

# ENSSAT

---

L A N N I O N

## Compte rendu de projet : Algorithme 1

Lode Runner

Julien BOURDET

ENSSAT

1<sup>ère</sup> année - Informatique

Lannion, December 2024

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Preliminaires</b>	<b>5</b>
2.1	Tas-Min . . . . .	5
2.1.1	Procédure insert . . . . .	6
2.1.2	Procédure modify_priority . . . . .	6
2.1.3	Procédure extract_min . . . . .	7
2.1.4	En C . . . . .	7
2.2	Algorithme A* . . . . .	8
2.2.1	Pseudo code . . . . .	8
2.2.2	En C . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Stratégie</b>	<b>10</b>
3.1	Mouvements spéciaux . . . . .	11
3.1.1	Mouvement de combat . . . . .	12
3.1.2	Mouvement de rapprochement . . . . .	12
3.1.3	Remarques . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Paramètres et Valeur de retour</b>	<b>13</b>
4.1	Paramètres . . . . .	13
4.2	Valeur de retour . . . . .	13
4.3	Structure levelinfo . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Modules</b>	<b>16</b>
5.1	Liste des modules . . . . .	16
5.1.1	Tas-Min . . . . .	16
5.1.2	A* . . . . .	17
5.1.3	Outils . . . . .	17
<b>6</b>	<b>Présentation des modules</b>	<b>18</b>
6.1	Module is_valid . . . . .	18
6.1.1	Description . . . . .	18
6.1.2	Paramètres . . . . .	18
6.1.3	Choix d'implémentation . . . . .	18

6.1.4	Pseudo-code . . . . .	19
6.2	Module <code>get_closest_bonus</code> . . . . .	21
6.2.1	Description . . . . .	21
6.2.2	Paramètres . . . . .	21
6.2.3	Choix d'implémentation . . . . .	21
6.2.4	Pseudo-code . . . . .	22
6.3	Module <code>add_ennemis</code> . . . . .	23
6.3.1	Description . . . . .	23
6.3.2	Paramètres . . . . .	23
6.3.3	Choix d'implémentation . . . . .	23
6.3.4	Pseudo-code . . . . .	23
6.4	Module <code>combat_moves</code> . . . . .	25
6.4.1	Description . . . . .	25
6.4.2	Paramètres . . . . .	25
6.4.3	Choix d'implémentation . . . . .	25
6.4.4	Pseudo-code . . . . .	25
6.5	Module <code>lode_runner</code> . . . . .	29
6.5.1	Description . . . . .	29
6.5.2	Paramètres . . . . .	29
6.5.3	Choix d'implémentation . . . . .	29
6.5.4	Pseudo-code . . . . .	29
<b>7</b>	<b>Évaluation Expérimentale</b> . . . . .	<b>33</b>
7.1	Niveau 0 . . . . .	33
7.1.1	Résultats . . . . .	33
7.1.2	Analyse des défaites . . . . .	33
7.2	Niveau 1 . . . . .	33
7.2.1	Résultats . . . . .	33
7.2.2	Analyse des défaites . . . . .	34
7.3	Niveau 2 . . . . .	34
7.3.1	Résultats . . . . .	34
7.3.2	Analyse des défaites . . . . .	34
7.4	Niveau 3 . . . . .	34
7.4.1	Résultats . . . . .	34
7.4.2	Analyse des défaites . . . . .	34
7.5	Niveau 4 . . . . .	35
7.5.1	Résultats . . . . .	35
7.5.2	Analyse des défaites . . . . .	35
7.6	Niveau supplémentaire . . . . .	35
7.6.1	Résultats . . . . .	36
7.6.2	Analyse des défaites . . . . .	36

TABLE DES MATIÈRES	3
--------------------	---

---

<b>8 Conclusion</b>	<b>37</b>
---------------------	-----------

## INTRODUCTION

Dans le cadre du module Algorithme 1, nous avons pu appliquer les concepts étudiés en cours en réalisant un projet. Ce projet consiste à réaliser une IA capable de jouer au jeu Lode Runner. C'est un jeu d'arcade qui se déroule sur une carte en deux dimensions où le joueur doit récupérer des bonus tout en évitant des ennemis.

L'objectif du projet est de développer une IA capable de pouvoir terminer n'importe quel niveau du jeu. Cependant, des limitations ont été imposées : l'IA ne connaît pas les actions futures des ennemis et ne peut pas mémoriser des informations d'un tour à l'autre. Ce cadre impose une stratégie approfondie sur la position actuelle afin d'éviter un mouvement qui serait mortel plus tard.

Au cours du développement, j'ai rencontré plusieurs défis. L'absence de mémorisation empêche d'utiliser une stratégie qui prend trop de temps de calcul ou de pouvoir créer une stratégie sur plusieurs tours, tandis que le fait de ne pas connaître les prochains coups des ennemis empêche d'explorer un "arbre des positions". Par ailleurs, l'implémentation en C, avec ses contraintes de gestion manuelle de la mémoire, a ajouté une dimension technique non négligeable.

Malgré ces contraintes, j'ai pu élaborer une IA fonctionnelle et performante (au moins sur les niveaux disponibles).

Ce compte rendu présente ma démarche de développement, la stratégie utilisée et les résultats obtenus.

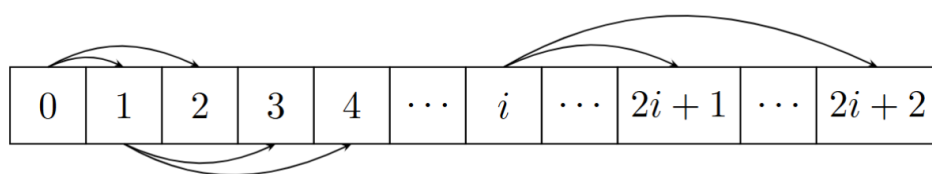
## PRÉLIMINAIRES

Avant de commencer à détailler la stratégie utilisée, il est nécessaire de présenter certaines notions sur lesquelles elle repose.

### 2.1 Tas-Min

Un Tas-min est une structure de données qui permet de stocker un ensemble d'éléments et de les récupérer dans un ordre particulier. C'est un cas particulier d'une file de priorité, où l'élément ayant la plus petite priorité est toujours en tête de file.

Notre Tas-min est implémenté sous forme d'un tableau d'entiers, où chaque élément est un nœud de l'arbre binaire représentant le tas. Les indices des éléments sont choisis de manière à ce que le fils gauche de l'élément à l'indice  $i$  soit à l'indice  $2i + 1$  et le fils droit à l'indice  $2i + 2$ . La racine de l'arbre est à l'indice 0.



**Figure 2.1:** Représentation d'un Tas-min sous forme de tableau.

Pour gérer les Tas-min, nous avons besoin de trois procédures : `insert`, `modify_priority` et `extract_min`. La première permet d'ajouter un élément au tas, la deuxième de modifier la priorité d'un élément et la troisième de récupérer l'élément de priorité minimale.

On sait que l'élément de priorité minimale est toujours à la racine de l'arbre, on peut donc le récupérer en temps constant. En cas d'insertion, de suppression ou de modification de priorité, on doit s'assurer que le tas reste bien un Tas-min. Pour cela, on utilise une des deux procédures suivantes : `percolate_up` et `percolate_down`.

### 2.1.1 Procédure insert

On ajoute l'élément à la fin du tableau et on appelle `percolate_up` pour s'assurer que le tas reste un Tas-min. La procédure `percolate_up` remonte l'élément ajouté tant que son parent a une priorité plus grande que la sienne.

Son pseudo code est le suivant :

---

```
1   Procédure percolate_up
2   Parametres :
3       @heap en tas-min
4       i en entier
5   Debut
6       Tant que heap.priority[i] < heap.priority[(i - 1) / 2] et i > 0
7           Echanger(heap.array, i, (i - 1) / 2)
8           Echanger(heap->priority, i, (i - 1) / 2)
9           i <- (i - 1) / 2
10      Fin Tant que
11      Fin
```

---

**Listing 2.1:** *Procédure percolate\_up.*

### 2.1.2 Procédure modify\_priority

On modifie la priorité de l'élément et on appelle `percolate_up` pour s'assurer que le tas reste un Tas-min.

### 2.1.3 Procédure `extract_min`

On récupère l'élément de priorité minimale, on le remplace par le dernier élément du tableau et on appelle `percolate_down`. La procédure `percolate_down` descend l'élément remplacé jusqu'à ce que ses fils aient une priorité plus grande que la sienne.

Son pseudo code est le suivant :

---

```

1   Procédure percolate_down
2   Parametres :
3       @heap en tas-min
4       i en entier
5   Declarations :
6       current, left, right en entier
7   Debut
8       current <- i
9       left <- 2 * i + 1
10      right <- 2 * i + 2
11
12      Si left < heap.size et heap.priority[left] < heap.priority[current]
13          current <- left
14
15      Si right < heap.size et heap.priority[right] < heap.priority[current]
16          current <- right
17
18      Si current != i
19          Echanger(heap.array, i, current)
20          Echanger(heap.priority, i, current)
21          percolate_down(heap, current)
22  Fin

```

---

**Listing 2.2:** *Procédure `percolate_down`.*

### 2.1.4 En C

En C, on utilise une structure `min_heap` pour représenter le Tas-min.

---

```

1   typedef struct min_heap{
2       int size; // Nombre d'éléments dans le tas
3       int capacity; // Taille max du tas
4       int* array; // Tableau des éléments
5       float* priority; // Priorité des éléments
6   } min_heap;

```

---

**Listing 2.3:** *Structure `min_heap` en C.*



On dispose en plus des fonctions suivantes pour manipuler les Tas-min :

---

```

1      min_heap* create_min_heap(int);
2      void free_min_heap(min_heap*);
3      void percolate_up(min_heap*, int);
4      void percolate_down(min_heap*, int);
5      void insert(min_heap*, int, float);
6      void modify_priority(min_heap*, int, float);
7      int extract_min(min_heap*);
8      bool is_member(min_heap*, int);

```

---

**Listing 2.4:** Fonctions sur les Tas-min en C.

## 2.2 Algorithme A\*

L'algorithme A\* est un algorithme de recherche de chemin dans un graphe pondéré. Il est basé sur l'algorithme de Dijkstra, mais utilise une heuristique pour guider la recherche. L'algorithme A\* est utilisé pour trouver le chemin le plus court entre un nœud de départ et un nœud d'arrivée dans un graphe.

Il utilise une file de priorité pour stocker les nœuds à explorer, dans laquelle la priorité d'un nœud est la somme du coût du chemin parcouru pour atteindre ce nœud et de l'estimation du coût restant pour atteindre le nœud d'arrivée (l'heuristique). On utilisera ici un Tas-min ([Section 2.1](#)) pour implémenter cette file de priorité.

### 2.2.1 Pseudo code

---

```

1      Fonction a_star en @path
2      Parametres :
3          origin en entier
4          destination en entier
5          level en niveau
6      Déclarations :
7          pat en @path
8          u, v en entier
9          h_v en flottant
10     Début
11         pat <- create_path // On initialise le chemin
12         // pat.d est le tableau des distances, pat.p est le tableau des parents
13         pat.d[origin] <- origin
14         insert(pat.heap, origin, 0) // On ajoute le point d'origine a la file
15
16         Tant que pat.heap n'est pas vide
17             // Sommet courant, celui avec la priorite minimale
18             u <- extract_min(pat.heap)
19
20             Si u = destination
21                 // On a trouve le bonus, on pourra remonter le chemin grace a pat.p

```

---

```

22         pat.found <- VRAI
23         Sortir de la boucle
24     Fin Si
25
26     Pour chaque action possible
27         Si l'action est valide // Dépend de level
28             v <- position apres l'action
29             h_v <- distance entre v et le bonus (l'heuristique)
30             Si pat.d[u] + poids de l'action < pat.d[v]
31                 // Si on a trouve un chemin plus court
32                 pat.d[v] <- pat.d[u] + poids de l'action
33                 pat.p[v] <- u
34                 Si v n'est pas dans la file
35                     insert(pat.heap, v, pat.d[v] + h_v) // On l'ajoute
36                 Sinon
37                     // On modifie sa priorite
38                     modify_priority(pat.heap, v, pat.d[v] + h_v)
39             Fin Si
40         Fin Si
41     Fin Si
42     Fin Pour
43     Fin Tant que
44
45     Retourner pat
46 Fin

```

---

Listing 2.5: Fonction *a\_star*.

### 2.2.2 En C

En C, la fonction renvoie un chemin, qui est une structure contenant les informations nécessaires pour retrouver le chemin trouvé.

On conserve le tableau des distances *d*, le tableau des parents *p*, un booléen *found* indiquant si le chemin a été trouvé et le Tas-min heap. On garde le Tas-min pour les cas où il n'est pas vide (on n'a pas trouvé de chemin) et pour libérer la mémoire.

---

```

1     typedef struct path{
2         min_heap* heap; // File de priorité
3         int* p; // Tableau des parents
4         int* d; // Tableau des distances
5         bool found; // Chemin trouvé ou non
6     } path;

```

---

Listing 2.6: Structure *path* en C.

## STRATÉGIE

La stratégie utilisée pour terminer le jeu est construite autour de l'algorithme  $A^*$  (Section 2.2).

On commence par récupérer la liste des bonus par ordre croissant de distance, et on essaie, en utilisant  $A^*$ , de trouver un chemin pour atteindre le bonus le plus proche. Si on trouve un chemin vers un des bonus, le runner le prendra :  $A^*$  a une priorité sur toutes les autres décisions.

Si l'algorithme ne trouve aucun chemin vers aucun bonus (au plus il y a d'ennemis, au plus ça arrive), le runner utilise des fonctions de mouvements dites "spéciales" pour se déplacer.

Ceci veut dire que  $A^*$  doit prendre en compte les ennemis, mais il y a plusieurs avantages à utiliser cette stratégie :

1. On fait une confiance totale à  $A^*$  : s'il sait qu'un ennemi n'est pas dangereux, il n'y a pas besoin de faire de mouvements pour l'éviter.
2. On ne fait pas de mouvements inutiles : si  $A^*$  trouve un chemin, on peut prouver que c'est le chemin le plus court.
3. Si  $A^*$  ne trouve pas de chemin, on peut être sûr qu'il n'y en a pas, et on peut donc se permettre de faire des mouvements "spéciaux".

Néanmoins, il y a un inconvénient : on ne peut pas prédire l'évolution de la position des ennemis, les choix de  $A^*$  se basent sur la situation à l'instant  $t$ . C'est pour cela qu'on l'appelle à chaque tour, pour prendre en compte les nouvelles positions des ennemis.

Heureusement, l'imprécision de la position des ennemis augmente avec la distance, et leur dangerosité diminue. L'algorithme peut être à peu près sûr de la position des ennemis proches (les ennemis dangereux), et donc de les éviter.

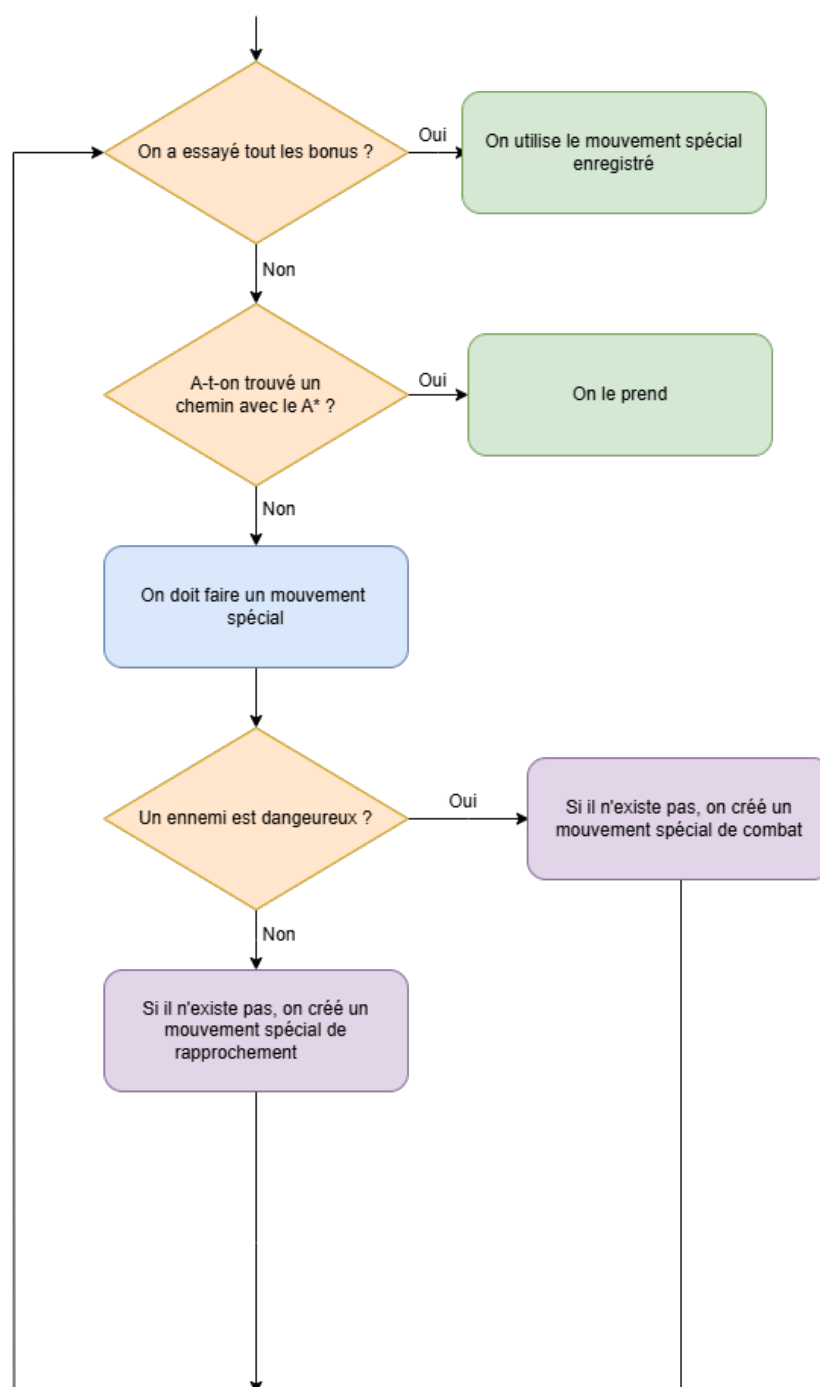


Figure 3.1: Logigramme de la stratégie.

### 3.1 Mouvements spéciaux

Les mouvements spéciaux sont les mouvements effectués quand A\* ne trouve aucun chemin, ils tentent, sans garantie de succès, d'améliorer la situation pour que A\* puisse trouver un chemin lors d'un prochain tour.

Ils sont, contrairement à A\*, beaucoup plus spécifiques.

### 3.1.1 Mouvement de combat

Comme vu dans le logigramme ([Figure 3.1](#)), un mouvement de combat est enregistré si  $A^*$  ne trouve aucun chemin, qu'un ennemi est considéré comme dangereux (??) et qu'il n'existe pas déjà un mouvement de combat. Alors, on va utiliser une suite de conditions ([Section 6.4](#)) pour déterminer l'action à réaliser (se déplacer, poser une bombe, attendre).

### 3.1.2 Mouvement de rapprochement

Si  $A^*$  ne trouve aucun chemin et qu'aucun ennemi n'est considéré comme dangereux, c'est qu'un ou plusieurs ennemis bloquent le chemin. On va alors essayer de se rapprocher du bonus, jusqu'à ce que :

- $A^*$  trouve un chemin.
- On se rapproche assez d'un ennemi pour qu'il soit considéré comme dangereux.

### 3.1.3 Remarques

Il faut faire attention à bien conserver le premier mouvement de combat (et de rapprochement), car on va itérer sur tous les bonus, mais on souhaite se rapprocher du plus proche (le premier).

## PARAMÈTRES ET VALEUR DE RETOUR

Afin de permettre à notre code d'interagir avec le moteur de jeu, il faut utiliser une fonction :

```
1 action lode_runner(levelinfo, character_list, bonus_list, bomb_list);
```

**Listing 4.1:** Prototype de *lode\_runner* en C.

### 4.1 Paramètres

Paramètre	Type	Description
level	levelinfo	Structure contenant les informations du niveau.
characterl	character_list	Liste chaînée contenant le runner et les ennemis.
bonusl	bonus_list	Liste chaînée contenant les bonus.
bombl	bomb_list	Liste chaînée contenant les bombes.

**Table 4.1:** Paramètres de la fonction *lode\_runner*.

### 4.2 Valeur de retour

Cette fonction est appelée à chaque tour du jeu. Elle retourne une action à effectuer par le runner. Cette action est un élément de l'énumération suivante :

Entier	Valeur	Description
0	NONE	Ne rien faire.
1	UP	Aller en haut.
2	DOWN	Aller en bas.
3	LEFT	Aller à gauche.
4	RIGHT	Aller à droite.
5	BOMB_LEFT	Poser une bombe à gauche.
6	BOMB_RIGHT	Poser une bombe à droite.

**Table 4.2:** Énumération des actions possibles.

### 4.3 Structure levelinfo

Parmi les paramètres de la fonction `lode_runner`, il y a la structure `levelinfo`. Cette structure contient les informations du niveau actuel, sous la forme suivante :

```

1  typedef struct{
2      char **map;
3      int  xsize;
4      int  ysize;
5      int  xexit;
6      int  yexit;
7  } levelinfo;
```

**Listing 4.2:** Structure *levelinfo* en C.

Le tableau `map` contient les éléments de la carte, sous la forme d'un tableau de caractères, un exemple est donné sur la [Figure 4.1](#).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
1	W				X					W
2	W				L		B			W
3	W				L	F	F	F	L	W
4	W		E		L				L	W
5	W	L	F	F	F				L	W
6	W	L							L	W
7	W	L		B			R		L	W
8	W	F	F	F	F	F	F	F	F	W
9	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W

**Figure 4.1:** Exemple de carte.

On peut remarquer que les  $x$  et les  $y$  sont inversés par rapport à une matrice classique, c'est à dire que l'axe des ordonnées est l'axe des abscisses et vice-versa. De plus, les coordonnées sont relatives à la carte, c'est à dire que le coin supérieur gauche est en  $(0, 0)$  et le coin inférieur droit est en  $(xsize, ysize)$ . Enfin, cela mène à ce que contrintuitivement, se déplacer vers le haut signifie diminuer les  $y$ .

Afin de faciliter le développement, et de laisser une liberté de choix dans l'implémentation, chaque caractère de la carte est défini par une constante, comme suit :

Caractère	Constante	Description
'H'	BOMB	Bombe.
'B'	BONUS	Bonus.
'C'	CABLE	Câble.
'E'	ENEMY	Ennemi.
'X'	EXIT	Sortie.
'F'	FLOOR	Sol.
'L'	LADDER	Échelle.
'.'	PATH	Chemin.
'R'	RUNNER	Runner.
'W'	WALL	Mur.

**Table 4.3:** Énumération des caractères de la carte.



## MODULES

La stratégie se décompose en plusieurs modules, chacun ayant un rôle spécifique. Ces modules sont indépendants les uns des autres et peuvent être utilisés individuellement.

### 5.1 Liste des modules

#### 5.1.1 Tas-Min

Prototype	Description
<code>min_heap* create_min_heap</code>	Crée un tas-min.
<code>void free_min_heap</code>	Libère la mémoire allouée pour le tas-min.
<code>void swap</code>	Échange les valeurs des deux entiers.
<code>void swapf</code>	Échange les valeurs des deux flottants.
<code>void percolate_up</code>	Conserve l'invariant du tas-min.
<code>void percolate_down</code>	Conserve l'invariant du tas-min.
<code>void insert</code>	Insère un élément dans le tas-min.
<code>void modify_priority</code>	Modifie la priorité d'un élément du tas-min.
<code>int extract_min</code>	Extrait l'élément de priorité minimale du tas-min.
<code>bool is_member</code>	Vérifie si un élément est présent dans le tas-min.

**Table 5.1:** Modules relatifs au tas-min.

### 5.1.2 A\*

Prototype	Description
path* create_path	Crée un chemin.
void free_path	Libère la mémoire allouée pour le chemin.
bool is_valid	Vérifie si une action est valide.
int weight	Valeur d'une action, utilisée pour le calcul de la priorité.
int get_new_pos	Renvoie la position après avoir effectué une action.
action get_action	Renvoie l'action à effectuer pour aller de $u$ à $v$ , si ce n'est pas possible, renvoie NONE.
path* a_star	Renvoie le chemin le plus court entre le runner et le bonus.
child* find_closest_child	Si A* ne trouve pas de chemin, on recherche le chemin qui nous rapproche le plus du bonus.
action lode_runner	Action du lode-runner.

**Table 5.2:** Modules relatifs à l'algorithme A\*.

### 5.1.3 Outils

Prototype	Description
float dist	Calcule la distance euclidienne entre deux points (avec leurs coordonnées).
float vdist	Calcule la distance euclidienne entre deux points (avec leurs positions dans le niveau).
character_list get_runner	Renvoie le runner parmi les personnages.
bool is_in_bonus_list	Vérifie si un bonus est dans une liste de bonus, on utilise ses coordonnées.
levelinfo add_enemies	Ajoute les ennemis et les bombes à la carte.
bonus_list get_closest_bonus	Renvoie le bonus le plus proche du runner, en évitant ceux déjà vus.
character_list get_closest_enemy	Renvoie l'ennemi dangereux le plus proche du runner.
bool is_valid_closest	Vérifie si une action est dangereuse, utilisée pour le mode closest.
void combat_moves	Gère les mouvements de combat.

**Table 5.3:** Modules relatifs aux outils.

## PRÉSENTATION DES MODULES

### 6.1 Module `is_valid`

---

```
1  bool is_valid(int pos, action a, levelinfo level, levelinfo air_level);
```

---

**Listing 6.1:** *Prototype de `is_valid` en C.*

#### 6.1.1 Description

Dans l'algorithme A\*, on a besoin de récupérer tous les voisins d'une case donnée. On appelle voisin d'une case une case atteignable en un seul mouvement possible.

La fonction `is_valid` prend donc en paramètre une action, et retourne un booléen indiquant si cette action est valide.

#### 6.1.2 Paramètres

Paramètre	Type	Description
<code>pos</code>	<code>int</code>	Position de la case à tester.
<code>a</code>	<code>action</code>	Action à tester.
<code>level</code>	<code>levelinfo</code>	Structure contenant les informations du niveau.
<code>air_level</code>	<code>levelinfo</code>	Structure contenant les informations du niveau sans les ennemis.

**Table 6.1:** *Paramètres de la fonction `is_valid`.*

#### 6.1.3 Choix d'implémentation

On choisit d'utiliser un switch sur l'action à tester puisque chaque action a des conditions différentes.

### 6.1.4 Pseudo-code

---

```

1      Fonction is_valid en booléen
2      Parametres :
3          pos en entier
4          a en action
5          level en levelinfo
6          air_level en levelinfo
7      Declarations :
8          x en entier
9          y en entier
10         map en tableau de caractères
11         air_map en tableau de caractères
12         not_in_air en booléen
13     Debut
14         x <- pos % level.xsize // On récupère la coordonnée x de la case
15         y <- pos / level.xsize // On récupère la coordonnée y de la case
16         map <- level.map // On récupère la carte du niveau
17         air_map <- air_level.map // On récupère la carte du niveau sans les ennemis
18
19         // Variable indiquant si le joueur n'est pas en l'air
20         not_in_air <- (air_map[y + 1][x] != PATH && air_map[y + 1][x] != CABLE &&
21             ↪ air_map[y + 1][x] != BOMB) || air_map[y - 1][x] == CABLE
22         // Si la case en dessous du joueur n'est pas un chemin, un cable ou une
23             ↪ bombe, ou si la case au dessus du joueur est un cable, alors le joueur
24             ↪ n'est pas en l'air
25
26     Selon a faire
27         Cas NONE :
28             Retourner VRAI
29         Cas UP :
30             // On ne peut monter que si on est sur une echelle et qu'il n'y a
31             ↪ pas de mur au dessus
32             Si map[y][x] == LADDER et map[y - 1][x] != WALL et map[y - 1][x] !=
33             ↪ FLOOR et map[y - 1][x] != ENEMY alors
34                 Retourner VRAI
35         Cas DOWN :
36             // On ne peut descendre que si il y a une echelle, un chemin ou un
37             ↪ cable en dessous
38             // On laisse la possibilite de descendre si le joueur est en l'air
39             Si (map[y + 1][x] == LADDER ou map[y + 1][x] == PATH ou map[y +
40             ↪ 1][x] == CABLE) et map[y + 1][x] != ENEMY alors
41                 Retourner VRAI
42         Cas LEFT :
43             // On ne peut aller a gauche que si il n'y a pas de mur a gauche et
44             ↪ que le joueur n'est pas en l'air
45             // C'est un petit hack car le moteur avance de plusieurs tour de
46             ↪ jeu sans utiliser le code du joueur tant qu'il tombe, mais le
47             ↪ A* ne le sait pas,
48             // alors on se débrouille pour que la seule action possible soit
49             ↪ DOWN

```

```
39         Si map[y][x - 1] != WALL et map[y][x - 1] != FLOOR et map[y][x - 1]
        ↪ != ENEMY et map[y][x - 1] != DEAD et map[y + 1][x - 1] != ENEMY
        ↪ et not_in_air alors
40             Retourner VRAI
41     Cas RIGHT :
42         // De meme pour la droite
43     Si map[y][x + 1] != WALL et map[y][x + 1] != FLOOR et map[y][x + 1]
        ↪ != ENEMY et map[y][x + 1] != DEAD et map[y + 1][x + 1] != ENEMY
        ↪ et not_in_air alors
44         Retourner VRAI
45     Default :
46         Afficher "ERROR: Invalid action"
47         Sortir du programme
48     Fin Selon
49
50     Retourner FAUX
51 Fin
```

---

**Listing 6.2:** Pseudo-code de la fonction *is\_valid*.

## 6.2 Module `get_closest_bonus`

---

```
1      bonus_list get_closest_bonus(bonus_list bonusl, character_list runner,  
      ↪ bonus_list already_seen);
```

---

**Listing 6.3:** *Prototype de `get_closest_bonus` en C.*

### 6.2.1 Description

Pour A\*, on a besoin de destinations : les bonus. Mais, afin de finir le niveau plus rapidement (et pour éviter des cas de boucles infinies), on veut aller sur le bonus le plus proche du runner.

De plus, si le bonus le plus proche est inaccessible pour des raisons quelconques, on veut aller sur le second bonus le plus proche, et ainsi de suite. C'est pourquoi on a besoin de la liste des bonus déjà vus, pour ne pas les revoir.

### 6.2.2 Paramètres

Paramètre	Type	Description
<code>bonusl</code>	<code>bonus_list</code>	Liste des bonus.
<code>runner</code>	<code>character_list</code>	Liste des personnages.
<code>already_seen</code>	<code>bonus_list</code>	Liste des bonus déjà vus.

**Table 6.2:** *Paramètres de la fonction `get_closest_bonus`.*

### 6.2.3 Choix d'implémentation

Les listes de bonus sont des listes chaînées, on choisit donc une boucle tant que pour parcourir la liste des bonus. De même, la fonction `is_in_bonus_list` fonctionne similairement, on ne la détaille donc pas.

### 6.2.4 Pseudo-code

---

```

1      Fonction get_closest_bonus en bonus_list
2      Parametres :
3          bonusl en bonus_list
4          runner en character_list
5          already_seen en bonus_list
6      Declarations :
7          closest_bonus en bonus_list
8          best_dist en reel
9          current en bonus_list
10     Debut
11         closest_bonus <- NULL
12
13     Si bonusl == NULL alors
14         // Si la liste des bonus est vide, il n'y a pas de bonus le plus proche
15         Retourner NULL
16     Fin Si
17
18     best_dist <- 100000 // On initialise la meilleure distance à une valeur
19     ↪ très grande
20     current <- bonusl // On initialise le bonus courant à la tête de la liste
21     ↪ des bonus
22
23     Tant que current != NULL faire
24         // On parcourt la liste des bonus
25         Si dist(current->b.x, current->b.y, runner->c.x, runner->c.y) <
26         ↪ best_dist et non is_in_bonus_list(current, already_seen) alors
27             closest_bonus <- current
28             best_dist <- dist(current->b.x, current->b.y, runner->c.x,
29             ↪ runner->c.y)
30         Fin Si
31         current <- current->next // On passe au bonus suivant
32     Fin Tant que
33
34     Retourner closest_bonus // On retourne le bonus le plus proche
35 Fin

```

---

**Listing 6.4:** Pseudo-code de la fonction *get\_closest\_bonus*.

## 6.3 Module *add\_ennemis*

---

```

1      levelinfo add_ennemis(levelinfo level, character_list characterl, bomb_list
      ↪ bomb_l);

```

---

**Listing 6.5:** *Prototype de add\_ennemis en C.*

### 6.3.1 Description

Pour que A\* prenne en compte les ennemis, et ne tombe pas dans les trous créés par les bombes, on ajoute les ennemis et les bombes à la carte. C'est à dire qu'on crée une nouvelle carte, où les ennemis et les bombes sont des obstacles. De plus, si un ennemi est sur une bombe, on considère que l'ennemi est mort, (on peut marcher dessus).

### 6.3.2 Paramètres

Paramètre	Type	Description
level	levelinfo	Structure contenant les informations du niveau.
characterl	character_list	Liste des personnages.
bombl	bomb_list	Liste des bombes.

**Table 6.3:** *Paramètres de la fonction add\_ennemis.*

### 6.3.3 Choix d'implémentation

Les listes d'ennemis et de bombes sont des listes chaînées, on choisit donc une boucle tant que pour parcourir ces listes. Afin de s'assurer qu'on a les bons type de personnages, on utilise un Si / Sinon.

### 6.3.4 Pseudo-code

---

```

1      Fonction add_ennemis en levelinfo
2      Parametres :
3          level en levelinfo
4          characterl en character_list
5          bombl en bomb_list
6      Declarations :
7          currentb en bomb_list
8          current en character_list
9      Debut
10         currentb <- bombl // On initialise currentb à la tête de la liste des
            ↪ bombes
11
12         Tant que currentb != NULL faire

```



---

```
13         // On itère sur les bombes
14         level.map[currentb->y][currentb->x] <- BOMB
15         currentb <- currentb->next // On passe à la bombe suivante
16     Fin Tant que
17
18     current <- character1 // On initialise current à la tête de la liste des
19     ↪ personnages
20
21     Tant que current != NULL faire
22         // On itère sur les personnages
23         Si current->c.item == ENEMY alors
24             // Si le personnage est un ennemi (on pourrait tomber sur le
25             ↪ runner)
26             Si level.map[current->c.y][current->c.x] == BOMB ou
27             ↪ level.map[current->c.y][current->c.x] == DEAD alors
28                 level.map[current->c.y][current->c.x] <- DEAD
29             Sinon
30                 level.map[current->c.y][current->c.x] <- ENEMY
31             Fin Si
32         Fin Si
33         current <- current->next // On passe au personnage suivant
34     Fin Tant que
35
36     Retourner level
37
38 Fin
```

---

**Listing 6.6:** Pseudo-code de la fonction *add\_ennemis*.

## 6.4 Module `combat_moves`

---

```
1 void combat_moves(character_list runner, character_list closest_enemy, int*
    ↪ move_to_combat, levelinfo level);
```

---

**Listing 6.7:** *Prototype de `combat_moves` en C.*

### 6.4.1 Description

Si A\* ne trouve aucun chemin pour aucun bonus, le mode de mouvement spécial est activé. Dans ce mode, le runner va essayer de se rapprocher du bonus le plus proche, tout en évitant les ennemis. Pour savoir comment se déplacer, si un ennemi est dangereux, on utilise la procédure `combat_moves`.

### 6.4.2 Paramètres

Paramètre	Type	Description
<code>runner</code>	<code>character_list</code>	Runner
<code>closest_enemy</code>	<code>character_list</code>	Ennemi le plus proche.
<code>move_to_combat</code>	<code>int*</code>	Pointeur vers l'action à effectuer.
<code>level</code>	<code>levelinfo</code>	Structure contenant les informations du niveau.

**Table 6.4:** *Paramètres de la procédure `combat_moves`.*

### 6.4.3 Choix d'implémentation

Cette procédure est assez complexe, surtout, elle n'a pas été implémentée en une seule fois, mais petit à petit. Cela vient du fait que les mouvements spéciaux sont assez complexes, et qu'il est difficile de tout prévoir dès le début, il faut tester et ajuster. J'ai tout de même essayé de faire en sorte que la procédure soit la plus lisible possible, en utilisant des commentaires et des variables explicites. On utilise donc des `Si / Sinon` pour tester les différentes conditions. De plus, on utilise une procédure car on modifie le pointeur `move_to_combat` en fonction de sa valeur actuelle.

### 6.4.4 Pseudo-code

---

```
1 Procédure combat_moves
2 Paramètres :
3     runner en character_list
4     closest_enemy en character_list
5     @move_to_combat en entier
6     level en levelinfo
7 Déclarations :
```

```

8         down_left en caractère
9         down_right en caractère
10        top_left en caractère
11        top_right en caractère
12        left en caractère
13        right en caractère
14        center en caractère
15        can_right en booléen
16        can_left en booléen
17        distance en entier
18        can_up en booléen
19        can_down en booléen
20    Debut
21        // On récupère les cases autour du runner
22        down_left <- level.map[runner->c.y + 1][runner->c.x - 1]
23        down_right <- level.map[runner->c.y + 1][runner->c.x + 1]
24        top_left <- level.map[runner->c.y - 1][runner->c.x - 1]
25        top_right <- level.map[runner->c.y - 1][runner->c.x + 1]
26        left <- level.map[runner->c.y][runner->c.x - 1]
27        right <- level.map[runner->c.y][runner->c.x + 1]
28        center <- level.map[runner->c.y][runner->c.x]
29
30        // On vérifie si on peut se déplacer à droite ou à gauche, et si on ne
31        ↪ tombe pas en le faisant
32        can_right <- is_valid(runner->c.y * level.xsize + runner->c.x, RIGHT,
33        ↪ level, level)
34        can_left <- is_valid(runner->c.y * level.xsize + runner->c.x, LEFT, level,
35        ↪ level)
36        can_right <- can_right et (down_right != BOMB et down_right != PATH)
37        can_left <- can_left et (down_left != BOMB et down_left != PATH)
38
39        Si closest_enemy != NULL alors
40            // Si il y a un ennemi dangereux (donc que l'on est en mode combat)
41            Si *move_to_combat == -1 alors
42                // Si on n'a pas encore décidé de comment se déplacer
43                distance <- runner->c.y - closest_enemy->c.y // On calcule la
44                ↪ distance verticale
45            Si distance == 0 alors
46                // Combat horizontal
47                distance <- runner->c.x - closest_enemy->c.x // On calcule la
48                ↪ distance horizontale
49            Si level.map[runner->c.y - 1][runner->c.x] == CABLE et
50            ↪ level.map[runner->c.y + 1][runner->c.x] == PATH alors
51                // On est sur un câble, on ne peut pas poser de bombe, on
52                ↪ saute
53                *move_to_combat <- DOWN
54            Sinon Si distance > 0 et distance < 4 alors
55                // A gauche
56                Si (down_left == FLOOR ou down_left == BOMB) et top_left !=
57                ↪ CABLE et left != ENEMY alors
58                    Si down_left == BOMB alors

```

```

51         // Il y a deja une bombe, on attend
52         *move_to_combat <- NONE
53     Sinon
54         // On pose une bombe a gauche
55         *move_to_combat <- BOMB_LEFT
56     Fin Si
57     Sinon
58         // On ne peut pas poser de bombe, on se deplace a
59         ↪ droite
60         Si can_right alors *move_to_combat <- RIGHT
61     Fin Si
62     Sinon Si distance < 0 et distance > -4 alors
63         // A droite
64         Si (down_right == FLOOR ou down_right == BOMB) et top_right
65         ↪ != CABLE et right != ENEMY alors
66         Si down_right == BOMB alors
67             // Il y a deja une bombe, on attend
68             *move_to_combat <- NONE
69         Sinon
70             // On pose une bombe a droite
71             *move_to_combat <- BOMB_RIGHT
72         Fin Si
73     Sinon
74         // On ne peut pas poser de bombe, on se deplace a
75         ↪ gauche
76         Si can_left alors *move_to_combat <- LEFT
77     Fin Si
78     Fin Si
79     // Ces mouvements ont priorite sur les autres
80     Si can_right alors
81         Si (left == LADDER ou center == LADDER ou (left == ENEMY et
82         ↪ top_left == LADDER)) et distance > 0 alors
83             // On se deplace a droite si on est sur une echelle, ou
84             ↪ si on a une echelle a gauche
85             *move_to_combat <- RIGHT
86         Fin Si
87     Fin Si
88     Si can_left alors
89         Si (right == LADDER ou center == LADDER ou (right == ENEMY
90         ↪ et top_right == LADDER)) et distance < 0 alors
91             // On se deplace a gauche si on est sur une echelle, ou
92             ↪ si on a une echelle a droite
93             *move_to_combat <- LEFT
94         Fin Si
95     Fin Si
96     Sinon
97         // Combat vertical (sur une echelle)
98         bool can_up <- is_valid(runner->c.y * level.xsize +
99         ↪ runner->c.x, UP, level, level)

```

```
95         bool can_down <- is_valid(runner->c.y * level.xsize +
96         ↪ runner->c.x, DOWN, level, level)
97     Si distance > 0 et can_down alors
98         // On descend si un ennemi est au dessus
99         *move_to_combat <- DOWN
100     Sinon Si distance < 0 et can_up alors
101         // On monte si un ennemi est en dessous
102         *move_to_combat <- UP
103     Fin Si
104
105     Si level.map[runner->c.y][runner->c.x] == PATH ou
106     ↪ level.map[runner->c.y + 1][runner->c.x] == FLOOR alors
107         // Si on est en haut ou en bas d'une echelle, alors c'est
108         ↪ une erreur et on est en pas en mode combat, on remet
109         ↪ move_to_combat a -1
110         *move_to_combat <- -1
111     Fin Si
112
113     Fin Si
114
115     Fin Si
116
117     Fin
```

---

**Listing 6.8:** *Pseudo-code de la procédure combat\_moves.*

## 6.5 Module *lode\_runner*

---

```

1      action lode_runner(levelinfo level, character_list characterl, bonus_list
      ↪ bonusl, bomb_list bombl);

```

---

**Listing 6.9:** *Prototype de lode\_runner en C.*

### 6.5.1 Description

La fonction *lode\_runner* est la fonction principale de notre programme, c'est elle qui va appeler toutes les autres fonctions pour trouver le meilleur chemin pour le runner. Elle renvoie l'action à effectuer par le runner.

### 6.5.2 Paramètres

Paramètre	Type	Description
level	levelinfo	Structure contenant les informations du niveau.
characterl	character_list	Liste des personnages.
bonusl	bonus_list	Liste des bonus.
bombl	bomb_list	Liste des bombes.

**Table 6.5:** *Paramètres de la fonction lode\_runner.*

### 6.5.3 Choix d'implémentation

Le point principal de cette fonction est l'itération sur les bonus. Elle est donc centrée autour d'une boucle tant que (les bonus sont des listes chaînées). On utilise des variables pour stocker les actions à effectuer, et on les retourne à la fin de la fonction.

### 6.5.4 Pseudo-code

---

```

1      Fonction lode_runner en action
2      Parametres :
3          level en levelinfo
4          characterl en character_list
5          bonusl en bonus_list
6          bombl en bomb_list
7      Declarations :
8          runner en character_list
9          astar_level en levelinfo
10         already_seen en bonus_list
11         closest_bonus en bonus_list
12         to_exit en booléen
13         move_to_combat en entier

```

---

```

14     move_to_closest en entier
15     move_to_path en entier
16     move_to_skipped en entier
17     @pat en path
18     @c en child
19     tmp en bonus_list
20     v en entier
21 Debut
22     runner <- get_runner(character1) // On récupère le runner
23     level <- add_enemies(level, character1, bombl) // On ajoute les ennemis à
    ↪ la carte
24 // On crée un niveau pour A* avec des zones autour des ennemis. Le but est
    ↪ que le runner ne s'approche pas trop des ennemis
25     astar_level <- get_astar_level(level, character1)
26
27     already_seen <- NULL // On initialise la liste des bonus déjà vus
28     closest_bonus <- get_closest_bonus(bonus1, runner, already_seen) // On
    ↪ récupère le bonus le plus proche
29
30     Si bonus1 == NULL alors
31         // Si la liste des bonus est vide, c'est qu'on les a tous récupérés, on
    ↪ va donc vers la sortie
32         // On crée un bonus fictif qui possède les coordonnées de la sortie
33         closest_bonus <- malloc(sizeof(bonus_list))
34         bonus b <- {level.xexit, level.yexit}
35         closest_bonus->b <- b
36         to_exit <- VRAI
37     Fin Si
38
39     // Initialisation des variables
40     // Ces variables vont stocker les actions à effectuer, elles sont
    ↪ initialisées à -1 pour qu'on sache si elles ont été modifiées
41     move_to_combat <- -1
42     move_to_closest <- -1
43     move_to_path <- -1
44     move_to_skipped <- -1
45
46     Tant que closest_bonus != NULL faire
47         // On itère sur les bonus
48         pat <- a_star(runner, closest_bonus, astar_level, level) // On calcule
    ↪ le chemin vers le bonus le plus proche
49         Si level.map[closest_bonus->b.y][closest_bonus->b.x] == ENEMY alors
50             // Cas spécial : si un ennemi est sur le bonus, on ne peut pas y
    ↪ aller (A* ne trouvera pas de chemin)
51             int runner_pos <- runner->c.y * level.xsize + runner->c.x
52             int closest_bonus_pos <- closest_bonus->b.y * level.xsize +
    ↪ closest_bonus->b.x
53             c <- find_closest_child(pat->p, runner_pos, closest_bonus_pos,
    ↪ level) // On trouve le chemin qui nous rapproche le plus du
    ↪ bonus
54             move_to_skipped <- get_action(runner_pos, c->pos, level) // On
    ↪ stocke l'action à effectuer

```

```

55         // On ajoute le bonus à la liste des bonus déjà vus
56         tmp <- malloc(sizeof(bonus_list))
57         tmp->b <- closest_bonus->b
58         tmp->next <- already_seen
59         already_seen <- tmp
60         Si non to_exit alors
61             // Si il y a d'autres bonus, on récupère le plus proche pour
62             ↪ continuer la boucle
63             closest_bonus <- get_closest_bonus(bonusl, runner,
64             ↪ already_seen)
65         Fin Si
66         Continuer
67     Fin Si
68
69     Si move_to_closest == -1 alors
70         // Si on n'a toujours initialisé move_to_closest, on le fait
71         // move_to_closest est l'action qui nous rapproche du bonus le plus
72         ↪ proche (même s'il est inaccessible)
73         int runner_pos <- runner->c.y * level.xsize + runner->c.x
74         int closest_bonus_pos <- closest_bonus->b.y * level.xsize +
75         ↪ closest_bonus->b
76
77         c <- find_closest_child(pat->p, runner_pos, closest_bonus_pos,
78         ↪ level) // On trouve le chemin qui nous rapproche le plus du
79         ↪ bonus
80         move_to_closest <- get_action(runner_pos, c->pos, level) // On
81         ↪ stocke l'action à effectuer
82     Fin Si
83
84     Si pat->found alors
85         // Si on a trouvé un chemin, on le suit
86         v <- closest_bonus->b.y * level.xsize + closest_bonus->b.x
87         Tant que pat->p[v] != runner->c.y * level.xsize + runner->c.x faire
88             // pat->p[v] est le parent de v, on remonte le chemin pour
89             ↪ trouver l'action à effectuer
90             v <- pat->p[v]
91         Fin Tant que
92
93         move_to_path <- get_action(runner->c.y * level.xsize + runner->c.x,
94         ↪ v, level) // On stocke l'action à effectuer
95
96     Sinon Si pat->heap->size != 0 alors
97         // Si le chemin est plus long que la taille du tas, c'est une
98         ↪ erreur
99         Afficher "ERROR: Path is longer than heap size"
100        Sortir du programme
101    Sinon
102        // Si on n'a pas trouvé de chemin, on est en mode combat
103        combat_moves(runner, get_closest_enemy(characterl, runner, level),
104        ↪ &move_to_combat, level)
105    Fin Si

```



---

```

95
96         // On ajoute le bonus à la liste des bonus déjà vus
97         tmp <- malloc(sizeof(bonus_list))
98         tmp->b <- closest_bonus->b
99         tmp->next <- already_seen
100        already_seen <- tmp
101        Si non to_exit alors
102            // Si il y a d'autres bonus, on récupère le plus proche pour
            ↪ continuer la boucle
103            closest_bonus <- get_closest_bonus(bonusl, runner, already_seen)
104        Sinon
105            closest_bonus <- NULL
106        Fin Si
107    Fin Tant que
108
109    Si move_to_path != -1 alors
110        // On a trouvé un chemin, on le suit
111        Retourner move_to_path
112    Sinon Si move_to_combat != -1 alors
113        // On est en mode combat
114        Retourner move_to_combat
115    Sinon Si move_to_closest != -1 alors
116        // On n'a pas trouvé de chemin, on se rapproche du bonus
117        Si is_valid_closest(runner->c.y * level.xsize + runner->c.x,
            ↪ move_to_closest, astar_level) alors
118            Retourner move_to_closest
119        Sinon
120            Retourner NONE
121        Fin Si
122    Sinon
123        // Les bonus sont inaccessibles, on cherche le chemin qui nous
            ↪ rapproche le plus d'un bonus
124        Retourner move_to_skipped
125    Fin Si
126    Fin

```

---

**Listing 6.10:** Pseudo-code de la fonction *lode\_runner*.

## ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE

Afin de valider les performances de notre stratégie, nous avons utilisé un script `sh`, qui permet de lancer plusieurs parties et de récupérer les résultats. Ce script nous renvoie, pour un niveau donné et un nombre de parties donné, le pourcentage de victoire, et le nombre moyen de déplacements effectués par le runner.

### 7.1 Niveau 0

#### 7.1.1 Résultats

Pourcentage de victoire	Moyenne de déplacements	Moyenne de bombes
100%	87.0	0.0

**Table 7.1:** Résultats pour le niveau 0 sur 1000 parties

#### 7.1.2 Analyse des défaites

Il n'y a pas de défaites pour le niveau 0 et le nombre moyen de déplacements est entier, car n'y a pas d'ennemi, le runner prend toujours le même chemin.

### 7.2 Niveau 1

#### 7.2.1 Résultats

Pourcentage de victoire	Moyenne de déplacements	Moyenne de bombes
100%	125.0	0.0

**Table 7.2:** Résultats pour le niveau 1 sur 1000 parties

### 7.2.2 Analyse des défaites

Il n'y a pas de défaites pour le niveau 1 et le nombre moyen de déplacements est entier. Pourtant il y a un ennemi, mais le runner le contourne, et prend toujours le même chemin.

On remarque que la seule mécanique qui rend le jeu non déterministe est la position des ennemis lorsqu'ils réapparaissent. Or, la solution que trouve notre stratégie contourne les ennemis, donc si elle réussit le niveau une fois, elle le réussira toujours.

## 7.3 Niveau 2

### 7.3.1 Résultats

Pourcentage de victoire	Moyenne de déplacements	Moyenne de bombes
100%	174.0	0.0

**Table 7.3:** Résultats pour le niveau 2 sur 1000 parties

### 7.3.2 Analyse des défaites

Il n'y a pas de défaites pour le niveau 2, pour les mêmes raisons que pour le niveau 1.

## 7.4 Niveau 3

### 7.4.1 Résultats

Pourcentage de victoire	Moyenne de déplacements	Moyenne de bombes
98.2%	161.7	2.7

**Table 7.4:** Résultats pour le niveau 3 sur 10000 parties

### 7.4.2 Analyse des défaites

A faire

## 7.5 Niveau 4

### 7.5.1 Résultats

Pourcentage de victoire	Moyenne de déplacements	Moyenne de bombes
96.9%	189.4	1.5

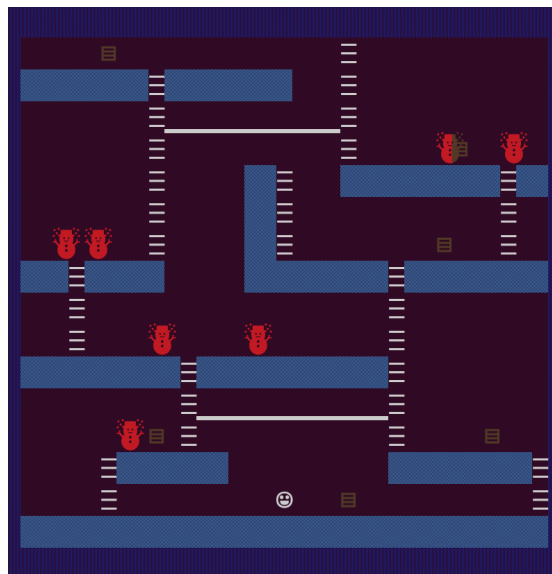
**Table 7.5:** Résultats pour le niveau 4 sur 10000 parties

### 7.5.2 Analyse des défaites

A faire

## 7.6 Niveau supplémentaire

Afin de tester notre stratégie sur un niveau plus difficile, nous avons créé un niveau supplémentaire. Il reprend les mêmes plateformes que le niveau 3, mais avec des ennemis en plus.



**Figure 7.1:** Niveau supplémentaire

### 7.6.1 Résultats

Pourcentage de victoire	Moyenne de déplacements	Moyenne de bombes
50.9%	209.2	13.9

**Table 7.6:** Résultats pour le niveau supplémentaire sur 1000 parties

### 7.6.2 Analyse des défaites

A faire

## CONCLUSION

Ce projet autour du jeu Lode Runner nous a permis de concevoir et d'implémenter une intelligence artificielle pour jouer à ce jeu. Malgré des contraintes, nous avons pu élaborer une stratégie robuste basée sur l'algorithme  $A^*$  pour gérer au mieux les situations rencontrées.

L'évaluation expérimentale a démontré l'efficacité de notre IA sur des niveaux variés, atteignant un taux de réussite de 100% pour les niveaux les plus simples et maintenant des performances honorables face à des niveaux plus difficiles. Cela reflète d'une cohérence entre la conception algorithmique de notre stratégie et son application.

Ces résultats montrent aussi les limites de notre IA, notamment face à des niveaux plus complexes, où des améliorations pourraient être apportées pour gérer des situations avec davantage d'ennemis.

Même si j'étais en filière MPI l'année dernière, j'ai apprécié travailler sur ce projet, qui m'a permis de pousser mes compétences en algorithmique et en programmation. Enfin, la rédaction de ce rapport m'a beaucoup appris, car c'est la première fois que je rédige un rapport aussi long et complet. J'ai aussi pu m'initier à  $\text{\LaTeX}$ , que je n'avais jamais utilisé auparavant.

