

# Étude sur l'apprentissage par renforcement dans les jeux

## Projet de Bachelor 2018 - hepia

Étudiant : Federico Pfeiffer  
Professeur : Guido Bologna

14 juin 2018

## Résumé

// TODO

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	Contexte . . . . .	3
1.2	Objectifs . . . . .	3
1.3	Réalisation . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Théorie</b>	<b>5</b>
2.1	Définitions . . . . .	5
2.2	Notions de base . . . . .	7
2.2.1	Fonctionnement général de l'apprentissage par renforcement . . . . .	7
2.2.2	Valeur d'un état . . . . .	7
2.2.3	$V(s)$ : Équation de Bellman . . . . .	9
2.2.4	Apprentissage par renforcement : pseudo code . . . . .	10
2.3	Algorithme Q-Learning . . . . .	11
2.3.1	Explore vs Exploit . . . . .	11
2.3.2	Valeur d'un état avec $Q(s,a)$ . . . . .	11
2.3.3	Algorithme Q-Learning . . . . .	12
2.3.4	Limitations de l'algorithme Q-Learning . . . . .	13
2.4	Réseaux neuronaux . . . . .	13
2.4.1	Enjeux . . . . .	13
2.4.2	Présentation . . . . .	14
2.4.3	Prédiction . . . . .	15
2.4.4	Apprentissage . . . . .	20
2.5	Algorithme Deep Q-Learning (DQN) . . . . .	22
2.5.1	Mise à jour de la fonction $Q(s,a)$ . . . . .	23
2.5.2	Pseudo-code de l'algorithme Deep Q-Learning . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Implémentation</b>	<b>28</b>
3.1	Fonctionnement . . . . .	28
3.1.1	Vue d'ensemble : choix d'une action . . . . .	28
3.1.2	Apprentissage . . . . .	29
3.1.3	Regarder l'agent jouer . . . . .	30

3.1.4	Tester soi-même l'environnement . . . . .	30
3.1.5	Configuration . . . . .	30
3.2	Architecture . . . . .	33
3.2.1	Diagramme de classes . . . . .	33
3.2.2	Méthodes clés . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Résultats</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>Annexes</b>	<b>36</b>

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Contexte

L'apprentissage par renforcement est une branche d'intelligence artificielle connaissant un essor depuis quelques années, et qui a permis des avancées technologiques telles que la voiture autonome, le logiciel "AlphaGo" de Google réussissant à battre le champion du monde de Go, ou encore la création de robots capables d'apprendre à se mouvoir sans intervention humaine. Le champ d'application est vaste, et est actuellement sujet à de nombreuses recherches pour découvrir de nouveaux champs d'applications.

J'ai profité du travail de Bachelor afin d'étudier par la pratique l'apprentissage par renforcement. Pour ce faire, un environnement de jeu a été créé pour faire évoluer un agent dans celui-ci. L'étude des réseaux de neurones artificiels a également été nécessaire étant donné qu'une grande partie des algorithmes d'apprentissage par renforcement utilisent de tels réseaux de neurones.

### 1.2 Objectifs

Les objectifs de ce présent travail de bachelor sont les suivants :

- Comprendre les modèles de réseaux de neurones artificiels standards et profonds
- Comprendre les concepts de l'apprentissage par renforcement
- Comprendre et utiliser au moins un "framework" pour l'utilisation de l'apprentissage par renforcement
- Construire un jeu avec un agent qui apprend par renforcement
- Analyse des résultats
- Rédaction du rapport

### 1.3 Réalisation

Le jeu dans lequel l'agent évolue est le suivant : un agent (en bleu) doit éviter des ennemis représentés en rouge, tout en récupérant de la nourriture (en vert). Au fur et à mesure que l'agent avance, l'endurance de l'agent faiblit (le diamètre de l'agent diminue). Si l'endurance de l'agent est trop faible, le jeu se termine. Si l'agent se fait attraper par un ennemi, le jeu est également terminé. Si l'agent atteint la nourriture, son endurance est remise au maximum, et une nouvelle nourriture est placée aléatoirement dans le jeu. Le but de l'agent est de tenir un maximum de temps sans que le jeu se termine. Les actions possibles dans l'environnement sont d'avancer dans une direction des points cardinaux (N, NE, E, SE, S, SO, O, NW), ou ne rien faire. Le nombre d'actions possibles équivaut donc à neuf.



FIGURE 1.1 – Présentation de l'environnement (Jeu)

Afin de faciliter l'apprentissage, ce dernier a été divisé en 3 parties :

1. Apprendre à éviter les ennemis (sans nourriture)
2. Apprendre à attraper la nourriture (sans ennemis)
3. Une fois les deux premières compétences apprises, l'agent doit ensuite apprendre à jongler entre les deux compétences afin de jouer convenablement au jeu.

Cela implique les contraintes suivantes :

- L'environnement (jeu) doit être configurable pour qu'il puisse être utilisé indépendamment avec uniquement des ennemis, que de la nourriture, ou les deux en même temps.
- L'agent doit être implémenté de manière générique, de sorte à ce qu'il puisse apprendre les connaissances indépendamment. (éviter les ennemis, attraper la nourriture, ou les deux en même temps).
- Une fois des connaissances apprises, l'on doit pouvoir les sauvegarder afin de pouvoir les réutiliser pour la suite de l'apprentissage : une fois que l'agent a appris à éviter les ennemis ou attraper de la nourriture, il faut pouvoir faire en sorte de réutiliser ces compétences sans avoir à les réapprendre à chaque fois que le programme démarre.

## Chapitre 2

# Théorie

### 2.1 Définitions

#### Apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement consiste à considérer un agent autonome évoluant dans un environnement donné. La seule chose que connaît l'agent sont les différentes actions qu'il peut effectuer au sein de son environnement. Le but de l'agent est d'obtenir un score maximal par le biais de récompenses vis à vis des actions qu'il a entrepris.

Au début, l'agent choisit les actions de manière aléatoire, et on lui indique si l'action qu'il a entrepris lui confère une récompense, un malus, ou pas de retour particulier. Si l'état terminal est atteint, l'environnement est remis à zéro et l'agent continue ses expériences depuis cet état initial. L'agent peut ainsi "apprendre par la pratique", les actions à entreprendre en fonction de l'état où il se trouve, dans le but de maximiser le score.

#### Agent

Un agent est un programme informatique autonome, ou une partie d'un programme qui est autonome, c'est à dire qu'il ne dépend pas d'interventions extérieures pour évoluer. (Il ne doit pas rester bloqué en attente d'une intervention humaine).

Les entrées (input) de l'agent permettent de percevoir l'environnement dans lequel l'agent évolue. Les sorties (output) de l'agent sont les actions choisies par l'agent pour influencer sur l'environnement dans lequel il évolue. Il n'y a pas d'autres entrées/sorties. Toute la logique applicative liée à l'agent est donc implémentée au sein de l'agent. La seule chose avec laquelle communique l'agent est donc l'environnement externe, par le biais de "capteurs" ou autres "sens" au terme "biologique". Il est important de signaler que l'agent n'a pas forcément conscience de l'état complet de l'environnement. La représentation de l'environnement que l'agent se fait dépend donc des capteurs qu'il détient.

#### Environnement

L'environnement est le monde dans lequel l'agent évolue et dans lequel l'agent, de par ses actions, modifie l'état de l'environnement. L'environnement est séparé de l'agent, et le seul lien entre ces derniers sont les *inputs* de l'agent, c'est à dire les capteurs par lesquels l'agent peut percevoir l'environnement, et les *outputs* de l'agent, c'est à dire les différentes actions que l'agent a pour influencer sur l'environnement.

## État et état terminal

Un état est une photo instantanée du monde perçu par l'agent. Un état comprend l'état de l'environnement ainsi que l'état de l'agent. Un état terminal représente un état dans lequel l'agent n'a plus d'actions à effectuer. Étant donné qu'il n'y a plus d'actions à effectuer, l'environnement peut alors être "remis à zéro" afin que l'agent puisse recommencer à évoluer.

## Action et récompense

Chaque action mène à un changement d'état. Une action est la seule possibilité pour un agent d'influencer l'environnement dans lequel il évolue. C'est aussi la seule manière pour un agent de savoir si l'action qu'il a entreprise est bonne, mauvaise ou "sans effet". Pour chaque action, l'agent reçoit donc une récompense (bonne, mauvaise ou neutre). Si la récompense est "bonne", l'agent reçoit un score positif; si l'action est "mauvaise", l'agent reçoit une récompense négative. L'agent peut alors ajuster son expérience dans le but de favoriser les actions menant à maximiser un score positif, ou minimiser un score négatif.

Si la récompense est neutre, l'agent enregistre néanmoins l'action qu'il a entreprise au cas où l'action neutre même à futur état permettant un score positif ou négatif. Si l'agent est un joueur d'échec et que l'action qu'il entreprend ne permet pas de gagner, il est quand même important d'enregistrer l'état/action vécu si jamais cela l'emmène par la suite dans un état/action où il gagne ou perd. De même, si une voiture doit tourner à gauche et qu'elle continue tout droit pendant une fraction de seconde, elle doit pouvoir savoir si le fait de tourner à gauche la fraction de seconde d'après l'amènera à une sortie de route, ou si elle peut quand même tourner à gauche sans sortir de route.

L'important pour l'agent est de pouvoir enregistrer les actions prises d'une manière où d'une autre, en vue de savoir si cette action mène plutôt à un échec, une réussite, ou à un état neutre.

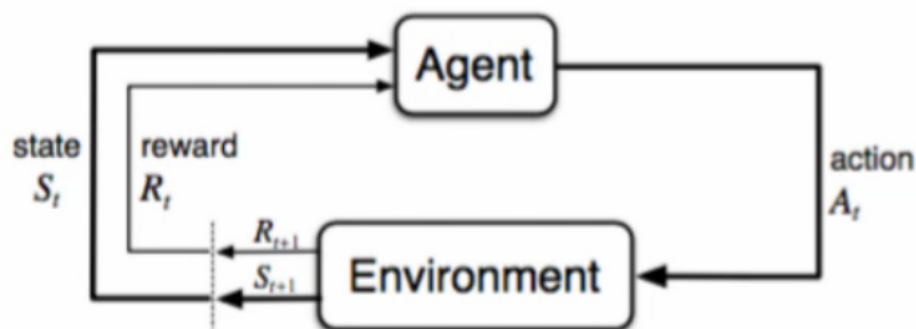


FIGURE 2.1 – Action et récompenses

## Épisode

Un épisode commence depuis l'état initial (environnement mis à zéro) et termine à un état terminal. Lorsque l'agent atteint un état terminal, l'environnement est réinitialisé et l'agent recommence un nouvel épisode. L'agent enregistre chaque récompense durant toute la durée de l'épisode afin de connaître le score total que l'agent a eu pendant l'épisode.



## 2.2 Notions de base

### 2.2.1 Fonctionnement général de l'apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement consiste à donner une récompense à un agent lorsque ce dernier parvient à effectuer une tâche demandée, ou lorsqu'il s'en approche. De la même manière, l'agent reçoit un malus lorsque ce dernier s'éloigne de la tâche demandée. Le but de l'agent est d'obtenir un maximum de récompense. De cette manière, le comportement de l'agent est influencé par les récompenses et malus qu'il reçoit. Au fur et à mesure que l'agent effectue des actions et reçoit des récompenses/malus, ce dernier tend à renforcer un comportement menant à un maximum de récompenses, et éviter les actions menant à des malus. À noter qu'à partir de maintenant nous ne parlerons que de récompenses : un malus sera simplement traduit par une récompense négative.

Plus concrètement, l'agent commence par effectuer des actions aléatoires et reçoit une récompense / malus pour chaque action effectuée. Pour chaque action commise, l'agent enregistre l'état  $S$  dans lequel il se trouvait, l'action effectuée, la récompense/malus reçue et l'état  $S'$  dans lequel il se retrouve suite à l'action. Si l'agent se retrouve dans un état terminal, l'environnement est réinitialisé mais l'agent garde en mémoire les actions / états / récompenses vécus. À une fréquence définie par le développeur, l'agent passe par une phase d'ajustement (*training*) où il parcourt tous les actions / états / récompenses vécus de sorte à ajuster son comportement (actions choisies) lors des états futurs qu'il rencontrera, dans le but de maximiser les récompenses.

### 2.2.2 Valeur d'un état

Jusqu'à la fin du chapitre, nous définirons le score d'un épisode par la somme des récompenses obtenues au cours des actions effectuées. Le but de l'agent est d'obtenir le meilleur score possible, et de retenir les états par lesquels il est passé afin d'obtenir ce meilleur score. (Et également de retenir les états par lesquels il est passé qu'il l'ont mené à un mauvais score).

Afin d'apprendre à choisir les bonnes actions à effectuer en fonction de l'état où l'agent se trouve, ce dernier a pour but d'apprendre la valeur de chaque état qu'il rencontre : un état qui le rapproche d'un meilleur score a une meilleure valeur qu'un état qui l'éloigne d'un meilleur score.

L'enjeu est donc de trouver une manière d'attribuer une valeur à chaque état en fonction des états qui vont suivre, afin de choisir l'action appropriée menant à un meilleur état. Prenons l'exemple (arbitraire) comprenant 2 épisodes, avec un état initial  $s_0$  (*s pour state*) :

Dans le premier épisode, l'agent commence à l'état  $s_0$  (état initial), puis choisit les actions passant par  $s_1$ ,  $s_2$  et  $s_3$ .  $s_3$  étant un état terminal, l'épisode 1 s'arrête et l'agent obtient comme score +98 (qui est la somme des récompenses obtenues pendant son épisode). Dans le deuxième épisode, l'agent commence à l'état  $s_0$  (état initial), puis choisit les actions passant par  $s_1$ ,  $s_4$  et  $s_5$ .  $s_5$  étant un état terminal, l'épisode 2 s'arrête et l'agent obtient un score de -102 pour le deuxième épisode.

Comment pourrions-nous donc attribuer une valeur à chaque état ? Intuitivement, nous concluons qu'il est nécessaire d'attribuer une valeur à chaque état une fois qu'un épisode est terminé. En effet, une fois l'épisode terminé, nous pouvons évaluer chacune des actions prises par l'agent, étant donné que nous savons si les actions effectuées ont mené à l'état terminal voulu. Une première idée serait donc d'attribuer à chaque état la récompense finale auquel l'état peut mener. Si un état mène à deux récompenses différentes, nous pouvons par exemple attribuer la valeur de l'état en faisant la somme des deux récompenses auxquels l'état peut mener.

Après avoir effectué sa phase d'ajustement (*training*) dans le but de connaître la valeur de chaque

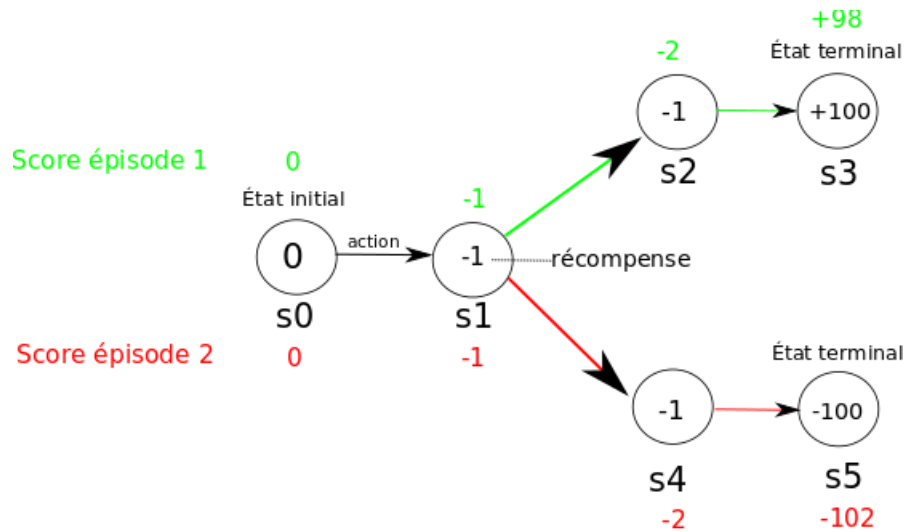


FIGURE 2.2 – Valeur d'un état : introduction 1

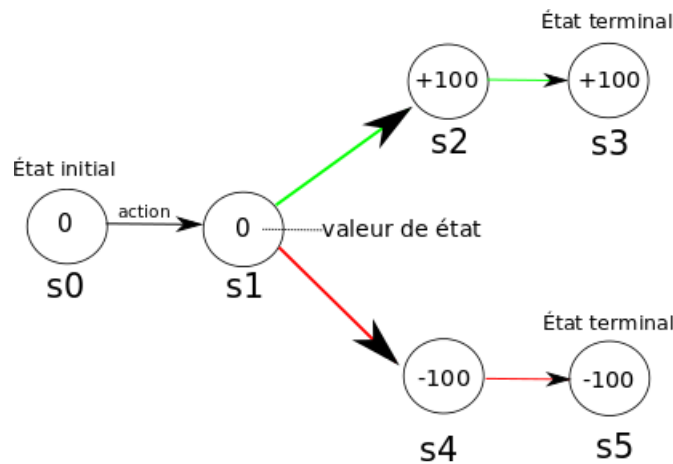


FIGURE 2.3 – Valeur d'un état : introduction 2

état (phase d'apprentissage), l'agent peut ensuite savoir que depuis l'état s1, il est préférable de choisir l'action menant à l'état s2, étant donné qu'un meilleur score l'attend.

### Discount factor ( $\gamma$ )

Le problème de la méthode précédente pour attribuer une valeur à un état est qu'on ne tient pas compte de la distance à laquelle se trouve la récompense finale.

En prenant l'exemple suivant, il serait préférable pour l'agent de passer directement à s3 depuis s1. (L'agent a meilleur temps d'effectuer l'action qui le mène le plus rapidement à l'état menant à une forte récompense). Or, l'agent n'a pas de moyen de savoir qu'il a meilleur temps de passer directement par s3 :

Une solution pour palier à ce problème est de calculer la valeur d'un état en ajoutant un coefficient nommé *discount factor*  $\gamma$  de cette manière :  $V(s_t) = \gamma V(s_{t+1})$  avec  $\gamma \in [0, 1]$ . En prenant  $\gamma = 0.9$ , on parvient à attribuer une valeur à chaque état qui inclut cette notion de distance envers la récompense la plus forte. Depuis s1, l'agent va donc tendre vers s3 directement car la valeur de s3 est plus grande que s2.

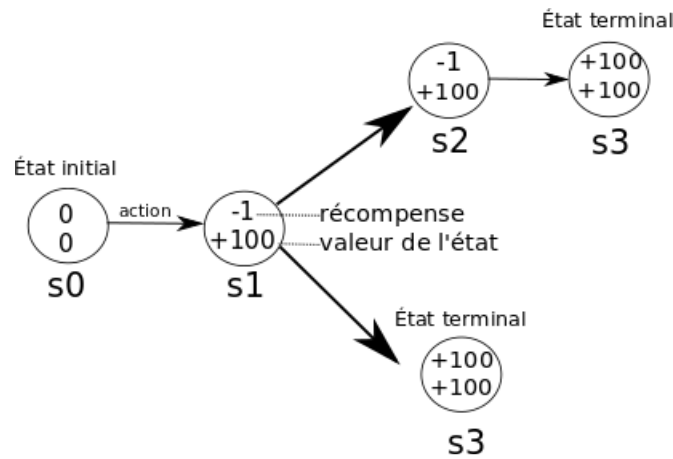


FIGURE 2.4 – Valeur d'un état : introduction sans discount factor

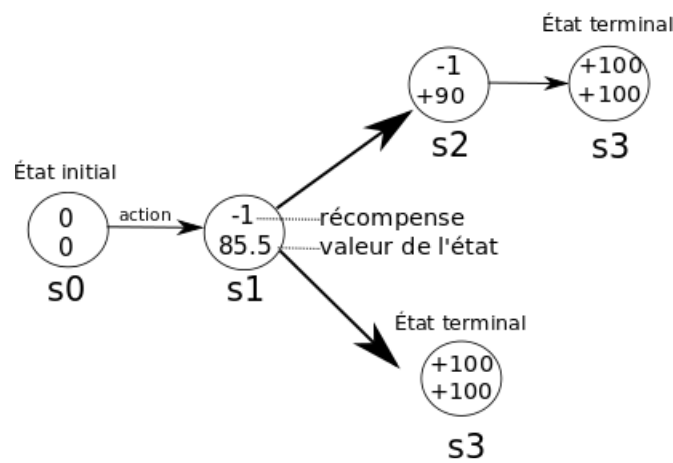


FIGURE 2.5 – Valeur d'un état : introduction avec discount factor

### 2.2.3 $V(s)$ : Équation de Bellman

La fonction  $V(s) = \gamma V(s_{t+1})$  est incomplète. La version formelle vient de l'équation de Bellman. Elle prends en compte plusieurs notions supplémentaires :

Elle prends en compte la récompense reçue à chaque état, ce qui donne  

$$V(s_t) = r + \gamma V(s_{t+1})$$

Aussi, il est possible qu'un environnement soit fait de telle sorte qu'une transition d'un état à un autre ne soit pas déterministe. Par exemple, si un agent choisit une action menant à un état  $s'$ , on peut imaginer que l'environnement aie un comportement aléatoire menant l'agent à un état qui n'était pas prévu par l'agent. (dans l'exemple d'une voiture autonome, le fait de voir un enfant jouer sur un trottoir n'implique pas forcément que celui-ci reste sur le trottoir). Pour un état  $s_t$ , il faudrait pouvoir multiplier la probabilité de se retrouver dans un état  $s_{t+1}$ , et recevoir une récompense  $r$  après avoir fait une action  $a$ . En d'autres termes, pour un état  $s_t$ , il faut évaluer tous les états  $s_{t+1}$  et toutes les récompenses  $r$ , et en calculer la probabilité.

La fonction  $V(s)$  devient

$$\sum_{s_{t+1}} \sum_r p(s_{t+1}, r | s_t, a) \{r + \gamma V(s_{t+1})\}$$

Enfin, il se peut que pour un certain état, l'agent aie une certaine probabilité de choisir une certaine action. (Il peut par exemple connaître la meilleur action à entreprendre, mais il a une politique d'avoir 10% de probabilité de faire une action aléatoire dans le but d'explorer certaines

actions). La fonction est alors agrémentée du terme suivant :  $\sum_a \pi(a|s)$ . Le  $\pi$  représente la politique de l'agent.

Ainsi, l'équation de Bellman indique que la valeur d'un état peut se calculer de la manière suivante :

$$V_\pi(s) = \sum_a \pi(a|s) \sum_{s'} \sum_r p(s', r | s, a) \{r + \gamma V_\pi(s')\}$$

Le terme  $\pi(a|s)$  représente la probabilité de choisir une action  $a$  étant donné l'état  $s$ , suivant une politique  $\pi$ . (Dans le cas où la politique de l'agent est de choisir une action aléatoire tous les 10% par exemple). Si l'agent a une politique visant à ne choisir que la meilleure action et que le choix de cette action n'est pas probabiliste, ce terme vaut simplement 1. De même, si l'agent n'a qu'une action possible pour un certain état  $s$ , le terme  $\sum_a \pi(a|s)$  équivaut à  $\pi(a|s)$

Le terme  $p(s', r | s, a)$  représente, depuis un état  $s$ , la probabilité de se retrouver dans l'état suivant  $s'$  et de gagner la récompense  $r$ , ayant choisi l'action  $a$ . Pour connaître la valeur de l'état  $s$ , il faut donc pouvoir envisager tous les états  $s'$  possibles, et toutes les récompenses  $r$  en choisissant une action  $a$ . C'est pour cela que l'on "itère" en faisant la somme de tous les  $p(s', r | s, a)$  en parcourant tous les états  $s'$  possibles et toutes les récompenses  $r$  possibles depuis un état  $s$ . D'où les deux sommes  $\sum_{s'} \sum_r$  devant  $p(s', r | s, a)$  :  $\sum_{s'} \sum_r p(s', r | s, a)$

L'équation de Bellman peut être lue de la manière suivante : depuis un état  $s$ , on itère toutes les actions possibles depuis cet état. Dans cette itération, on itère toutes les récompenses possibles et tous les états  $s'$  qui découlent en choisissant l'action  $a$ . A chaque itération, on multiplie la probabilité  $\pi(a|s)$  à la probabilité  $p(s', r | s, a)$  et multiplie à la  $\{r + \gamma V_\pi(s')\}$

$$V_\pi(s) = \sum_a \pi(a|s) \sum_{s'} \sum_r p(s', r | s, a) \{r + \gamma V_\pi(s')\}$$

Dans ce projet de bachelor, nous considérerons l'environnement déterministe, ce qui réduit l'équation de Bellman à ceci :

$$V_\pi(s) = \sum_a \pi(a|s) \{r + \gamma V_\pi(s')\}$$

## 2.2.4 Apprentissage par renforcement : pseudo code

Maintenant que nous connaissons comment attribuer une valeur à chaque état, nous pouvons imaginer un premier pseudo-code permettant à un agent d'apprendre à évoluer dans un environnement. Le problème de cette équation est qu'elle part du principe que nous connaissons tous les états et actions possibles. Il faut donc procéder de manière itérative jusqu'à ce que la valeur d'un état converge vers une valeur fixe. Nous nous arrêtons lorsque toutes les valeurs des états semblent avoir été calculées :

```
# phase d'apprentissage
world = new World()
agent = new Agent()
gamma = 0.9

max_divergence = 0.1
divergence = inf
while divergence > max_divergence :
    for state in world.get_all_states() :
```

```
for action in world.get_possible_actions(state) :
    reward, next_state = world.do_action(state, action)
    old_v = agent.V[state]
    agent.V[state] = reward + gamma * agent.V[next_state]
    divergence = max(divergence, abs(old_v-agent.V[state]))

# phase une fois l'apprentissage effectué
state = world.reset()
while not world.is_in_terminal_state() :
    action = agent.choose_action_to_best_state(state)
    state = world.do_action(action)
```

Supposer que l'on doive connaître tous les états et actions possibles pose évidemment problème dans le cas de l'apprentissage par renforcement, étant donné que l'agent doit apprendre en explorant lui-même à travers les actions qu'il entreprend. Pour des raisons de temps de calcul, nous ne souhaitons pas explorer toutes les actions possibles, mais souhaitons explorer que celles qui nous semblent nous mener à un meilleur comportement de l'agent. Heureusement, des algorithmes ont été mis en place afin de pouvoir estimer correctement la fonction de Bellman ( $V(s)$ ) sans avoir à tout explorer, permettant ainsi à l'agent de pouvoir estimer raisonnablement la valeur de l'état dans lequel il se trouve, et choisir l'action adéquate pour maximiser son score.

## 2.3 Algorithme Q-Learning

### 2.3.1 Explore vs Exploit

Dans la précédente section, nous avons vu un algorithme permettant d'évaluer  $V(s)$  en supposant que l'on connaisse tous les états, actions et récompenses possibles suivant l'environnement donné. Dans la majorité des cas, il n'est évidemment pas possible de connaître toutes ces valeurs à l'avance. Il convient donc d'utiliser l'agent de sorte à ce qu'il explore de lui même toutes ces différentes valeurs dans le but d'estimer correctement la fonction  $V(s)$ .

Au fur et à mesure que l'agent explore les actions, la fonction  $V(s)$  va petit à petit atteindre une estimation correcte, et l'agent va petit à petit connaître les meilleurs états à rencontrer, ou les meilleures actions à effectuer pour chaque état.

Comment savoir si l'agent dispose de connaissances suffisantes pour arrêter d'explorer/tester des actions? A quel moment l'agent doit-il utiliser la connaissance qu'il dispose de  $V(s)$ ? Une solution est d'effectuer une action aléatoire avec une probabilité  $\epsilon$ . La valeur de  $\epsilon$  peut varier en fonction du temps selon ce qu'a choisit le programmeur.

### 2.3.2 Valeur d'un état avec $Q(s,a)$

Utiliser  $V(s)$  pour attribuer une valeur à chaque état peut s'avérer limitant : on n'enregistre finalement que la valeur d'un état en fonction de l'état en question. Au lieu d'attribuer une valeur à un état, nous pourrions attribuer une valeur à un couple état/action effectué.

La fonction attribuant une valeur à un couple état/action s'appelle la fonction  $Q$  value, ou  $Q(s,a)$ , et peut être représentée de la sorte, ressemblant fortement à  $V(s)$  :

$$V_{\pi}(s) = \sum_a \pi(a|s) \sum_{s'} \sum_r p(s', r | s, a) \{r + \gamma V_{\pi}(s')\} \quad (2.1)$$

$$Q_{\pi}(s, a) = \sum_{s'} \sum_r p(s', r | s, a) \{r + \gamma Q_{\pi}(s', a')\} \quad (2.2)$$

Comme indiqué plus haut, l'environnement utilisé est déterministe, ce qui permet de réduire les équations à ceci :

$$V_{\pi}(s) = \sum_a \pi(a|s) \{r + \gamma V_{\pi}(s')\} \quad (2.3)$$

$$Q_{\pi}(s, a) = \{r + \gamma Q_{\pi}(s', a')\} \quad (2.4)$$

### 2.3.3 Algorithme Q-Learning

Si nous connaissions tous les états, actions et récompenses possibles, il serait possible de définir  $Q(s,a)$  dans un environnement déterministe, de la manière suivante :

$$Q(s, a) = r + \gamma Q(s', a')$$

Or, ne connaissant pas tous les états, actions et récompenses possibles, (et ne voulant pas tous les explorer), l'idée du Q-learning est d'ajuster petit à petit  $Q(s,a)$ , par une fraction  $\alpha$ .

$$Q(s, a) = old\_Q(s, a) + \alpha(new\_Q(s, a) - old\_Q(s, a))$$

Le terme  $\alpha$  est appelé "learning\_rate" est choisi arbitrairement par le développeur et est compris entre  $[0, 1]$ . Il correspond à l' $\alpha$  utilisé lors d'un "gradient descent".

La méthode Q-Learning met donc  $Q(s,a)$  à jour selon la formule suivante :

$$Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha(\{r + \gamma Q(s', a')\} - Q(s, a))$$

Le pseudo-code de la méthode Q-learning peut être défini de la manière suivante :

```
# phase d'apprentissage
world = new World()
agent = new Agent()
max_episodes = 100000
gamma = 0.9
epsilon = 0.1
alpha = 0.1

for i in range(max_episodes) :
    state = world.reset()
    while not world.game_over() :
        action = agent.choose_action(state, epsilon)
        reward, next_state = world.do_action(state, action)
        a2 = agent.choose_action(next_state, epsilon)

        if world.game_over() :
            agent.Q[state][action] += alpha*(reward)
        else :
            agent.Q[state][action] += alpha*(reward+gamma*agent.Q[next_state][a2])

    state = next_state

# phase une fois l'apprentissage effectué
state = world.reset()
```

```
while not world.game_over() :
    action = agent.choose_action(state, epsilon)
    state, _ = world.do_action(action)
```

### 2.3.4 Limitations de l'algorithme Q-Learning

L'inconvénient majeur de l'algorithme Q-Learning vient du fait qu'il faut pouvoir stocker la fonction  $Q(s,a)$  dans un tableau représentant chaque couple (état, action) : si le fait de garder en mémoire  $V(s)$  utilise un tableau à 1 dimensions de taille équivalant à autant d'états possibles, la fonction  $Q(s,a)$  nécessite beaucoup plus de mémoire car elle doit enregistrer les valeurs dans un tableau à 2 dimensions, de taille  $|S| * |A|$  cases.

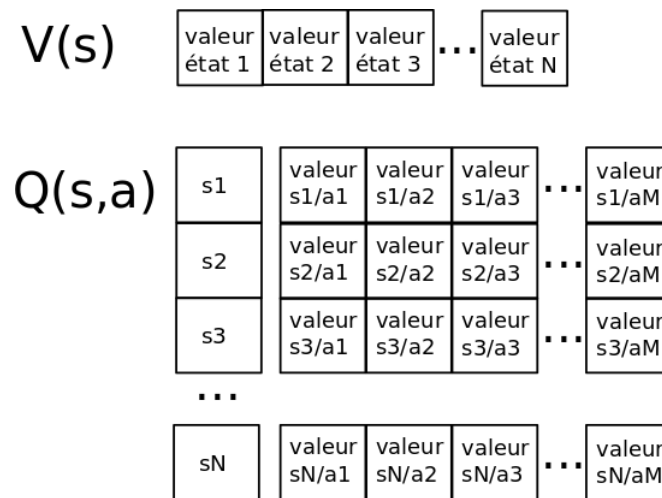


FIGURE 2.6 – Enregistrement  $V(s)$  et  $Q(s,a)$

Dans des environnements avec de nombreux (voir infinités) d'états et d'autant d'actions possibles, le stockage de la valeur de  $Q(s,a)$  devient très difficile vu la taille qu'elle représente. De plus, si l'environnement présente autant d'états et d'action possibles, l'agent va devoir effectuer beaucoup d'exploration afin d'évaluer la valeur de chaque couple (état, action), ce qui rendrait l'apprentissage extrêmement lent, voir impossible. Une solution pour palier à cet inconvénient est de remplacer le tableau  $Q[s][a]$  par un réseau neuronal.

## 2.4 Réseaux neuronaux

### 2.4.1 Enjeux

Le problème majeur des méthodes d'apprentissage par renforcement vues jusqu'ici est que lorsque l'environnement devient complexe et qu'il comporte trop d'états/actions possibles, il devient difficile (voir impossible) d'arriver à une estimation correcte que  $V(s)$  ou  $Q(s,a)$ . Les réseaux neuronaux se sont révélés être de très bons estimateurs dans de nombreux champs d'applications.

Les réseaux de neurones sont utilisés de la manière suivante :

1. On crée un réseau de neurones qui a pour but d'estimer (prédire) quelque chose de précis. Au début, le réseau de neurone renvoie des réponses aléatoires.
2. On entraîne ce réseau de neurone en lui donnant de nombreux exemples avec la solution à estimer pour chaque exemple. (exemple d'input, solution)

3. Au bout d'un certain nombre d'exemples donnés, le réseau de neurone s'est ajusté de sorte à pouvoir estimer (prédire) de nouveaux inputs en les estimant correctement.

De nombreuses applications ont été trouvées pour les réseaux de neurones : on peut par exemple fournir des milliers d'images comportant des tumeurs et des milliers d'images ne comportant pas de tumeurs pour qu'à la fin de son apprentissage, le réseau puisse indiquer si l'image (qu'il n'a jamais vue) comporte ou ne comporte pas de tumeur. On peut également fournir un millier d'images de chiffres écrits à la main pour qu'à la fin de son apprentissage, le réseau puisse reconnaître le chiffre écrit dans une image quelconque que le réseau n'a pas encore vu. Le champ d'application est vaste : de la reconnaissance vocale à la proposition de contenu personnalisé pour Youtube ou Facebook, de nombreux domaines utilisent les réseaux neuronaux, suivant ce même principe de base. (Apprentissage, puis utilisation pour prédire quelque chose).

Dans le cas de l'apprentissage par renforcement, les réseaux de neurones permettent d'approximer correctement les fonctions  $V(s)$  ou  $Q(s,a)$  dans de nombreux environnements. L'utilisation d'un réseau de neurone permet les méthodes telles que le Deep Q-Learning que nous verrons dans le prochain chapitre.

## 2.4.2 Présentation

Un réseau de neurones est constitué des parties suivantes :

- Une couche "d'input", représentant la couche par laquelle les données rentrent dans le réseau. Dans le cas d'images, une image est donnée à la fois. Dans le cas de l'apprentissage par renforcement, un état est donné à la fois.
- Un certain nombre de couches, appelées "hidden layers". C'est dans ces couches que le réseau neuronal fait ses calculs pour effectuer une prédiction.
- Une couche "d'output". C'est à travers cette couche que le résultat de la prédiction est transmise.

L'idée est que chaque neurone est relié à tous les neurones de la couche suivante, afin d'effectuer un calcul particulier à chaque couche. A la fin, la couche "output" indique le résultat de la prédiction du réseau neuronal.

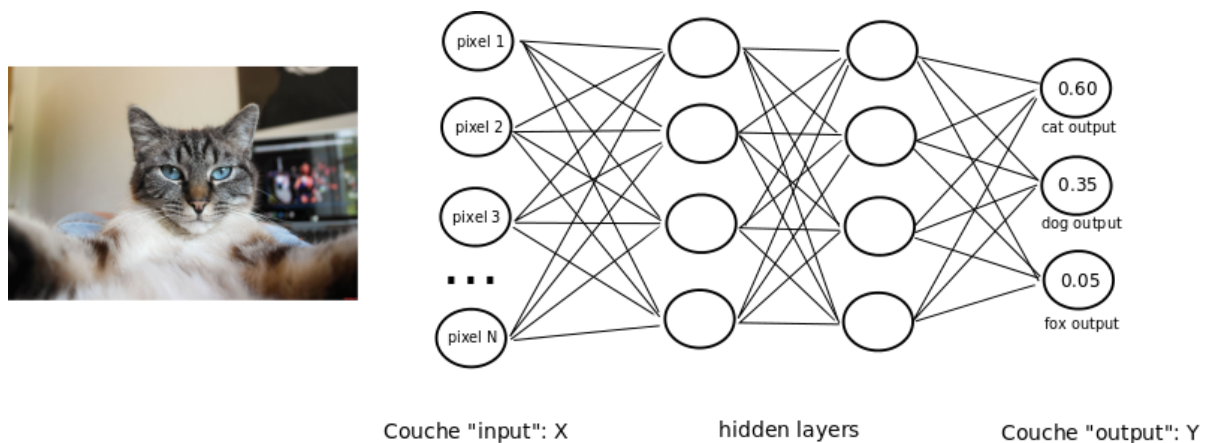


FIGURE 2.7 – Réseau neuronal : présentation 1

Dans ce premier exemple, le but du réseau neuronal est de prédire si l'image donnée dans la couche "input" est un chat, un chien, ou un renard. Le résultat de la prédiction indique que le réseau neuronal estime que l'image est à 60% un chat, à 35% un chien, et à 5% un renard. Pour interpréter le résultat, on prends le neurone de sortie dont l'estimation est la plus haute : cela correspond à la sorte "chat", ce qui indique que le réseau neuronal a estimé que l'image donnée en entrée est un chat.



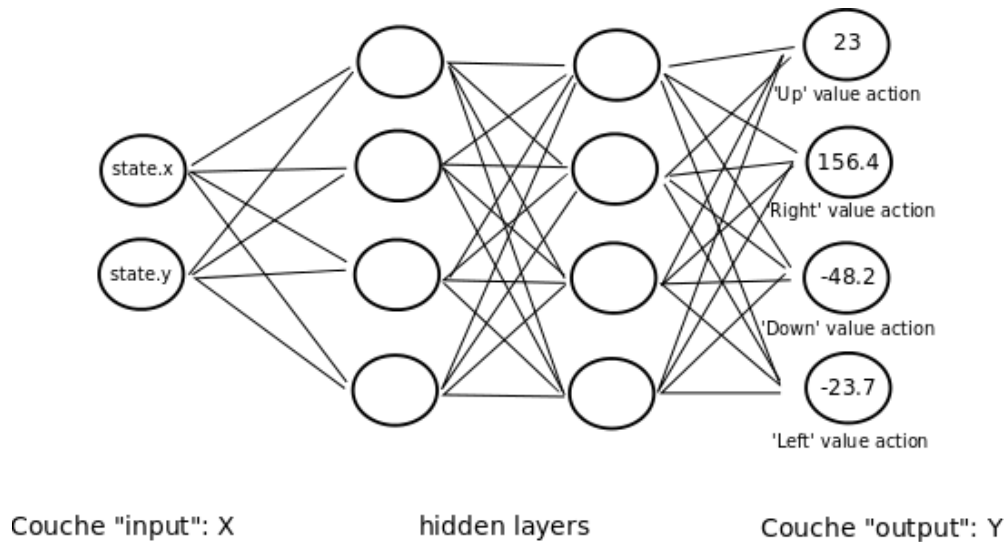


FIGURE 2.8 – Réseau neuronal : présentation 2

Dans le deuxième exemple, le but du réseau neuronal est de prédire la valeur de  $Q(s,a)$  dans l'environnement GridWorld. En input, on passe l'état dans lequel l'agent se trouve (les valeurs  $x$  et  $y$  représentant l'état). En sortie, le réseau indique l'estimation de la valeur de chaque action possible. Si l'agent ne décide pas d'effectuer une action aléatoire, l'agent prendra l'action dont la valeur est la plus haute : dans ce cas il s'agit de l'action 'Right'.

### 2.4.3 Prédiction

#### Notion de base

Pour décrire le fonctionnement d'un réseau neuronal, nous commencerons par la manière dont il effectue les prédictions.

Prenons l'exemple le plus simple : une valeur d'entrée (un neurone d'entrée) dont la valeur est  $x$ , une simple couche cachée d'un seul neurone contenant un poids  $w$  (weight), et une seule valeur de sortie (un seul neurone d'output) qui ne fait rien d'autre que ressortir la valeur de la couche cachée. La prédiction du neurone est calculée comme suit :

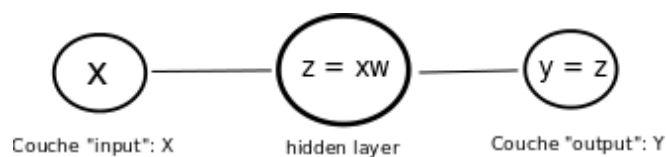


FIGURE 2.9 – Réseau neuronal : théorie 1

Le but de chaque neurone caché est de prendre la valeur d'entrée, de modifier cette valeur en fonction de poids ( $w$ ) (weight) que le neurone contient, et de transmettre son résultat au neurone suivant. Dans cet exemple, la prédiction vaudra :  $y = z = xw$

#### Notation matricielle

Prenons maintenant le même exemple, mais avec deux valeurs en entrées.  $x_1$  et  $x_2$ . La théorie veut que le neurone caché doit avoir 2 poids afin d'effectuer son calcul.

Dans cet exemple, la prédiction vaut donc  $y = z = x_1w_a + x_2w_b$

On peut reconnaître le caractère matriciel de la prédiction et représenter la prédiction selon la

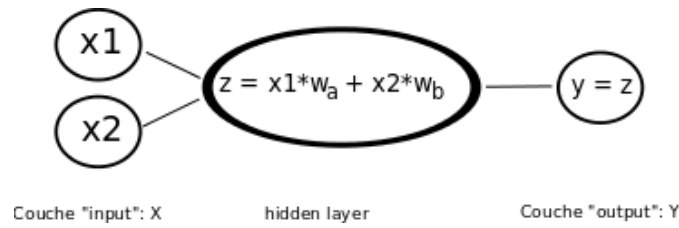


FIGURE 2.10 – Réseau neuronal : théorie 2

notation suivante.  $X$  représente les valeurs d'entrées,  $W$  représente les poids du neurone caché,  $Z$  représente le résultat du neurone caché, et  $Y$  représente la valeur de sortie :

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

$$W = (w_a, w_b) \quad (2.6)$$

$$Z = WX = (w_a, w_b) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = (x_1 w_a + x_2 w_b) \quad (2.7)$$

$$Y = Z = (x_1 w_a + x_2 w_b) \quad (2.8)$$

À noter que dans la théorie qui suit, nous utiliserons la notation ' $X$ ' (majuscule) pour définir une entrée (couche input), et la notation ' $Y$ ' (majuscule) pour définir les valeurs de sortie (output).

Grâce à la notation matricielle, on peut maintenant imaginer un réseau avec 2 entrées et une couche de 2 neurones cachés. Comme la sortie de la couche cachée contient 2 valeurs et qu'on décide que le neurone de sortie ne fait toujours rien d'autre que de copier la sortie de la couche cachée, le neurone de sortie renverra 2 valeurs en sortie.

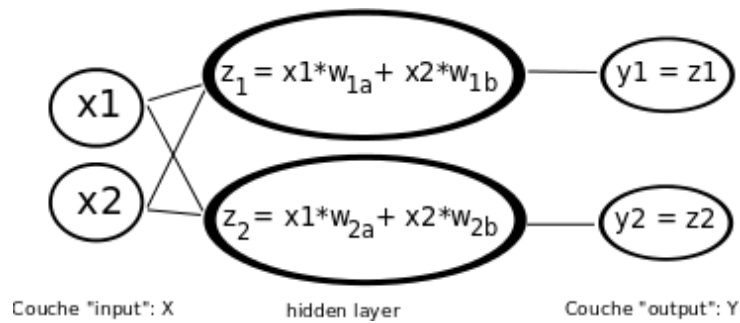


FIGURE 2.11 – Réseau neuronal : théorie 3

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

$$W = \begin{pmatrix} w_{1a}, w_{1b} \\ w_{2a}, w_{2b} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$Z = WX = \begin{pmatrix} w_{1a}, w_{1b} \\ w_{2a}, w_{2b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{1a}x_1 + w_{1b}x_2 \\ w_{2a}x_1 + w_{2b}x_2 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

$$Y = Z = \begin{pmatrix} w_{1a}x_1 + w_{1b}x_2 \\ w_{2a}x_1 + w_{2b}x_2 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Bien entendu, si l'on souhaite n'avoir qu'une valeur en sortie, il convient de modifier le neurone de sortie de sorte à ce qu'il fasse lui aussi un calcul dont le résultat n'a qu'une matrice de  $1 \times 1$ . La mécanique de base reste néanmoins la même : utiliser une version matricielle pour décrire

les couches et interactions entre nos neurones. De la même manière, il est possible d'ajouter plusieurs couches cachées en représentant les matrices de la bonne manière afin d'effectuer un calcul de prédiction plus complexe.

## Fonction d'activation

Il reste encore une notion à ajouter aux réseaux neuronaux vus jusqu'ici. Les réseaux neuronaux ont été directement inspirés des vrais réseaux de neurones et de la manière dont ils fonctionnent. En termes biologiques, un neurone fait suivre une information (valeur) uniquement si le résultat de son "calcul" est supérieur à un certain seuil. En d'autres termes, un neurone ne renvoie une information que si il a suffisamment été excité.

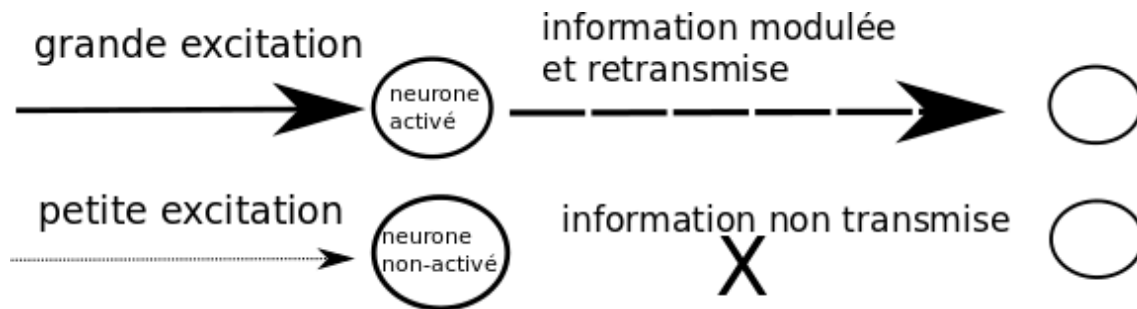


FIGURE 2.12 – Activation d'un neurone : représentation biologique

Ce seuil d'activation permet aux réseaux de neurones biologiques de transmettre une information d'une manière régulée en fonction des seuils (poids) de chaque neurone. Cela permet aux réseaux de neurones biologiques d'accomplir des calculs complexes tels que la nature nous l'a montré. La notion de seuil d'excitation implique que l'intensité de chaque information transmise entre neurones doit rester comprise au sein d'un seuil biologiquement acceptable. En d'autre termes, l'intensité de l'information transmise ne peut augmenter de neurones en neurones jusqu'à atteindre une valeur trop grande, mais doit garder une intensité telle qu'un neurone puisse stopper l'information ou au contraire la retransmettre. Mathématiquement parlant, l'idée serait de garder des valeurs de sorties comprises entre  $[0,1]$ .

D'un point de vue complètement différent et mathématique, les opérations effectuées par les réseaux neuronaux que nous avons vues sont uniquement linéaires. Afin d'effectuer des prédictions complexes, il convient d'ajouter une notion "non-linéaire" aux opérations effectuées. Aussi, afin de pouvoir réguler facilement les poids de chaque neurone lors de la phase d'apprentissage, il convient de faire en sorte que chaque neurone renvoie une valeur de sortie comprise entre  $[0,1]$ .

Ainsi, chaque neurone passe son résultat dans une fonction non linéaire  $f(x) \rightarrow [0,1]$ .

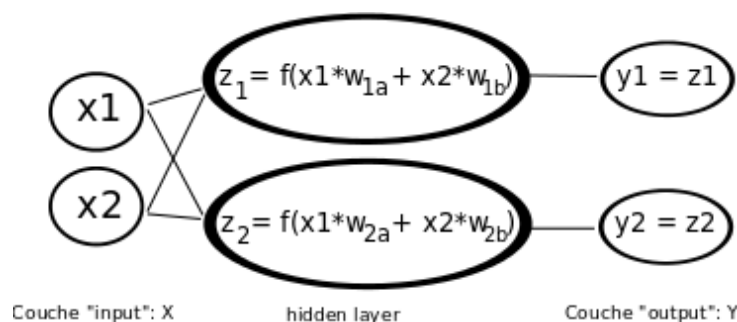


FIGURE 2.13 – Activation d'un neurone : représentation biologique

L'exemple ci-dessus correspond donc à

$$Z = f(WX) = f\left(\begin{pmatrix} w_{1a} & w_{1b} \\ w_{2a} & w_{2b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) = f\left(\begin{pmatrix} w_{1a}x_1 + w_{1b}x_2 \\ w_{2a}x_1 + w_{2b}x_2 \end{pmatrix}\right) \quad (2.13)$$

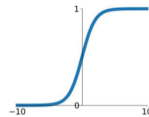
$$Y = Z = f\left(\begin{pmatrix} w_{1a}x_1 + w_{1b}x_2 \\ w_{2a}x_1 + w_{2b}x_2 \end{pmatrix}\right) \quad (2.14)$$

Voici les principales fonctions d'activations utilisées :

## Activation Functions

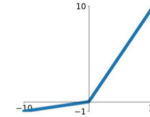
### Sigmoid

$$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$$



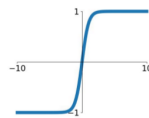
### Leaky ReLU

$$\max(0.1x, x)$$



### tanh

$$\tanh(x)$$

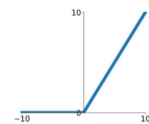


### Maxout

$$\max(w_1^T x + b_1, w_2^T x + b_2)$$

### ReLU

$$\max(0, x)$$



### ELU

$$\begin{cases} x & x \geq 0 \\ \alpha(e^x - 1) & x < 0 \end{cases}$$

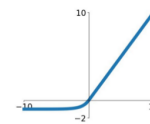


FIGURE 2.14 – Fonctions d'activation

Pour terminer, le fait d'utiliser des fonctions d'activations peut comporter un problème : si un neurone émet zéro à sa sortie, il y a de fortes chances pour que le neurone suivant émette aussi 0 à sa sortie. On peut utiliser un "biais" permettant d'inhiber / stimuler l'activation d'un neurone :

$$Z = f(WX + b)$$

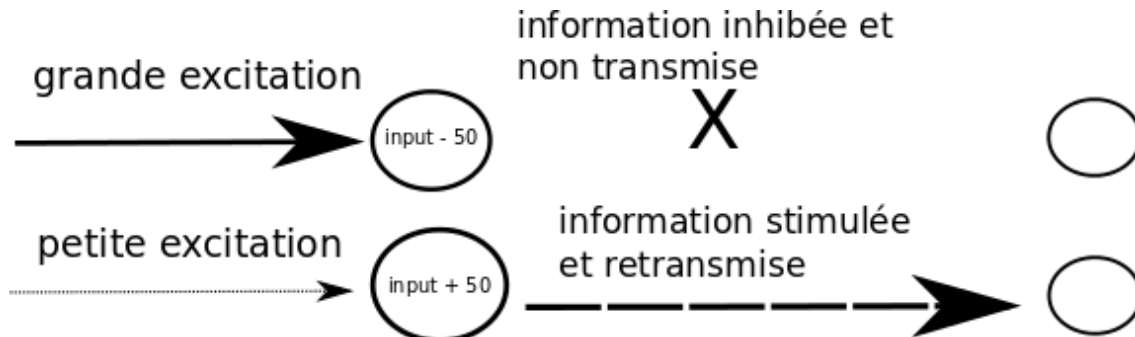
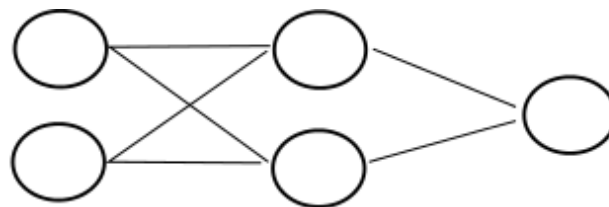


FIGURE 2.15 – Biais

Voici donc 2 réseaux neuronaux définis mathématiquement selon toute la théorie qui a été dite :



Couche "input": X    hidden layer Z    Couche "output": Y

FIGURE 2.16 – Réseau neuronal à 1 couche cachée de 2 neurones

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

$$Z = f(W_Z X + b_Z) = f\left(\begin{pmatrix} w_{z1a} & w_{z1b} \\ w_{z2a} & w_{z2b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{z1} \\ b_{z2} \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

$$Y = f_2(W_Y Z + b_Y) = f_2\left(\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} (w_{ya}, w_{yb}) + b_y\right) = (Y) \quad (2.17)$$

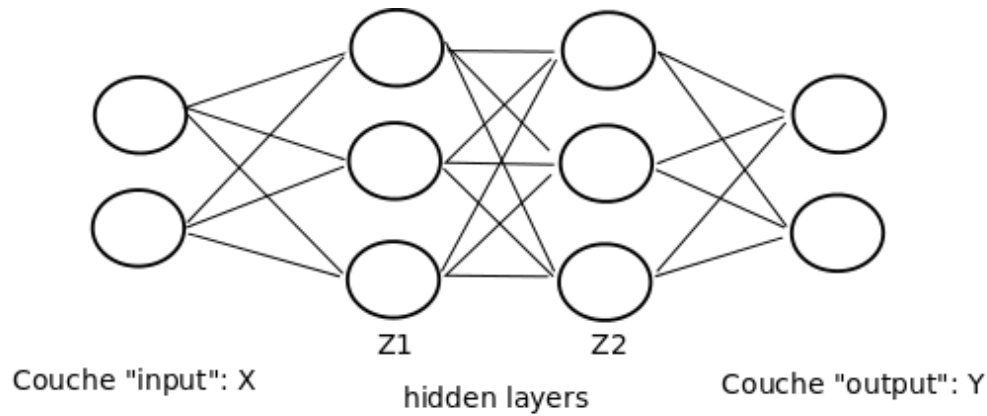


FIGURE 2.17 – Réseau neuronal à 2 couches cachées de 3 neurones

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

$$Z1 = f(W_{z1}X + b_{z1}) = \begin{pmatrix} z1_1 \\ z1_2 \\ z1_3 \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

$$Z2 = f_2(W_{z2}Z1 + b_{z2}) = \begin{pmatrix} z2_1 \\ z2_2 \\ z2_3 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

$$Y = f_3(W_Y Z2 + b_y) = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

## 2.4.4 Apprentissage

### Back-propagation

Nous avons vu comment un neurone peut prédire un résultat  $Y$  avec des valeurs  $X$  comme entrée. Au début, tous les poids  $W$  et biais  $b$  de chaque neurone sont initialisés aléatoirement. Le neurone va donc prédire un résultat aléatoire.

L'idée de l'apprentissage est la suivante : on donne une valeur d'entrée  $X$ , dont on connaît le résultat correct de la prédiction (Target  $T$ ). Le neurone va faire sa prédiction et sortir une valeur  $Y$ . Il faut alors ajuster chaque poids de sorte à réduire l'erreur  $|Y - T|$ . L'erreur peut être représentée de plusieurs manières différentes, comme par exemple  $(Y - T)^2$ . On représente l'erreur par une fonction  $J(Y, T)$  à choix. La fonction s'appelle le "cost function". Le "phénomène" d'ajuster les poids en fonction de  $Y$  et  $T$  s'appelle Back-propagation, vu qu'un calcul va s'effectuer de la sortie vers l'intérieur du réseau de neurones.

Nous pourrions imaginer d'ajuster les poids de la manière suivante :  $W = W + J(Y, T)$ . Si l'erreur est grande, le poids sera "grandement" ajusté. Si l'erreur est petite, le poids sera ajusté qu'un tout petit peu. Cependant, la fonction coût  $J(Y, T)$  étant positive, il faut trouver une méthode plus subtile. D'autant plus que s'il y a plusieurs couches cachées ( $Z1, Z2$ ), il faudrait pouvoir ajuster les poids de  $Z1$  uniquement en fonction de l'erreur causée par les poids de  $Z1$ , et les poids de  $Z2$  uniquement en fonction de l'erreur causée par les poids de  $Z2$ .

La méthode utilisée pour ajuster les poids est d'utiliser la dérivée de  $J(Y, T)$ . En dérivant vis à vis de chaque couche, on peut trouver l'erreur liée à chaque couche. Par conséquent, pour ajuster les poids de  $Z1$ , on effectue l'ajustement suivant :  $W_{z1} = W_{z1} + \frac{dJ(Y, T)}{dW_{z1}}$ . De même, pour ajuster les poids de  $Z2$ , on effectue l'ajustement suivant :  $W_{z2} = W_{z2} + \frac{dJ(Y, T)}{dW_{z2}}$ .

## Gradient Descent

Une dernière subtilité doit être ajoutée à la manière dont les poids sont ajustés. Afin d'éviter d'ajuster les poids de manière trop brutale, on ajuste (à nouveau) par une fraction  $\alpha$  (learning rate). Ainsi, la méthode utilisée devient la suivante, et s'appelle la méthode du Gradient Descent :

$$W = W + \alpha \frac{dJ(Y, T)}{dW}$$

Pour donner un exemple de calcul, prenons un cas simple, un réseau avec une couche d'entrée et une couche de sortie. (Pas de couche cachées).

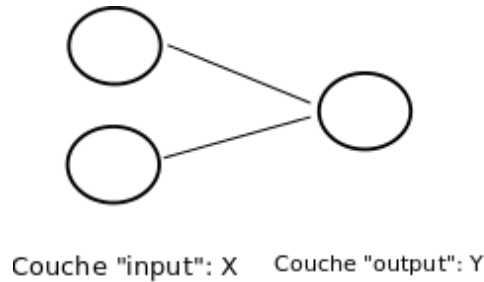


FIGURE 2.18 – Réseau neuronal à 1 couche d'entrée et 1 couche de sortie

$$Y = f(W_Y X + b_Y) \quad (2.22)$$

$$\frac{dJ}{dW_Y} = \frac{dJ}{dY} \frac{dY}{dW_Y} = \frac{dJ}{dY} \frac{dY}{df} \frac{df}{dW_Y} \quad (2.23)$$

Grâce au fait que nous travaillons avec des dérivées, l'on peut ainsi développer suffisamment pour pouvoir effectuer le calcul de  $\frac{dJ}{dW_Y}$

Prenons maintenant un exemple avec une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie :

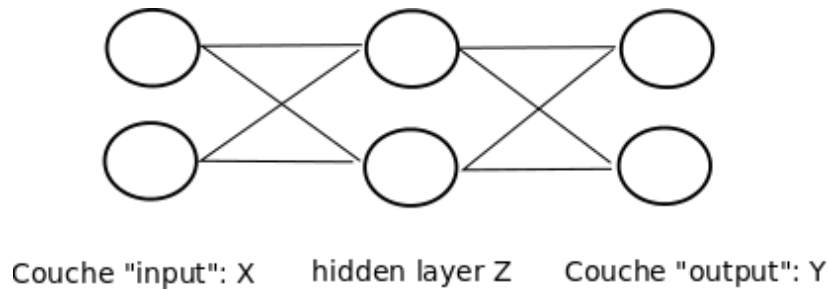


FIGURE 2.19 – Réseau neuronal à 1 couche d'entrée, 1 couche cachée et 1 couche de sortie

$$Z = f(W_Z X + b_Z) \quad (2.24)$$

$$Y = f_2(W_Y Z + b_Y) \quad (2.25)$$

À présent, il y a deux matrices de poids à ajuster :  $W_Y$  et  $W_Z$ . Il faut calculer leur dérivées séparément :

$$\frac{dJ}{dW_Y} = \frac{dJ}{dY} \frac{dY}{dW_Y} = \frac{dJ}{dY} \frac{dY}{df_2} \frac{df_2}{dW_Y} \quad (2.26)$$

$$\frac{dJ}{dW_Z} = \frac{dJ}{dY} \frac{dY}{dW_Z} = \frac{dJ}{dY} \frac{dY}{df_2} \frac{df_2}{dW_Z} = \frac{dJ}{dY} \frac{dY}{df_2} \frac{df_2}{dZ} \frac{dZ}{dW_Z} = \frac{dJ}{dY} \frac{dY}{df_2} \frac{df_2}{dZ} \frac{f_1}{f_1} \frac{f_1}{dW_Z} \quad (2.27)$$

Nous constatons (heureusement) qu'un certain schéma se répète dans le calcul des  $\frac{dJ}{dW_i}$ , permettant ainsi le calcul des dérivées automatiquement par programmation. Plusieurs bibliothèques fournissent cette possibilité. Pour ce travail de bachelor, la bibliothèque TensorFlow développée par Google a été utilisée.

Pour conclure cette section, il est important de signaler qu'un réseau de neurone ne peut s'ajuster qu'avec un seul  $X$  et  $T$ . Il faut bien entendu répéter le calcul de back-propagation un grand nombre de fois afin d'arriver à des valeurs des poids permettant un pourcentage de prédiction correct. Une fois le réseau de neurones bien entraîné (après avoir répété la back-propagation de nombreuses fois), on peut ensuite fournir une valeur  $X$  sans connaître son résultat correct, mais en osant espérer que la prédiction sera correcte.

## 2.5 Algorithme Deep Q-Learning (DQN)

Dans la section "Q-Learning, nous avons vu une méthode pour enseigner à un agent comment apprendre à évoluer dans un environnement donné en explorant les actions possibles. La méthode s'avère efficace lorsque l'environnement ne possède qu'une petite quantité d'états / actions possibles. Dans ces petits environnements, l'agent peut garder une copie de chaque états et actions visitées afin d'estimer correctement la fonction  $Q(s,a)$  de sorte à apprendre à savoir quelle action effectuer pour un état donné, dans le but d'effectuer un score maximal lors d'un épisode.

Lorsque l'environnement devient plus complexe, l'espace état / actions devient beaucoup plus grand et la tâche devient presque impossible étant donné la taille du tableau  $Q(s,a)$  à garder en mémoire, et le temps nécessaire pour explorer correctement tous les couples "état / action". Les réseaux neuronaux constituent une solution adéquate pour effectuer une estimation complexe



d'un problème donné. L'enjeu du Deep Q-learning est d'utiliser les réseaux neuronaux pour effectuer une estimation suffisante de la fonction  $Q(s,a)$  sans devoir connaître / explorer l'espace complet état / actions d'un environnement donné. Un réseau neuronal peut être appelé "Deep neural network" lorsque un réseau neuronal comprends de nombreuses couches cachées ; la notion de "Deep" dans "Deep Q-learning" correspond donc à appliquer la méthode Q-learning avec un réseau de neurones à plusieurs couches cachées (hidden layers).

Dans le cadre de ce travail, la valeur des actions  $a$  en fonction de l'état  $s$   $Q(s,a)$  est définie par la prédiction d'un réseau neuronal. Nous fournissons un vecteur d'entrée  $X = s$  représentant l'état de l'environnement. Par exemple :

```
X = s = [agent.x, agent.y, enemy.x, enemy.y]
```

Le résultat du réseau neuronal est une estimation de  $Q(s,a)$  pour chaque action possible lors de l'état  $s$ . La taille du vecteur de sortie correspond au nombre total d'actions possibles lors de l'état  $s$ . L'action choisie sera l'index correspondant à la plus haute valeur rencontrée.

```
Y = predicted_values = [value_action1, value_action2, value_action3, value_act  
action = argmax[predicted_values]
```

Une action est donc un nombre entier compris entre  $[0, nb\_actions\_possibles]$

### 2.5.1 Mise à jour de la fonction $Q(s,a)$

Afin de faire fonctionner un agent avec la méthode Q-Learning utilisant un réseau neuronal pour estimer la valeur  $Q(s,a)$ , il y a deux ajustements principaux à faire pour mettre à jour la fonction  $Q(s,a)$ .

#### Experience Replay

Comme évoqué lors du chapitre sur les réseaux neuronaux, afin qu'un réseau neuronal puisse apprendre correctement à estimer son sujet, les valeurs d'entrées  $X$  lors de la phase d'apprentissage doivent être suffisamment homogènes afin que l'apprentissage soit le plus complet possible. Or, l'idée du Q-Learning est d'ajuster  $Q(s,a)$  à chaque état parcouru de l'agent. Imaginons que l'agent commence toujours un épisode dans un même état initial :

Si l'agent met à jour son réseau neuronal ( $Q(s,a)$ ) à chaque état qu'il rencontre, l'apprentissage de  $Q(s,a)$  sera biaisé dans le sens où il va renforcer l'ajustement de  $Q(s,a)$  sur les premiers états (récurrents à chaque nouvel épisode), et laissera les états suivants (sporadiques) de côté pour son apprentissage. Il en résultera par exemple que l'agent connaisse les 20 premières actions à faire, mais sera incapable d'estimer correctement la suite des actions à faire.

Pour palier à ceci, l'idée est d'enregistrer tous les états / actions / récompenses dans une liste d'échantillons dont la longueur est définie par le programmeur. D'ici à ce que la liste d'échantillons ne soit pas pleine, l'agent ne met pas à jour la fonction  $Q(s,a)$ . Si la liste est pleine, les échantillons (états / actions / récompenses) les plus vieux sont remplacés par les nouveaux échantillons rencontrés.

Une fois que l'on dispose d'une liste d'échantillons suffisamment grande, l'agent met à jour la fonction  $Q(s,a)$  en choisissant **aléatoirement** une **petite** partie de ces échantillons (batch). L'on par exemple mettre à jour la fonction  $Q(s,a)$  à chaque nouvel épisode, pour autant que la liste soit suffisamment grande afin de permettre de choisir **aléatoirement** un groupe d'échantillons de la liste d'échantillons. L'on peut ainsi supposer que l'agent puisse mettre à jour la fonction  $Q(s,a)$  parmi un choix d'échantillons aléatoires et suffisamment homogène.

## Apprentissage du réseau neuronal : Estimation Y et Target T

L'autre inconvénient majeur d'utiliser un réseau neuronal est que pour l'entraîner, il nous faut d'entrées X et connaître les solutions T pour chaque entrée X. En effet, le réseau neuronal ajuste ses poids lors de l'apprentissage à l'aide de la fonction  $J(Y, T)$ . Or, nous ne connaissons pas T étant donné que l'idée du Q-Learning est d'explorer sans connaître son environnement. Comment choisir T étant donné que la meilleure estimation de  $Q(s,a)$  est définie par la prédiction de  $Q(s,a)$  par QNetwork ?

En d'autres termes, si nous utilisons pour chaque X, une solution  $T = Y$ , le taux d'erreur sera de 0 et l'agent n'apprendra rien : le réseau neuronal QNetwork n'apprendra rien étant donné que la solution T correspond à la prédiction Y.

Une méthode qui a fait (bizarrement) ses preuves et d'avoir deux réseaux neuronaux. Le réseau pour estimer  $Q(s,a)$  (QNetwork), et un deuxième réseau pour estimer les solutions T (TNetwork). TNetwork est une copie conforme à QNetwork, à la seule différence est que TNetwork est copié de QNetwork toutes les N actions de l'agent. À l'action "0" de l'agent, QNetwork et TNetwork sont exactement les mêmes et l'apprentissage de  $Q(s,a)$  ne se fera pas. En revanche, pour les actions suivantes, QNetwork sera mis à jour et TNetwork reste le même, continuant à prédire ses valeurs T.

Ainsi,  $Q(s,a)$  pourra être mise à jour étant donné que les valeurs  $Q(s,a) = Y$  de QNetwork(s) et les valeurs de TNetwork(s) = T ne fourniront pas les mêmes valeurs.

Bien entendu, toutes les N actions, le réseau TNetwork sera à nouveau copié depuis QNetwork car QNetwork tends à s'ajuster correctement. Dans l'implémentation du dernier exercice du rapport, TNetwork est copié depuis QNetwork toutes les 100 actions (hyper-paramètre COPY\_TARGET\_PERIOD).

### 2.5.2 Pseudo-code de l'algorithme Deep Q-Learning

#### Partie principale

Voici un pseudo code effectuant l'algorithme Deep Q-Learning.

```
*****
#MAIN
*****
# phase d'apprentissage
world = new World()
max_episodes = 100000
gamma = 0.9
epsilon = 0.1
alpha = 0.1
QNetwork = NeuralNetwork()
TNetwork = NeuralNetwork(QNetwork)
experience = []
min_experience_size = 10000
cp_target_period = 10000
batch_size = 32

for i in range(max_episodes) :
    state = world.reset()
    while not world.game_over() :
        action = choose_action(state, epsilon, QNetwork)
        reward, next_state = world.do_action(state, action)
```

```
experience.append((state, next_state, action, reward, game_over))
if experience.length >= min_experience_size :
    train(QNetwork, TNetwork, experience, batch_size, alpha)

if i % cp_target_period == 0 :
    TNetwork.copy_from(QNetwork)

state = next_state

# phase une fois l'apprentissage effectué
state = world.reset()
while not world.game_over() :
    action = choose_action(state, epsilon, QNetwork)
    state, _ = world.do_action(action)
```

### Fonction choose\_action()

Voici le pseudo code de la fonction choose\_action() :

```
def choose_action(state, epsilon, QNetwork) :
    if random() < epsilon :
        action = random_action()
    else :
        prediction = QNetwork.predict(state)
        action = argmax(prediction)
    return action
```

Un état est représenté par un vecteur contenant les informations suffisantes pour illustrer l'état du jeu.

```
state = [agent.x, agent.y, ennemy.x, ennemy.y]
```

La prédiction du réseau QNetwork prend en entrée le vecteur state, et retourne en sortie un vecteur contenant les récompenses (rewards) estimées pour chacune des actions possibles. La taille du vecteur de sortie correspond donc au nombre d'actions possibles pour l'agent.

```
prediction = [ra_1, ra_2, ra_3, ra_4, ra_5] = QNetwork.predict(state)
```

La fonction choose\_action() retourne l'index de la plus grande récompense estimée. Dans ce travail de bachelor, cet index équivaut à l'action choisie. Par exemple :

```
prediction = [1.5, 12, -2, 1.4, 0.56] = QNetwork.predict(state)
action = 1 = argmax(prediction)
```

### Fonction train()

```
def train(QNetwork, TNetwork, experience, batch_size, alpha) :
    inputs = []
    choosen_actions = []
    targets = []
```

```
batch = experience.pop_batch(batch_size)
for sample in batch :
    s1, s2, w, game_over, action = sample.extract()

    inputs.append(s1)

    predicted_values = QNetwork.predict(s1)
    predicted_values = 0 for all values except for predicted_values[action]
    choosen_actions.append(predicted_values)

    target_Q_values_s2 = TNetwork.predict(s2)
    action_value = target_Q_values_s2[action]
    target = zeros(nb_possible_actions)
    target[action] = r if game_over else r + gamma * action_value
    targets.append(target)

QNetwork.back_propagation(inputs, choosen_actions, targets, alpha)
```

Pour entraîner le réseau QNetwork, celui-ci a besoin d'un input (vecteur représentant l'état de l'environnement), d'un vecteur représentant les valeurs qu'il a estimées (action), et les valeurs correctes qu'il aurait retourner.

```
state = [agent.x, agent.y, ennemy.x, ennemy.y]
predicted_values = [1.5, 12, -2, 1.4, 0.56]
correct_values = target = [2.1, 6, -2.1, 3.5, 2.21]
```

Les valeurs correctes ne sont connues uniquement pour les actions qui ont été effectuées. (Pour chaque action effectuée, nous connaissons leurs récompenses et les états résultant des actions choisies. Pour chaque état, nous ne connaissons donc uniquement la valeur correcte correspondant à l'action choisie. La valeur correcte  $Q(s_{visit}, a_{choisie})$  est calculée selon l'algorithme Q-Learning, en utilisant le réseau TNetwork :

```
target_Q_values_s2 = TNetwork.predict(s2)
action_value = target_Q_values_s2[action]
correct_value = target = r if game_over else r + gamma * action_value
```

Or, un réseau neuronal a besoin pour s'entraîner (back-propagation) de vecteurs de la même taille que les vecteurs qu'il a en sortie. Pour entraîner le réseau uniquement sur l'action effectuée, nous créons le vecteur T (target) composé uniquement de zéros, sauf là où le réseau doit être ajusté. De même, le vecteur predicted\_values est mis à zéro partout sauf là où l'action a été effectuée. Dans cet exemple, l'action effectuée est l'action = 2.

```
# avant modification
state = [agent.x, agent.y, ennemy.x, ennemy.y] = X
predicted_values = [1.5, 12, -2, 1.4, 0.56] = Y
correct_values = target = [2.1, 6, -2.1, 3.5, 2.21] = T

# après modification
state = [agent.x, agent.y, ennemy.x, ennemy.y] = X
predicted_values = [0, 0, 0, 1.4, 0] = Y
correct_values = target = [0, 0, 0, 3.5, 0] = T
```

De cette manière, lors du "back-propagation", l'ajustement des poids du QNetwork ne sera mis à jour que là où la dérivée  $\frac{dJ(Y,T)}{dW} \neq 0$ . Y = predicted\_values, et T = target.

$$W = W + \alpha \frac{dJ(Y,T)}{dW}$$

Enfin, les librairies permettent d'entraîner un réseau neuronal en lui fournissant une matrice d'inputs (X), predicted\_values (Y) et target (T) (à la place d'un vecteur à la fois). Le principe reste le même, mais cela permet d'effectuer les calculs beaucoup plus rapidement qu'en fournissant à chaque fois qu'un seul vecteur. C'est la raison pour laquelle le pseudo code entraîne le QNetwork avec des matrices (X = inputs), (Y = predicted\_values) et (T = targets).

## Chapitre 3

# Implémentation

### 3.1 Fonctionnement

#### 3.1.1 Vue d'ensemble : choix d'une action

Les actions possibles dans l'environnement implémenté sont d'avancer dans une direction des points cardinaux (N, NE, E, SE, S, SO, O, NE), ou ne rien faire. Le nombre d'actions possibles équivaut donc à neuf.

Comme indiqué dans l'introduction, l'apprentissage est divisé en trois parties. Dans un premier temps, l'agent doit pouvoir évoluer dans un monde qu'avec des ennemis, en utilisant un réseau neuronal dédié estimant la meilleure action à effectuer. Dans un deuxième temps, l'agent doit pouvoir évoluer uniquement avec de la nourriture utilisant un autre réseau neuronal dédié à attraper la nourriture. Enfin, l'agent doit pouvoir évoluer dans un monde "complet", avec ennemis et nourriture. Dans ce dernier cas, l'agent dispose de trois réseaux neuronaux : un pour choisir la meilleure action de sorte à éviter les ennemis, un deuxième estimant la meilleure action pour attraper la nourriture, et un troisième réseau neuronal estimant quel est le meilleur réseau neuronal à écouter : effectuer l'action évitant les ennemis, ou effectuer l'action pour attraper la nourriture.

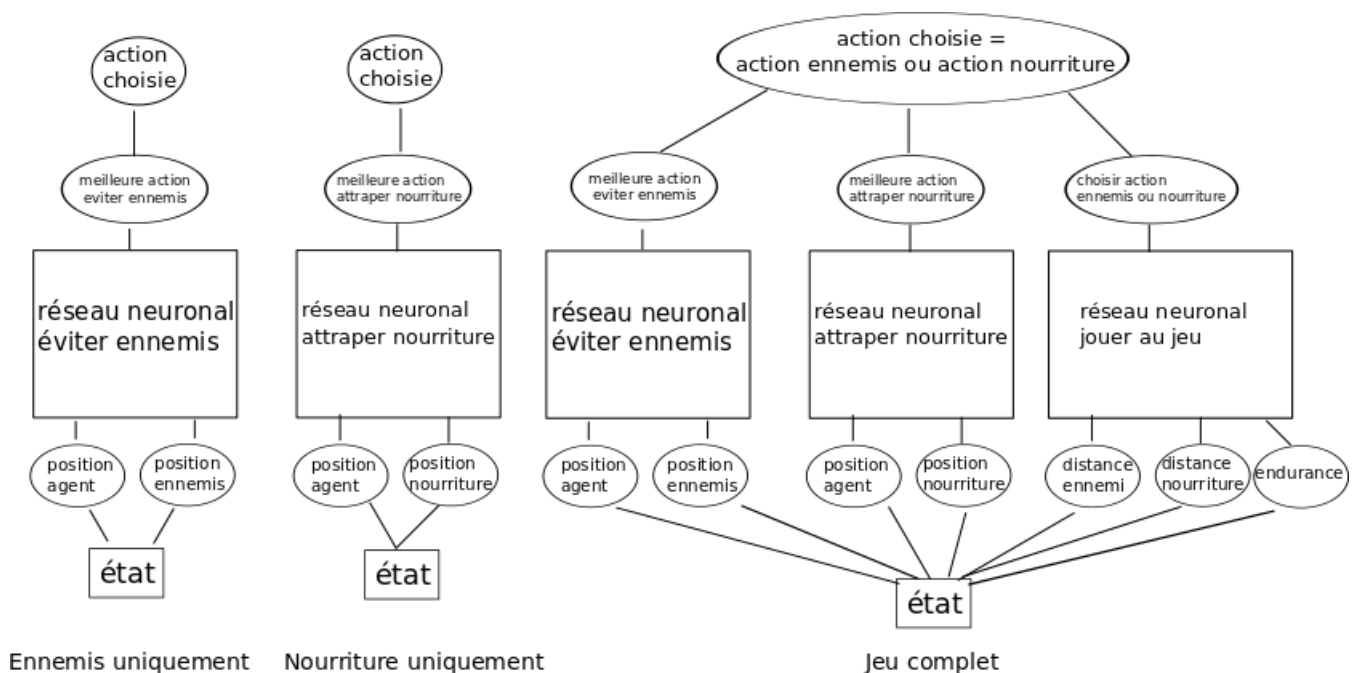


FIGURE 3.1 – Vue d'ensemble : choix d'une action

Il aurait été possible de n'utiliser qu'un grand réseau neuronal pour apprendre directement à jouer dans un monde complet, sans fractionner l'apprentissage. Il y a plusieurs raisons pour laquelle nous avons choisi d'utiliser plusieurs réseaux neuronaux : la première vient de la difficulté à choisir une fonction de récompense adéquate à ce que nous voulons apprendre à l'agent. L'apprentissage est plus efficace lorsque la fonction de récompense renforce le comportement de l'agent dans un contexte bien spécifique (éviter ennemis ou attraper la nourriture).

La deuxième raison vient du fait que plus un réseau neuronal est grand, moins l'apprentissage est rapide. Plus il y a d'inputs dans le réseau neuronal, plus ce dernier est grand. Il est donc préférable d'entraîner l'agent sur des problèmes spécifiques avant de l'entraîner à jouer de manière complète. Comme indiqué dans la figure ci-dessus, avec cette méthode, le réseau neuronal capable de jouer pas besoin de beaucoup d'inputs. Ce dernier ne connaît même pas la position de la nourriture, de l'agent ni des ennemis.

Enfin, une fois qu'un agent a appris une tâche spécifique, il n'y a pas besoin de le ré-entraîner (pour autant que le monde et les inputs concernés ne changent pas). Imaginons maintenant que nous ayons utilisé un seul grand réseau neuronal pour jouer, et que l'on veuille ajouter une nouvelle tâche à apprendre à l'agent. Il faudrait ré-entraîner le tout depuis zéro. En fractionnant l'apprentissage en tâches spécifiques, il y aurait seulement besoin d'entraîner le nouveau réseau concernant la nouvelle tâche, et le réseau capable de jouer.

### 3.1.2 Apprentissage

L'apprentissage de l'agent se fait à travers trois scripts qui durent entre 24 et 48 heures. Chaque script a pour but d'enseigner à l'agent une "capacité" : éviter les ennemis, attraper la nourriture ou apprendre à jongler entre les deux pour jouer au jeu complet. Chaque capacité est contenue dans un réseau neuronal QNetwork ; l'apprentissage correspond à modifier les poids de ces réseaux (back-propagation) de sorte à pouvoir estimer correctement la fonction  $Q(s, a)$ .

- **trainer\_avoid\_enemies.py** :
  1. charger un monde qu'avec des ennemis
  2. créer un nouveau réseau neuronal
  3. entraîner l'agent à éviter les ennemis
  4. enregistrer l'état du réseau neuronal lorsque l'agent a appris à éviter les ennemis puis quitter le script
- **trainer\_fetch\_object.py** :
  1. charger un monde qu'avec de la nourriture
  2. créer un nouveau réseau neuronal
  3. entraîner l'agent à attraper la nourriture
  4. enregistrer l'état du réseau neuronal lorsque l'agent a appris à attraper la nourriture puis quitter le script
- **trainer\_play\_game.py** :
  1. charger le monde complet (ennemis + nourriture)
  2. charger les deux réseaux neuronaux estimant correctement les actions pour éviter les ennemis et attraper la nourriture
  3. créer un nouveau réseau neuronal (qui apprendra à jongler entre les deux réseaux neuronaux chargés)
  4. entraîner l'agent à jouer au jeu complet
  5. enregistrer l'état du réseau neuronal lorsque l'agent a appris à jouer au jeu complet puis quitter le script

### 3.1.3 Regarder l'agent jouer

Trois scripts supplémentaires ont été créés permettant de visualiser en temps réel l'agent évoluer dans le monde voulu. Ces scripts chargent le monde, chargent l'agent en important les réseaux neuronaux adéquats à partir des sauvegardes contenues dans le dossier *saves*.

- `see_avoid_enemies_in_action.py`
- `see_fetch_object_in_action.py`
- `see_play_game_in_action.py`

### 3.1.4 Tester soi-même l'environnement

Afin de tester le monde dans lequel va évoluer l'agent, il est possible d'exécuter le fichier **World.py** afin de pouvoir jouer soi-même.

```
$ python world.py
```

### 3.1.5 Configuration

Le choix de tous les hyper-paramètres tels que la fonction de récompense, le discount factor  $\gamma$ , la taille de l'expérience, le learning rate  $\alpha$ , etc. sont tous définis dans les scripts directement (et null part ailleurs). Cela facilite grandement lorsque qu'il s'agit de voir quels hyper-paramètres ont été utilisés lorsque un agent a spécialement réussi un apprentissage. De plus, à chaque fois que l'un script de type *trainer* est exécuté, une copie de celui-ci est enregistrée dans le dossier choisi pour les sauvegardes.

Dans cette sous-section, nous passons en revue le contenu des scripts définis plus haut.

#### Chargement de l'environnement

Le chargement de l'environnement se fait de la manière suivante en choisissant la configuration désirée. La fonction de récompense est définie à ce moment là : c'est elle qui retourne la récompense. Cette fonction est appelée par le monde (classe *World*) lorsque l'agent effectue une action dans celui-ci. A noter que pour les scripts de type `see_*_in_action.py`, la fonction récompense n'est pas utilisée étant donné que l'agent n'est pas chargé pour apprendre. L'exemple suivant est importé du script **trainer\_fetch\_object.py**.

```
# create the world
def reward_function(world):
    if world.game_over:
        return - 5
    max_distance = 73
    return (1 - Direction.distance(world.agent, world.food) / max_distance)
world_config = {
    'food' : True,
    'enemies' : False,
    'print_reward' : False,
    'reward_function' : reward_function
}
world = World(world_config)
world.reset()
```



## Choix du dossier de sauvegarde et création de graphiques Tensorboard

Les réseaux neuronaux sont une boîte noire difficiles à déboguer. Afin de visualiser l'apprentissage par des graphiques, nous utilisons l'outil *Tensorboard* disponible dans la librairie *Tensorflow*. La création des graphiques et le choix du dossier dans lequel vont être enregistrés les réseaux neuronaux se définissent de la manière suivante, à travers la classe statique **Debug** :

```
Debug.USE_TENSORBOARD = True
Debug.SAVE_MAIN_FILE = True
Debug.SAVE_FOLDER = '../tmp_saves/avoid_enemies'
Debug.OUTPUT_TO_TENSORBOARD_EVERY_N_EPISODES = 5000
```

## Création d'un réseau neuronal

Comme vu dans la figure 3.1, un réseau neuronal doit pouvoir être configuré de sorte à ce que les entrées et sorties puissent être définies manuellement au cas par cas. Au lieu de donner l'état du monde tel quel en entrée, nous passons par une fonction *input\_adapter()* qui retourne le vecteur *X* désiré. De même, l'on peut définir une fonction *output\_adapter()* afin de convertir la sortie d'un réseau neuronal en une action particulière. La fonction *output\_adapter()* est facultative.

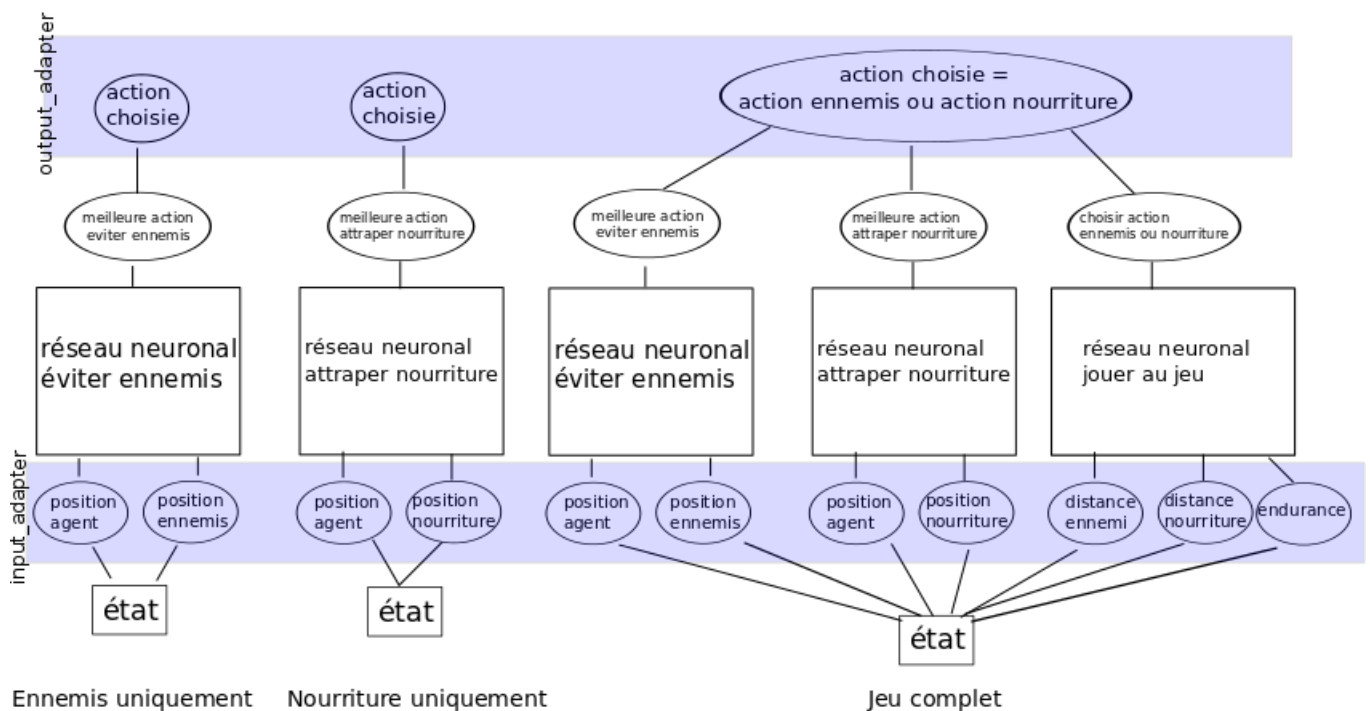


FIGURE 3.2 – Input et Output adapters

La création d'un réseau neuronal se crée de la manière suivante. On crée d'abord un modèle contenant l'architecture du réseau neuronal, le nom de celui-ci ainsi que le learning\_rate  $\alpha$ .

```
fetch_object_model = Model (session , name, nb_input, learning_rate,
    [[size_layer1 , activation_function_layer1],
    [size_layer2 , activation_function_layer2],
    [ size_output_layer , activation_function_layer3]]
)
```

Puis on crée le réseau neuronal à partir de l'architecture définie plus haut. Voici un exemple tiré du script **trainer\_fetch\_object.py**. La variable *bus* contiendra les états *s1* et *s2* nécessaires pour définir la fonction *input\_adapter*

```
# create the neural network that will learn to fetch
fetch_object_model = Model(session, 'fetch_object', 4, 1e-1,
    [[40, 'relu'],
     [40, 'relu'],
     [Action.NB_POSSIBLE_MOVE_ACTION, 'linear']]
)
# fetch_object_model = ImportModel(session, Debug.SAVE_FOLDER, 'fetch_object')
def fetch_object_input_adapter(bus, next_state=False) :
    index = 'next_state' if next_state else 'state'
    agent_position = bus[index].get_agent_position_layer()
    food_position = bus[index].get_food_position_layer()
    return [np.array([agent_position, food_position]).flatten()]

fetch_object_network = Network(
    fetch_object_model,
    fetch_object_input_adapter,
    True, # continue_exploration
    True, # is_training (has to be trained during process)
    None, # add experience hook
    None # output_adapter
)
```

## Création de l'agent

Maintenant que le monde et un réseau neuronal est créé, l'on peut créer l'agent. Nous définissons le reste des hyper-paramètres tels que la fonction epsilon  $\epsilon$ , la taille d'un batch, ou du discount factor  $\gamma$ . Comme il peut y avoir plusieurs réseaux neuronaux, il faut définir quel est le réseau neuronal de sortie. Dans cet exemple, la valeur epsilon  $\epsilon$  reste stable durant tout l'entraînement.

```
# create agent and his hyperparameters (config)
epsilon = Epsilon(0.1)
def update_epsilon(epsilon) :
    epsilon.value = epsilon.value
epsilon.set_epsilon_function(update_epsilon)

agent_config = {}
agent_config['epsilon'] = epsilon
agent_config['networks'] = [fetch_object_network]
agent_config['output_network'] = fetch_object_network
agent_config['copy_target_period'] = 10000
agent_config['min_experience_size'] = 50000
agent_config['max_experience_size'] = 400000
agent_config['batch_size'] = 32
agent_config['gamma'] = 0.5

agent = Agent(agent_config)
```

## 3.2 Architecture

### 3.2.1 Diagramme de classes

Nous avons vu jusqu'ici le contenu des scripts permettant l'apprentissage de l'agent, et des scripts permettant la visualisation de l'agent en train d'évoluer dans le monde. Voici un diagramme des classes simplifié des classes utilisées par ces scripts.

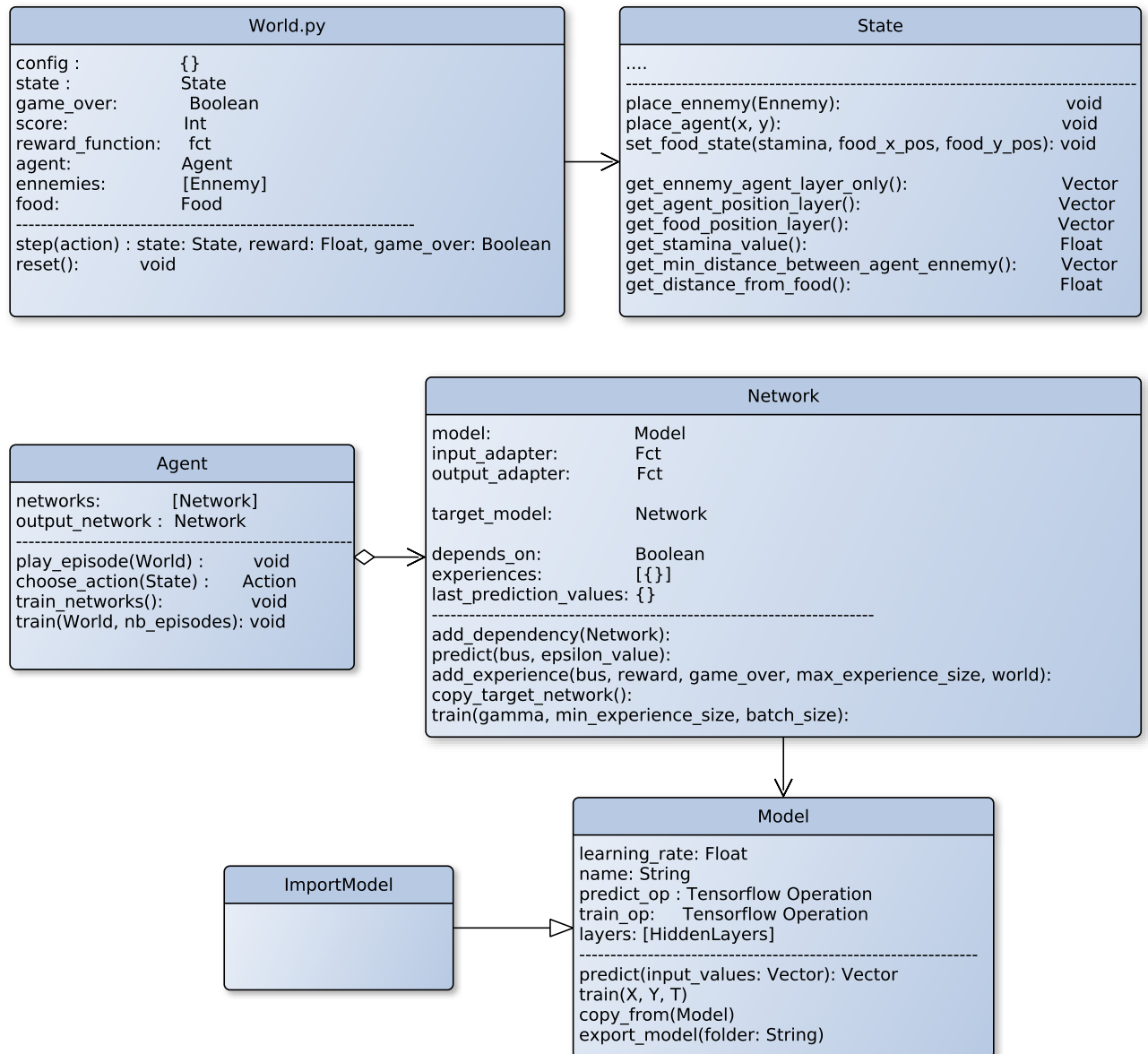


FIGURE 3.3 – Input et Output adapters

### 3.2.2 Méthodes clés

#### Apprentissage

L'apprentissage de l'agent se fait à travers sa méthode *Agent.train()*, et est résumée par ceci :

```

def train(self, world, nb_episodes) :
    for i in range(nb_episodes) :
        self.play_episode(world)
    
```

La méthode *Agent.play\_episode()* est quant à elle résumée par ceci :

```
def play_episode(self, world, max_episode_steps=None) :
    current_state = world.reset()

    episode_done = False
    while not episode_done :
        action = self.choose_action(current_state)
        next_state, reward, game_over, world_debug = world.step(action)

        if self.nb_steps_played % self.copy_target_period == 0 :
            self.copy_target_networks()

        self.add_experience(next_state, reward, game_over, world)
        self.train_networks()

        if game_over :
            episode_done = True

        current_state = next_state
        self.epsilon.update_epsilon()
        self.nb_steps_played += 1
```

### Choix d'une action

Comme un agent peut contenir plusieurs réseaux neuronaux, il convient de choisir correctement comment choisir son action. En effet, un réseau neuronal tel que le réseau *play\_game*, dépend des réseaux neuronaux *avoid\_enemies* et *fetch\_object* (nourriture) avant d'indiquer l'action à effectuer. La méthode *Agent.choose\_action()* est implémentée de la sorte :

```
def choose_action(self, state) :
    self.bus['state'] = state

    nb_networks_that_predicted = 0
    while nb_networks_that_predicted != len(self.networks) :
        for network in self.networks :
            if len(network.depends_on) is 0 \
            or all(dependency.prediction_done for dependency in network.depends_on) :
                network.predict(self.bus, self.epsilon.value)
                nb_networks_that_predicted += 1

    return self.output_network.get_last_action()
```

## Chapitre 4

# Résultats

## Chapitre 5

## Annexes