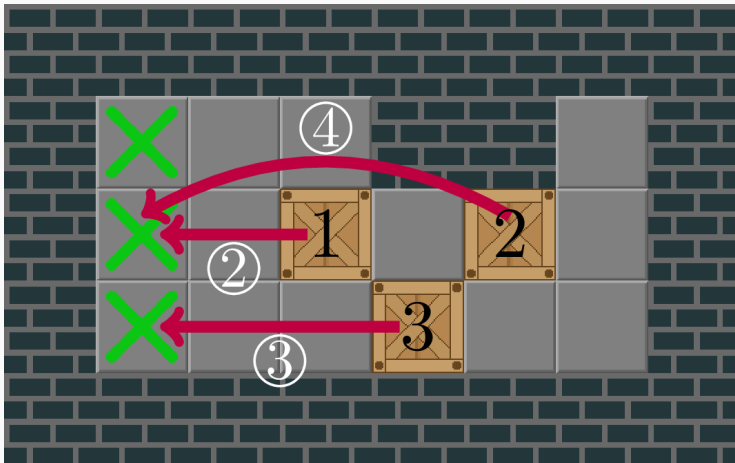
Niveau 24 du pack *Boxxle* :



## Recherche dirigée par une heuristique

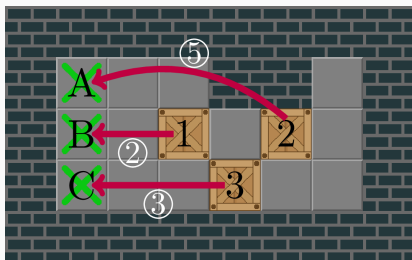


## Heuristique simple (*Simple Lower Bound*)



$$2 + 4 + 3 = 9$$

# Heuristique gloutonne (*Greedy Lower Bound*)



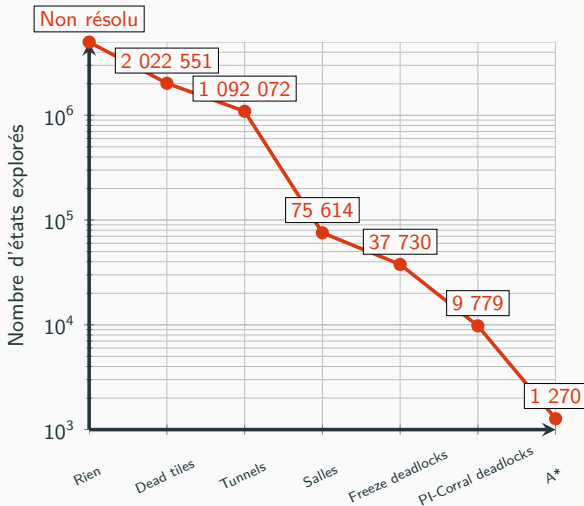
$$2 + 3 + 5 = 10$$

Caisse → Cible	Distance
<b>1 → B</b>	<b>2</b>
1 → A	3
1 → C	3
<b>3 → C</b>	<b>3</b>
2 → B	4
3 → B	4
2 → A	5
2 → C	5
<b>3 → A</b>	<b>5</b>

# Résultats intermédiaires

Niveaux résolus dans *XSokoban* : 11 / 90 (+ 5)

Niveau 24 du pack *Boxxle* :

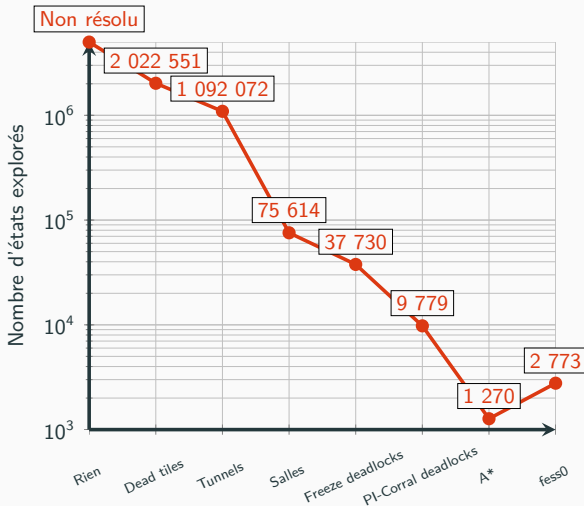


- FESS : algorithme utilisé par Festival, meilleur solveur.
- Ordre de priorité :
  - maximiser le nombre de caisses rangées.
  - minimiser le nombre de *corral*.
  - minimiser l'heuristique précédente.

# Résultats intermédiaires

Niveaux résolus dans *XSokoban* : 15 / 90 (+ 4)

Niveau 24 du pack *Boxxle* :





## Résultats



# Nombre de niveaux résolus

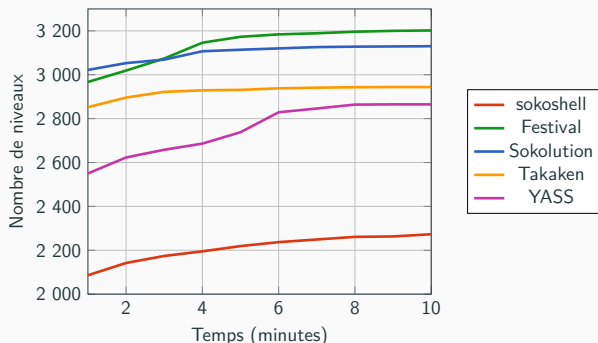
Limite de temps : 10 min. Limite de RAM : 32 Gio.

Ensemble de niveaux	XSokoban	<i>Large test suite</i>
Nombre de niveaux	90	3272
<b>A*</b>	<b>11</b>	<b>2204</b>
<b>fess0</b>	<b>15</b>	<b>2273</b>
Festival (Yaron Shoham)	90	3202
Sokolution (Florent Diedler)	90	3130
Takaken (Ken'ichiro Takahashi)	90	2944
YASS (Brian Damgaard)	89	2865

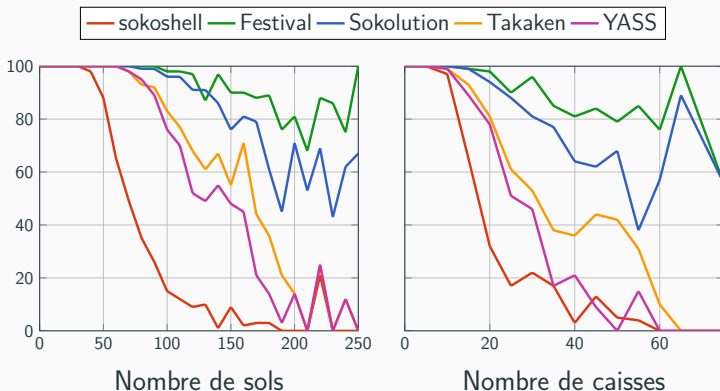
## Temps moyen passé par niveaux

Solveur	A*	fess0	Festival	Sokolution	Takaken	YASS
Temps moyen	<b>3min 28s</b>	<b>3min 16s</b>	3s	2s	7s	24s

## Nombre de niveaux résolus (cumulés) en fonction du temps



## Pourcentage de niveaux résolus selon la composition des niveaux



## Annexe



## Tableau des complexités - Statique

$c$  nombre de caisses,  $C$  nombre de cibles,  $w$  longueur et  $h$  largeur du niveau,  $t$  nombre de tunnels,  $r$  nombre de salles,  $N$  nombre d'états dans la liste des états à explorer.

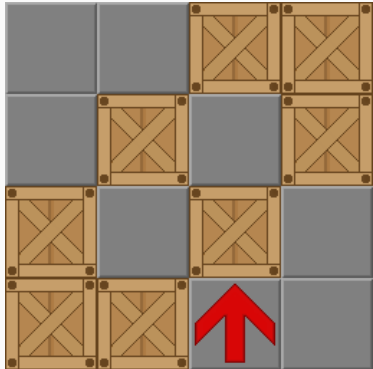
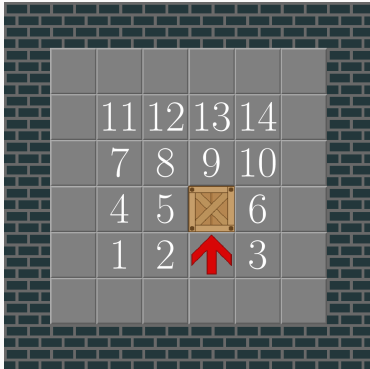
Statique	
<i>Dead tiles</i>	$\mathcal{O}((wh)^2)$
Détection des tunnels	$\mathcal{O}((wh)^2)$
Propriété <i>oneway</i> des tunnels	$\mathcal{O}(twh)$
Détection des salles	$\mathcal{O}((wh)^2)$
<i>Packing order</i>	$\mathcal{O}(rcwh)$
Précalcul des distances cibles-caisses	$\mathcal{O}(wh(Cwh + C \log C))$

## Tableau des complexités - Dynamique

$c$  nombre de caisses,  $C$  nombre de cibles,  $w$  longueur et  $h$  largeur du niveau,  $t$  nombre de tunnels,  $r$  nombre de salles,  $N$  nombre d'états dans la liste des états à explorer.

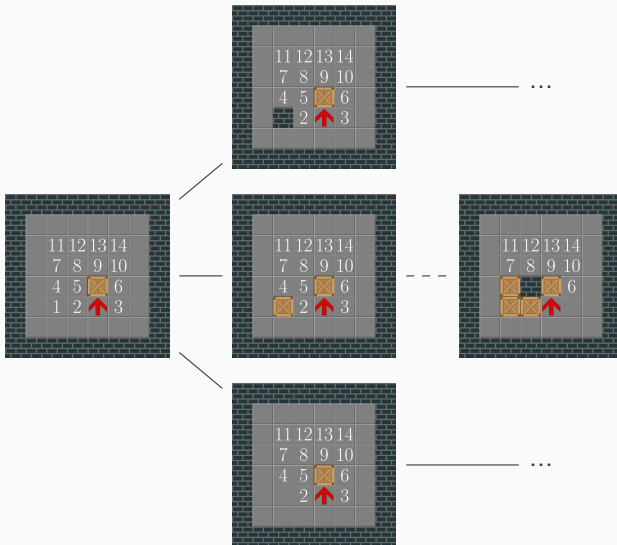
Dynamique	
<i>Freeze deadlocks</i>	$\mathcal{O}(c)$
Détection des <i>corrals</i>	$\mathcal{O}(wh)$
PI- <i>corral deadlocks</i>	Exponentielle
Table de <i>deadlocks</i>	$\mathcal{O}(1)$
Recherche des états enfants	$\mathcal{O}(crwh)$
Ajout des états enfants ( $A^*$ )	$\mathcal{O}((wh)^2 + \log N)$
Ajout des états enfants (fess0)	$\mathcal{O}(c + (wh)^2 + \log N)$

## Table de *deadlocks*



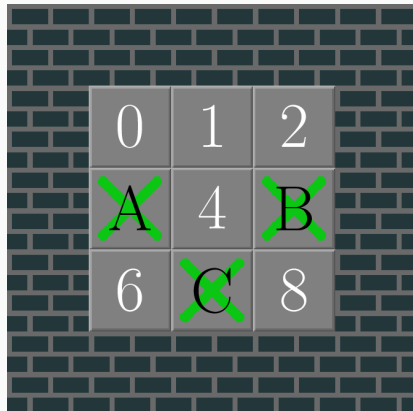


# Table de *deadlocks*



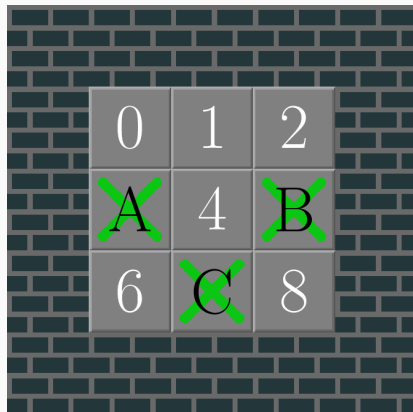
# Précalcul des distances caisses-cibles

Case	Distances		
	A	B	C
0	1	3	3
1	2	2	2
2	3	1	3
3	0	2	2
4	1	1	1
5	2	0	2
6	1	3	1
7	2	2	0
8	3	1	1

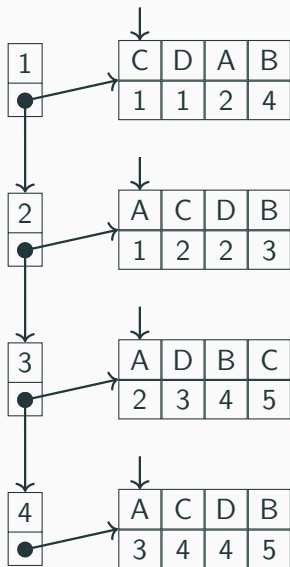


## Précalcul des distances caisses-cibles

Case	Distances triées		
0	A : 1	B : 3	C : 3
1	A : 2	B : 2	C : 2
2	B : 1	A : 3	C : 3
3	A : 0	B : 2	C : 2
4	A : 1	B : 1	C : 1
5	B : 0	A : 2	C : 2
6	A : 1	C : 1	B : 3
7	C : 0	A : 2	B : 2
8	B : 1	C : 1	A : 3

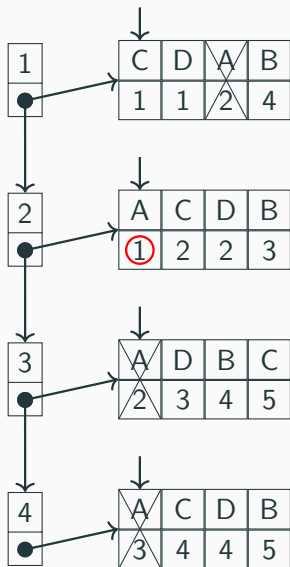


## Greedy Lower Bound en $\mathcal{O}(n^2)$



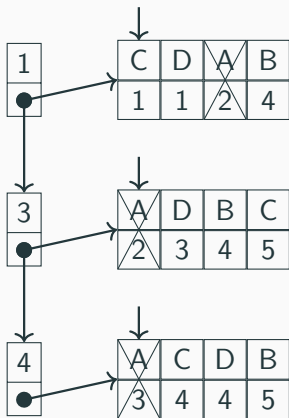
$h =$

## Greedy Lower Bound en $\mathcal{O}(n^2)$



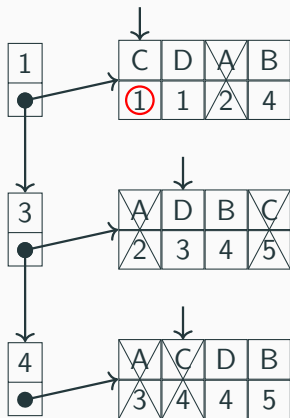
$$h = 1 +$$

## Greedy Lower Bound en $\mathcal{O}(n^2)$



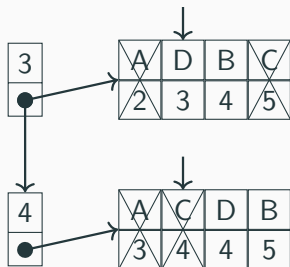
$$h = 1 +$$

## Greedy Lower Bound en $\mathcal{O}(n^2)$



$$h = 1 + 1 +$$

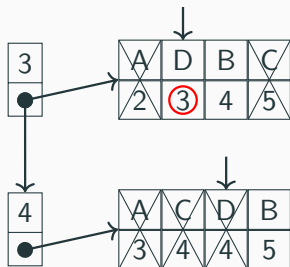
## Greedy Lower Bound en $\mathcal{O}(n^2)$



$$h = 1 + 1 +$$



## Greedy Lower Bound en $\mathcal{O}(n^2)$



$$h = 1 + 1 + 3 +$$

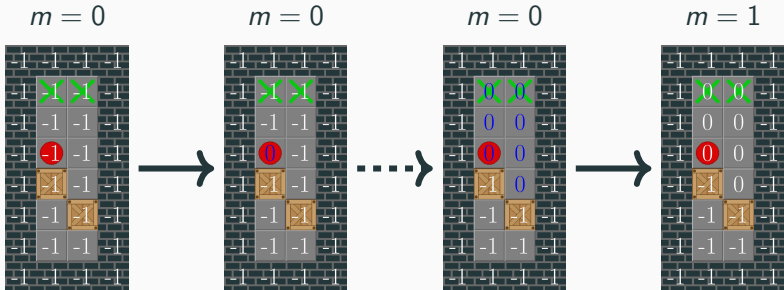
## Greedy Lower Bound en $\mathcal{O}(n^2)$



$$h = 1 + 1 + 3 + 5 = 10$$

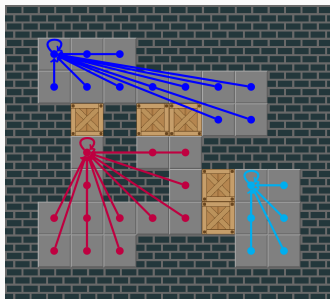
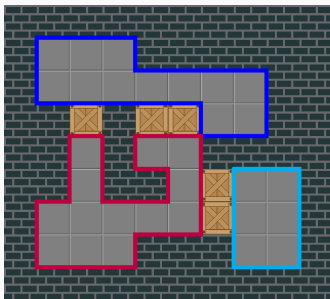
# Parcours de graphes : démarquer tous les nœuds en $\mathcal{O}(1)$

nœud marqué ssi valeur =  $m$

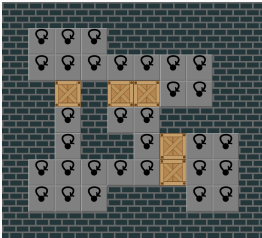


## Calcul des *corrals* en $\mathcal{O}(wh)$

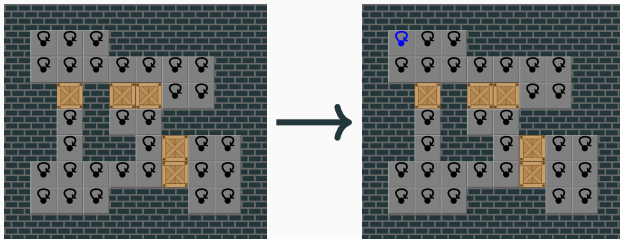
Utilisation de *Union-Find* : partition de  $\llbracket 0; wh - 1 \rrbracket$ .



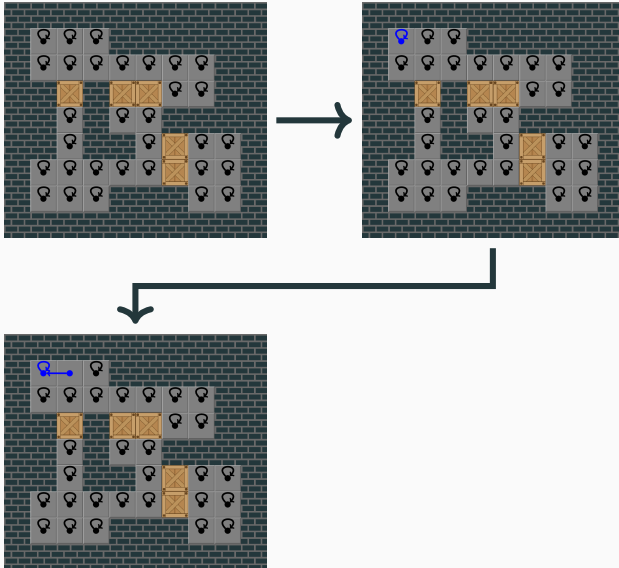
## Calcul des *corrals* en $\mathcal{O}(wh)$



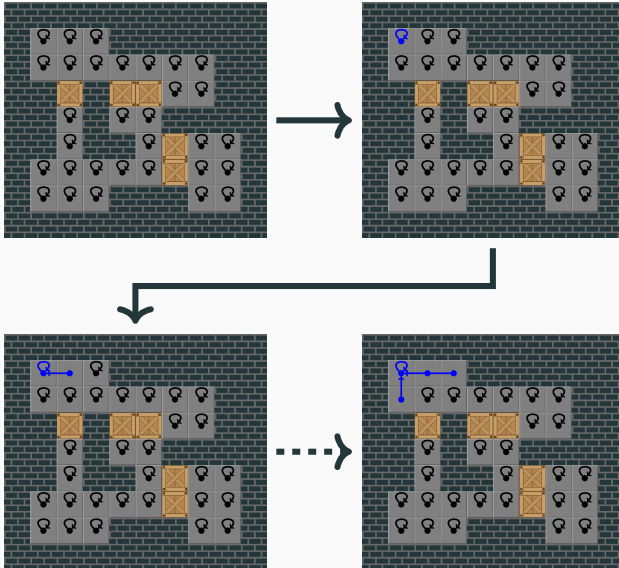
## Calcul des *corrals* en $\mathcal{O}(wh)$



## Calcul des *corrals* en $\mathcal{O}(wh)$

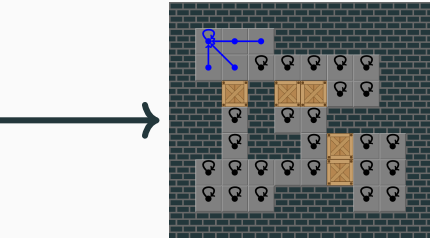


## Calcul des *corrals* en $\mathcal{O}(wh)$

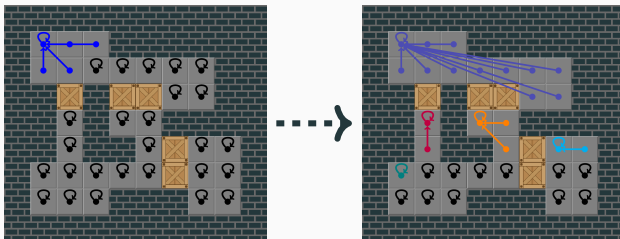




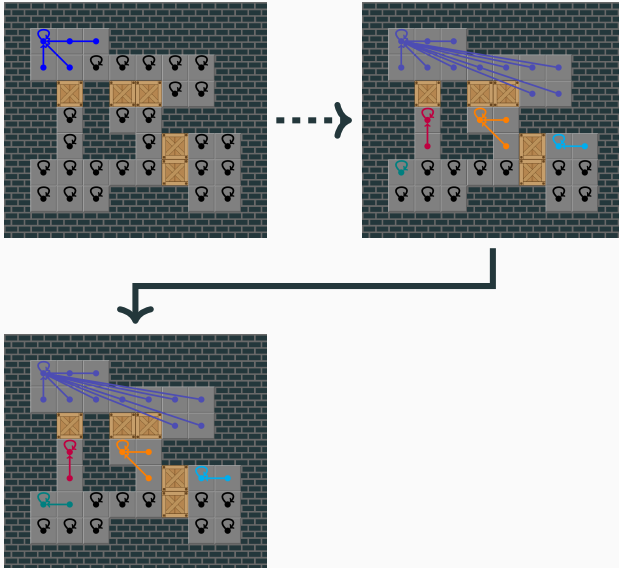
## Calcul des *corrals* en $\mathcal{O}(wh)$



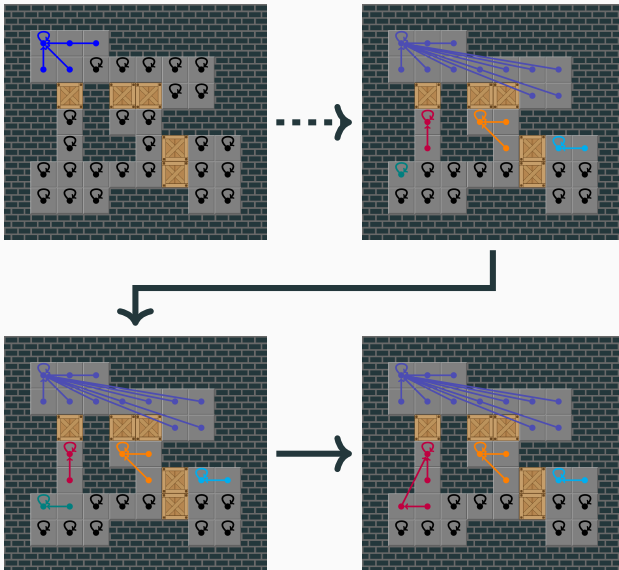
## Calcul des *corrals* en $\mathcal{O}(wh)$



## Calcul des *corrals* en $\mathcal{O}(wh)$



## Calcul des *corrals* en $\mathcal{O}(wh)$



## Calcul des *corrals* en $\mathcal{O}(wh)$

