

Chapitre 1

Composants de base d'un assistant personnel

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillerons un peu plus l'aspect technique d'une architecture typique d'un SPA (Speech Personal Assistant). Nous commencerons d'abord par définir des notions de base. Nous ne traiterons que celles qui ont été les plus utilisées dans les travaux que nous avons examinés. La suite du chapitre sera organisée en sections qui décriront chacune le fonctionnement d'une partie du SPA, en citant les travaux et références qui relatent de cette dernière. Nous terminerons sur une conclusion qui introduira le chapitre suivant.

1.2 Schéma global d'un SPA

Durant nos lectures des différents travaux sur le domaine, nous avons pu dresser un schéma assez général qui englobe les principaux modules d'un SPA :

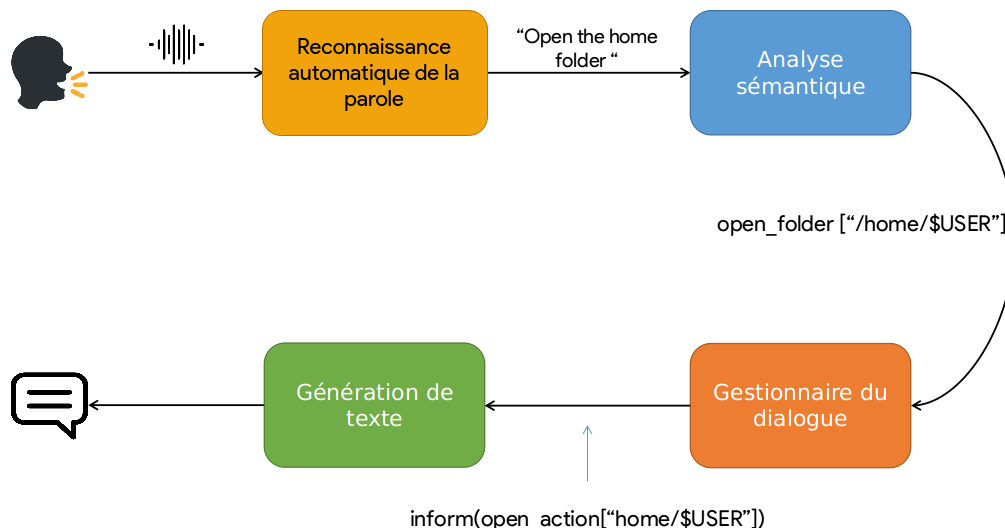


Figure 1.1 – Schéma abstratif d'un SPA (Milhorat et al., 2014)

Le processus peut être résumé en des étapes cruciales (qui seront détaillées dans les sections suivantes) :

- L'utilisateur énonce une requête en utilisant sa voix. Le signal est ensuite transformé en sa version textuelle.
- Étant sous un format textuel brut, la requête ne peut pas être interprétée ou comprise par la machine. Une représentation sémantique est générée qui regroupera les principales informations contenues dans la requête, à savoir l'intention de l'utilisateur et ses arguments.
- Au fur et à mesure que l'utilisateur énonce des requêtes, le système doit pouvoir être capable d'utiliser le contexte du dialogue pour interagir avec ce dernier afin d'atteindre le but final du dialogue (exécuter une commande système, trouver des informations internet ou sur la machine locale, etc.). Le gestionnaire du dialogue communique avec son environnement en utilisant la même représentation sémantique produite par l'analyse précédente.
- Puisqu'il est préférable de cacher à l'utilisateur tout comportement interne au système, il serait préférable de transformer la trame sémantique (voir la figure 1.9) en texte naturel pour l'afficher en sortie.

Il est à noter que chacun des modules seront indépendants pour ce qu'il est de leur fonctionnement interne. Ainsi, aucun n'assumera un fonctionnement arbitraire des autres modules. Seul le format des informations qui circulent entre eux devra être établi au préalable pour un fonctionnement durable et robuste au changement.

Pour ce qui est de la suite du chapitre, nous allons présenter les différents modules ainsi que les techniques et architectures qui sont considérées comme étant l'état de l'art du domaine.

1.3 Notions et aspects théoriques

Dans cette section, nous présenterons différentes notions liées au domaine de l'apprentissage automatique, pour ensuite les citer dans les modules qui les utilisent.

1.3.1 Apprentissage automatique

Le plus souvent, un domaine scientifique peut être défini à travers le ou les types de problèmes dont il essaye de trouver une solution. D'après (M Mitchell, 2006), l'auteur définit ce problème sous forme d'une question :

"How can we build computer systems that automatically improve with experience, and what are the fundamental laws that govern all learning processes?"
(M Mitchell, 2006)

que nous pouvons traduire par :

"Comment pourrions nous développer un système informatique qui pourrait s'améliorer à travers l'expérience, et quelles seraient les lois qui régiraient le processus d'apprentissage?"

D'après (M Mitchell, 2006), l'apprentissage automatique est un paradigme qui stipule qu'un système informatique peut apprendre à effectuer un ensemble de tâches T , sachant qu'il dispose d'un ensemble de données E , tout en améliorant sa performance P .

Il existe plusieurs sous-catégories d'apprentissage automatique. Elles diffèrent principalement par la manière dont le système apprend, du type de données sur lesquelles il apprend, ainsi que du but de son apprentissage (classification, régression, etc.). Nous pouvons citer les catégories suivantes :

- **Apprentissage supervisé** : Les algorithmes de cette catégorie ont besoin d'une assistance externe. Les données doivent être séparées en deux parties (ensemble d'apprentissage et de test). Un *label* (ou classe) est associé à chaque instance pour permettre à l'algorithme de calculer un certain taux d'erreur qu'il essayera de minimiser au fur et à mesure qu'une nouvelle instance lui est présentée (Kotsiantis et al., 2006). Idéalement, le système pourra apprendre une certaine fonction $\hat{f} : X \rightarrow Y$ qui liera les entrées X aux sorties Y en minimisant l'erreur E_Y
- **Apprentissage non supervisé** : Dans ce cas, les algorithmes ne disposent pas d'un étiquetage des données. Ils essayeront donc d'apprendre des *pattern* ou motifs fréquents pour grouper les données similaires. De tels algorithmes ne se préoccupent pas de la classe, mais de la similarité entre un groupe de données et un autre (Barlow, 1989).
- **Apprentissage par renforcement** : Cette dernière catégorie regroupe des algorithmes qui apprennent par un système de *trial and error* (Essais et erreur). C'est à dire qu'en interagissant avec l'environnement, l'agent apprenant (l'algorithme) apprendra à accomplir une tâche précise en exécutant des actions qui modifieront son état et celui de son environnement (voir la section 1.6.3.3)

Dans les sections suivantes, nous nous intéresserons à quelques types d'algorithme d'apprentissage automatique.

1.3.2 Réseaux de neurones artificiels

Un réseau de neurones artificiels est une structure d'appariement non-linéaire entre un ensemble de caractéristiques en entrée et sortie ; ces réseaux sont inspirés de la façon dont les systèmes nerveux biologiques fonctionnent. Ils permettent de modéliser les relations sous-jacentes des données. Ils sont composés d'un nombre arbitrairement large de petites unités de calcul interconnectées appelées neurones, qui traitent l'information d'une manière parallèle dans le but de résoudre un problème bien spécifique (Sonali, 2014). Ils ont notamment connu un très grand succès pendant les dernières années dans différents domaines comme la reconnaissance d'images (Szegedy et al., 2015), la reconnaissance automatique de la parole (Graves et al., 2013 ; Yu and Deng, 2015) ou encore la classification de textes (Velay and Daniel, 2018 ; Liu et al., 2016).

Il existe une variété d'architectures de réseaux de neurones. Nous traiterons dans cette section trois d'entre elles :

- Réseaux de neurones multicouches denses
- Réseaux de neurones profonds
- Réseaux de neurones récurrents et leurs variantes

1.3.2.1 Réseaux de neurones multicouches denses

La forme la plus basique que peut avoir un réseau de neurones est celle d'un réseau multicouches comme montré dans la figure 1.2. Elle se compose de trois parties :

- **Une couche d'entrée** : Elle reçoit l'information en entrée codifiée en un vecteur numérique χ
- **Une ou plusieurs couches cachées** : le cœur du réseau, c'est une succession de couches de neurones où chaque couche C_i reçoit un signal sous forme d'une ou plusieurs valeurs numériques depuis une couche antérieure C_{i-1} ou bien la couche d'entrée χ , puis envoie en sortie un autre signal de même nature qui est une combinaison non-linéaire du signal en entrée vers une couche cachée suivante C_{i+1} ou bien la couche de sortie
- **Une couche de sortie** : elle permet de calculer une valeur \hat{y} qui peut être vue comme la prédiction du modèle Φ par rapport à son entrée χ :

$$\hat{y} = f_{\Phi}(\chi) \tag{1.1}$$

Le réseau calcule une erreur $e(y, \hat{y})$ en fonction de sa valeur en sortie et de la valeur exacte puis corrigera cette erreur au fur et à mesure du parcours des données d'apprentissage (Murtagh, 1991)

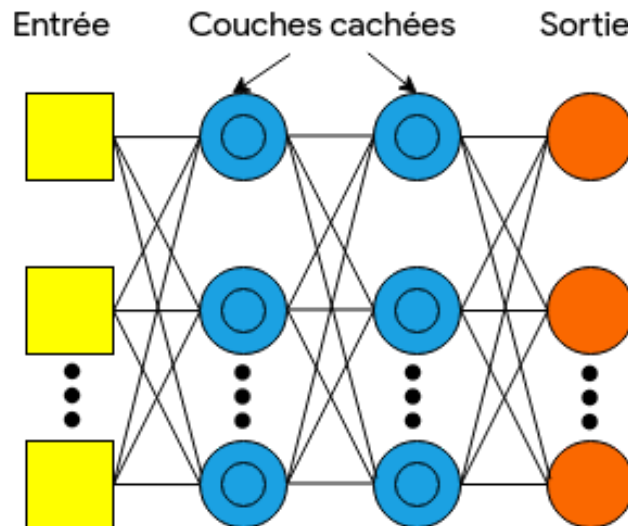


Figure 1.2 – Architecture basique d'un réseau de neurones multicouches

1.3.2.2 Réseaux de neurones profonds

Les réseaux de neurones à une seule couche sont dits *shallow*. Historiquement, ils présentaient l'avantage d'être assez rapides durant la phase d'apprentissage. Cependant les limites computationnelles d'antan se sont vite vues brisées avec le développement de processeurs plus puissants. De plus, avec l'explosion des données sur internet, toutes les conditions nécessaires étaient réunies pour la mise en place d'architectures plus complexes. Les réseaux de neurones profonds sont une adaptation des réseaux multi-couches classiques avec généralement plus de 2 couches cachées.

Même si le principe reste le même, l'apprentissage profond est puissant car les architectures les plus complexes permettent d'extraire automatiquement les caractéristiques qui sont importantes mais non visibles ; c'est le cas des réseaux de neurones convolutifs et récurrents (LeCun et al., 2015)

1.3.2.3 Réseaux de neurones récurrents

Un aspect que les réseaux de neurones (profonds ou pas) ne peuvent capturer est la notion de séquentialité. En effet beaucoup de problèmes qui sont de nature séquentielle ne peuvent être modélisés par les architectures dites classiques, comme l'analyse d'un texte. L'introduction d'une notion de séquence permet donc de capturer des dépendances entre certains états et leurs voisins, on parle ici de contexte (Lipton, 2015).

Les réseaux de neurones récurrents (Recurrent Neural Networks, RNNs) sont des réseaux de neurones *feedforward* dont certaines connections en sortie sont réintroduites comme entrées dans le réseau durant une étape ultérieure du processus d'apprentissage. Ceci introduit la notion de temps dans l'architecture. Ainsi à un instant t , un neurone récurrent recevra en entrée la donnée $x^{(t)}$ ainsi que la valeur de l'état caché $h^{(t-1)}$ résultante de l'étape précédente du réseau, la valeur en sortie $\hat{y}^{(t)}$ est calculée en fonction de l'état caché

$h^{(t)}$. Les équations suivantes montrent les calculs effectués (Lipton, 2015) :

$$h^{(t)} = \tanh(W^{hx} \times x^{(t)} + W^{hh} \times h^{(t-1)} + b_h) \quad (1.2)$$

$$\hat{y}^{(t)} = \text{softmax}(W^{hy} \times h^{(t)} + b_y) \quad (1.3)$$

où W^{hx} est la matrice de poids entre la couche d'entrée et la couche cachée. W^{hh} est la matrice de poids de récurrence (c.à.d, c'est la matrice qui, quand multipliée par le vecteur d'état caché $t - 1$, donnera le vecteur d'état t). W^{hy} est la matrice de poids entre la couche cachée et le couche de sortie. Les deux vecteurs b_h et b_y sont les vecteurs de biais et \times est l'opération du produit matriciel (Lipton, 2015)

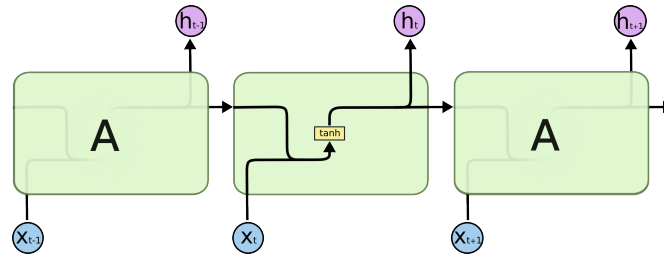


Figure 1.3 – Architecture interne d'un réseau de neurones récurrent à un instant t (Olah, 2015)

Un des principaux problèmes que rencontrent les RNNs est celui du "*Vanishing gradient*" traduit par le "*Problème de disparition du gradient*" (Hochreiter, 1998). Les relations à long terme entre les séquences ne sont donc pas capturées. Ainsi, pour remédier à ce problème, des architectures de réseaux de neurones dotées d'un module de mémoire ont été introduites.

Réseaux de neurones récurrents à mémoire à court et long terme (LSTM)

Introduite en 1997 dans (Hochreiter and Schmidhuber, 1997), cette architecture de réseaux de neurones récurrents est dotée d'un système de *portes* qui filtrent l'information qui y passe ainsi que d'un état interne de la cellule mémoire d'un réseau LSTM. Les composants d'une cellule LSTM sont détaillés dans la figure 1.4 qui suit :

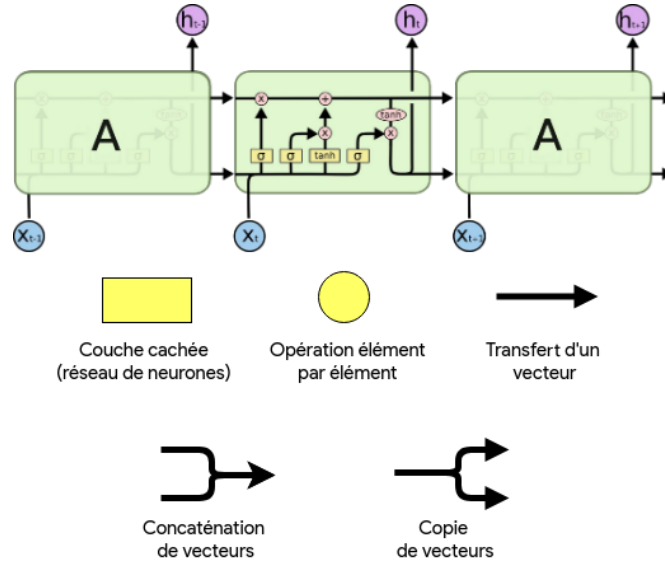


Figure 1.4 – Architecture interne d’une cellule mémoire dans un réseau LSTM (Olah, 2015)

- **Porte d’entrée (Input gate) :** C’est une unité de calcul qui laisse passer certaines informations en entrée en utilisant une fonction d’activation sigmoïde pour pondérer les composants du vecteur d’entrée à une étape t et celles du vecteur d’état interne à l’étape $t - 1$ (1 : laisser passer, 0 : ne pas laisser passer) et ainsi générer un vecteur candidat \tilde{C}_t (Hochreiter and Schmidhuber, 1997).

$$\begin{aligned} i_t &= \sigma(W_i \times [h_{t-1}, x_t] + b_i) \\ \tilde{C}_t &= \tanh(W_C \times [h_{t-1}, x_t] + b_C) \end{aligned} \quad (1.4)$$

où :

- h_{t-1} et x_t sont respectivement le vecteur d’état caché à l’étape $t - 1$ et le vecteur de données en entrée à l’étape t .
- σ est la fonction Sigmoid.
- i_t est appelé le vecteur d’entrée de la cellule LSTM.
- W_i est la matrice de poids entre les entrées (plus précisément, l’état précédent et la nouvelle donnée) et le vecteur d’entrée de la cellule LSTM.
- b_i est un vecteur de biais.
- \tilde{C}_t est le vecteur d’état interne candidat.
- W_C est la matrice de poids entre le vecteur d’entrée de la cellule LSTM et le vecteur d’état interne candidat.
- b_C est un vecteur de biais.
- \tanh est la fonction Tangente Hyperbolique.
- **Porte d’oubli (Forget gate) :** De manière similaire, cette porte permet de spécifier au fur et à mesure de l’apprentissage les informations à oublier, qui sont donc peu importantes (Hochreiter and Schmidhuber, 1997 ; Lipton, 2015).

$$f_t = \sigma(W_f \times [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (1.5)$$

où :

- f_t est appelé le vecteur d'oubli de la cellule LSTM.
- W_f est la matrice de poids entre les entrées et le vecteur d'oubli de la cellule LSTM.
- b_f est un vecteur de biais.
- **État interne de la cellule (Internal cell's state) :** C'est une sorte de convoyeur qui fait circuler l'information à travers la cellule. Cet état est mis à jour à travers la combinaison des vecteurs C_{t-1} et \tilde{C}_t filtrés par les portes f_t et i_t (Hochreiter and Schmidhuber, 1997).

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t \quad (1.6)$$

où :

- C_{t-1} est le vecteur d'état interne de la cellule LSTM à l'instant $t - 1$.
- **Porte de sortie (Output gate) :** Pour renvoyer un résultat comme état caché du réseau, la cellule filtre son vecteur d'état interne C_t et le combine avec la donnée en entrée et l'état du réseau précédent pour ne laisser passer que certaines informations (Olah, 2015 ; Hochreiter and Schmidhuber, 1997 ; Lipton, 2015).

$$\begin{aligned} o_t &= \sigma(W_o \times [h_{t-1}, x_t] + b_o) \\ h_t &= o_t * \tanh(C_t) \end{aligned} \quad (1.7)$$

où :

- o_t est un vecteur de sortie temporaire de la cellule LSTM à l'instant t .
- W_o est la matrice de poids entre les entrées et le vecteur de sortie temporaire de la cellule LSTM.
- b_o est un vecteur de biais.

1.3.3 Modèles de Markov cachés (Hidden Markov Models HMM)

Informellement, un modèle de Markov caché (HMM) est un outil de représentation pour modéliser la distribution de probabilité d'une séquence d'observations. Il est dit *caché* pour deux raisons. Premièrement, il est supposé qu'une observation O à un instant t (dénotée O_t) est le résultat d'un certain processus (souvent stochastique) dont l'état S_t est caché à l'observateur. Deuxièmement, l'état S_t du processus caché ne dépend uniquement que de son état à l'instant $t - 1$. Il est alors dit que ce processus est Markovien ou qu'il satisfait la propriété de Markov (Ghahramani, 2002 ; Kemeny and Laurie Snell, 1957). D'une façon plus intuitive, un HMM est utilisé pour modéliser un processus dont les observations sont régies par un autre processus qui ne peut pas être directement observé.

De façon plus formelle, un HMM est un 5-tuple $\langle S, V, \Pi, A, B \rangle$ (Rabiner and Juang, 1986) où :

- $S = \{s_1, \dots, s_N\}$ est l'ensemble fini des N états du processus sous-jacent.
- $V = \{v_1, \dots, v_M\}$ est l'ensemble des M symboles qui constitue un certain vocabulaire.
- $\Pi = \{\pi_i\}$ est une distribution initiale des probabilité d'états tel que π_i est la probabilité de se trouver à l'état i à l'instant $t = 0$, avec $\sum_{i=1}^N \pi_i = 1$
- $A = \{a_{ij}\}$ est une matrice $N \times N$ dont chaque entrée a_{ij} est la probabilité de transition d'un état i à un état j avec $\sum_{j=1}^N a_{ij} = 1$ pour tout $i = 1, \dots, N$.
- $B = \{b_i(v_k)\}$ est l'ensemble des distributions de probabilités d'émission (ou d'observation), donc $b_i(v_k)$ est la probabilité de générer un symbole v_k du vocabulaire étant donné un certain état i avec $\sum_{k=1}^M b_i(v_k) = 1$ pour tout $i = 1, \dots, N$.

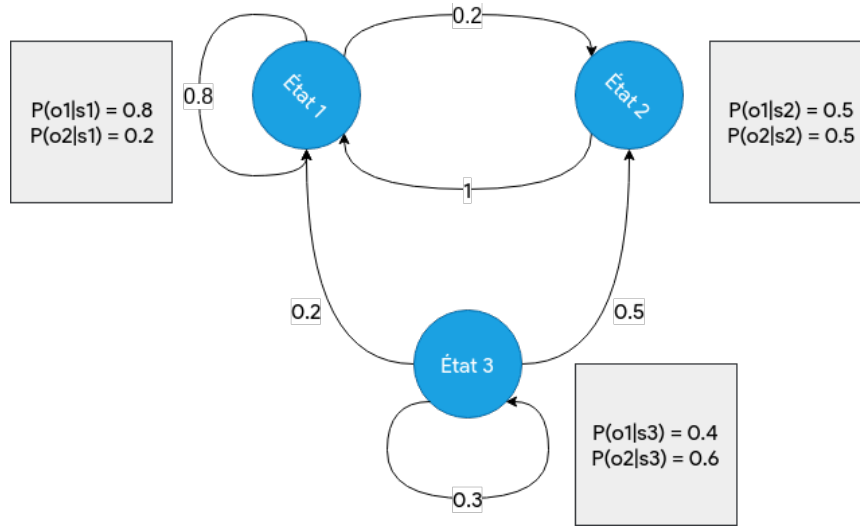


Figure 1.5 – Exemple d'une distribution de probabilités de transitions ainsi qu'une distribution de probabilités d'observations pour un HMM à 3 états et 2 observations

Le but est de trouver la séquence d'états $S_{1:K}$ qui maximise la probabilité (Ghahramani, 2002) :

$$P(Y_{1:K}|O_{1:K}) = P(O_1)P(O_1|S_1) \prod_{t=2}^K P(S_t|S_{t-1})P(O_t|S_t) \quad (1.8)$$

Pour y parvenir d'une manière efficace, un décodeur qui implémente l'algorithme de viterbi peut être utilisé (Forney, 1973 ; Bloit and Rodet, 2008).

1.4 Reconnaissance automatique de la parole (ASR)

Le premier module qui compose le système est celui de la reconnaissance automatique de la parole (ASR). Le but d'un tel système (ou sous-système dans notre cas) est de convertir un signal audio correspondant à la locution d'un utilisateur en un texte qui peut être interprété par la machine (Al-Anzi and AbuZeina, 2018). Différentes approches ont été développées au cours des années. Une architecture s'est ensuite dégagée où les systèmes passent par deux phases : la phase d'apprentissage et la phase de reconnaissance. La première consiste à collecter les données qui constituent le corpus d'apprentissage, un

ensemble de fichiers audios avec leurs transcriptions en texte et en phonèmes. Le signal est ensuite traité pour en extraire des vecteurs de caractéristiques (ou attributs). La suite de l'apprentissage consiste à initialiser le HMM, lui passer les vecteurs précédemment extraits puis l'enregistrer pour la phase suivante qui est la reconnaissance. Dans la deuxième phase, le signal audio passe par le même procédé d'extraction des attributs, en utilisant un algorithme de décodage approprié (Bloit and Rodet, 2008), puis la séquence d'observations passe par le HMM et la meilleure séquence de mots est sélectionnée (Yu and Deng, 2015).

Une architecture assez générale s'est dégagée. Quatre modules sont impliqués dans le processus de la reconnaissance de la parole ; nous les citerons dans les sections qui suivent en énumérant les modèles utilisés dans chacun.

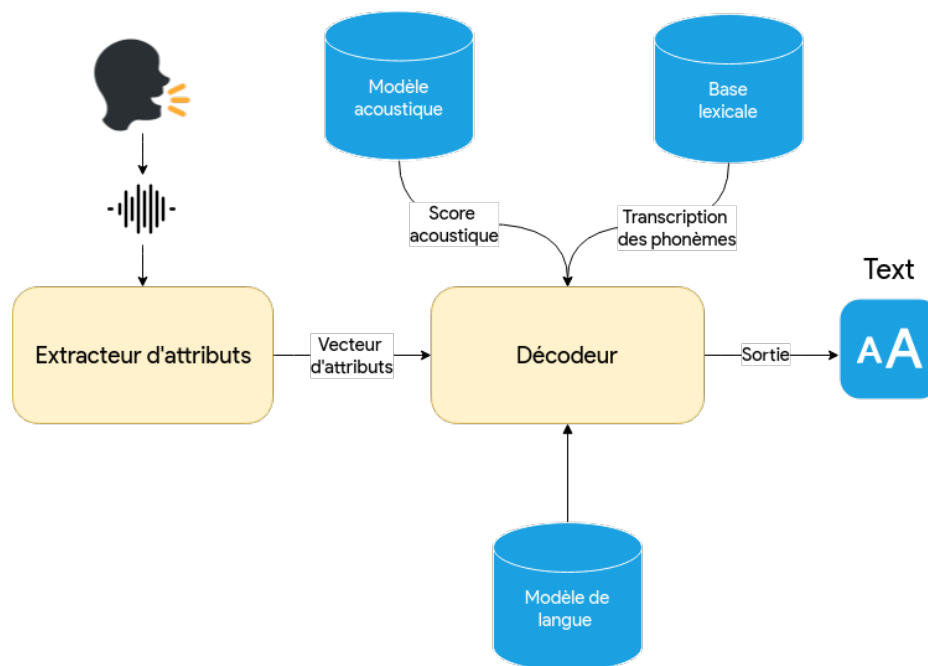


Figure 1.6 – Architecture d'un système de reconnaissance de la parole (Yu and Deng, 2015)

1.4.1 Acquisition du signal et extraction d'attributs

L'étape consiste à extraire une séquence de vecteurs caractéristiques à partir du signal audio, fournissant une représentation compacte de ce dernier. Le processus démarre par la segmentation du signal en *trames*. Une transformation de fourrier est ensuite appliquée pour engendrer un spectre de magnitude qui sera ensuite passé à un module de transformation en spectre de Mel (Mel-Spectrum) qui est une sorte de changement d'échelle. Finalement, une transformation inverse de fourrier est appliquée pour engendrer le Mel-Cpestrum qui est le vecteur d'attributs que nous recherchions (Narang and Gupta, 2015). Un tel processus peut utiliser plusieurs techniques pour la mise à l'échelle : MFCC (Mel-frequency cepstrum) (Chauhan and Desai, 2014), LPC (Linear Predictive coding) (O'Shaughnessy, 1988) et RASTA (RelAtive SpecTrAl) (Rahali et al., 2014), chacune possédant ses avantages et ses inconvénients.

1.4.2 Modélisation acoustique et modélisation du lexique

C'est le cœur du système de reconnaissance. Le but est de construire un modèle permettant d'identifier une séquence de phonèmes à partir d'une séquence d'observations de vecteurs d'attributs. Ceci peut être fait en utilisant un modèle HMM et en disposant d'un corpus de fichiers audio accompagnés de leurs transcriptions en phonèmes et en texte (Ghai and Singh, 2012 ; Rabiner and Juang, 1986), ou bien un réseau de neurones profonds (Yu and Deng, 2015), ou encore une hybridation de ces derniers (Deng et al., 2013). Le modèle acoustique procède après la reconnaissance de la séquence de phonèmes au décodage de ce dernier. Ceci est effectué en utilisant un dictionnaire linguistique qui transcrit chaque mot du vocabulaire en phonèmes qui le constituent. Ceci peut conduire à un cas d'ambiguïté où plusieurs mots peuvent avoir la même transcription phonétique (ou bien aucun mot ne correspond à cette séquence). Pour lever cette ambiguïté, un modèle de langue est nécessaire pour décider quelle est la séquence de mots la plus probable qui coïncide avec la séquence de phonèmes observée.

1.4.3 Modélisation de la langue

Cette étape consiste à modéliser les aspects linguistiques de la langue que le système essaye de traiter. Souvent ces aspects sont spécifiques au domaine d'application afin de restreindre l'espace de recherche des mots reconnaissables par le système, puis de déterminer la séquence de mots en sortie la plus plausible. Les modèles utilisés sont basés soit sur des grammaires à contexte libre dans le cas où les séquences de mots reconnaissables sont peu variées et peuvent être modélisées par le biais de règles de la langue (Glass and Kyle Mccandless, 1994) ; ou alors dans un cadre plus récent, sur des modèles probabilistes basés sur les N-grammes.

Très souvent, quand il est nécessaire de traiter un ensemble de mots, phrases ou bien toute entité atomique qui constitue une séquence, il est intéressant de pouvoir assigner une probabilité de vraisemblance à une séquence donnée (par exemple une séquence de mots).

Dans un contexte textuel, un N-gramme est une suite de N mots¹ consécutifs qui forment une sous-chaîne S' d'une chaîne de caractères S . Un exemple d'un ensemble de bi-grammes (2-grammes) pour la phrase "Ouvre le fichier *home*" serait donc : (Ouvre,le), (le,fichier), (fichier,*home*).

Ainsi, en disposant d'un corpus de textes assez large et diversifié et d'une méthode de comptage efficace, il serait possible de calculer la vraisemblance d'apparition d'un mot w après une certaine séquence de mots t sous forme d'une probabilité P (Jurafsky and Martin, 2008).

$$P(w|t) = \frac{\text{Comptage}(t, w)}{\text{Comptage}(t)} \quad (1.9)$$

Disposant d'un volume de données textuelles assez conséquent, l'utilisation de modèles basés sur les N-grammes a prouvé son utilité (Jurafsky and Martin, 2008 ; Yu and Deng,

1. Dans certains cas, un N-gramme peut être aussi une suite de lettres/caractères

2015 ; Roark et al., 2007) .

1.5 Compréhension du langage naturel

Après avoir obtenu la requête de l'utilisateur, le module qui prend le relais est celui de la compréhension du langage naturel (Natural Language Understanding, NLU). Ce domaine fait partie du traitement automatique du langage naturel (Natural Language Processing, NLP). Il se focalise principalement sur les tâches qui traitent le niveau sémantique, voire même pragmatique, de la langue tel que la classification de texte, l'analyse de sentiments ou encore le traitement automatiques des e-mails. Dans le contexte d'un SPA, le but final d'un module de compréhension du langage naturel est de construire une représentation sémantique de la requête de l'utilisateur. Étant donné une telle requête préalablement transformée en texte brut dans un langage naturel, le module essaiera d'en extraire une information primordiale qui est l'intention du locuteur.

1.5.1 L'intention

L'intention est un élément clé dans notre travail. Nous allons donc la définir et expliquer pourquoi elle a été choisie comme abstraction sémantique d'une requête d'un utilisateur.

Une intention (ou intent en anglais) est une représentation sémantique d'un but ou d'un sous-but de l'utilisateur. Plusieurs requêtes de l'utilisateur peuvent avoir le même intent, ce qui rend l'utilisation d'une telle représentation essentielle pour que la machine puisse mieux comprendre l'utilisateur. La motivation vient du fait que la machine ne peut pas comprendre une requête formulée dans un langage non-formel. Il a fallu trouver un moyen de communication universel entre la machine et l'utilisateur de telle sorte que l'un puisse "comprendre" l'autre . L'intermédiaire entre ces deux parties est un traducteur bidirectionnel d'une requête en langage naturel vers une requête dans un langage formel et inversement.

Le choix de l'intention doit être minutieusement étudié au préalable pour ne pas trop subdiviser un type d'intention, tout en gardant un certain degré de spécificité. À titre d'exemple, si deux intentions *Ouvrir_fichier* et *Ouvrir_document* existent, on retrouve ici une répétition de l'information *fichier* qui est aussi un *document*. Dans ce cas il suffit d'éliminer un synonyme pour ne garder qu'un seul cas d'intention.

Un autre cas est celui du sur-découpage d'intentions déjà assez semblable, *Ouvrir_fichier* et *Ouvrir_Repertoire* peuvent être regroupés en une seule intention *Ouvrir_Entite*. Bien-sûr ces choix sont purement conceptuels et dépendent fortement du problème traité par le système. Choisir une représentation à la place d'une autre est lié à la nature de la tâche que le module doit accomplir (Liu and Lane, 2016 ; Goo et al., 2018).

1.5.2 Classification d'intentions

La classification d'intentions à partir d'un texte est une tâche réalisable avec des techniques récentes d'apprentissage automatique, plus précisément en utilisant des modèles basés sur les réseaux de neurones récurrents à "mémoire à court et long terme" (LSTM) (voir la section 1.4). Dans (Liu and Lane, 2016) et (Goo et al., 2018) deux architectures qui ont fait leurs preuves sont présentées. Dans le premier travail, les auteurs ont utilisé une architecture BiLSTM (LSTM Bidirectionnel) pour capturer les contextes droit et gauche d'un mot donné (Schuster and Paliwal, 1997). Le dernier état caché retourné par la cellule LSTM est ensuite utilisé pour la classification. Une couche d'attention est ajoutée (Chorowski et al., 2015) pour permettre au modèle de se focaliser sur certaines parties du texte en entrée. La deuxième architecture est un peu plus simple. En effet, elle utilise des cellules LSTM basiques avec une couche de classification sur le dernier état. L'avantage par rapport à la première architecture est le temps d'apprentissage assez réduit au détriment d'une erreur de classification plus accrue mais toujours dans les normes.

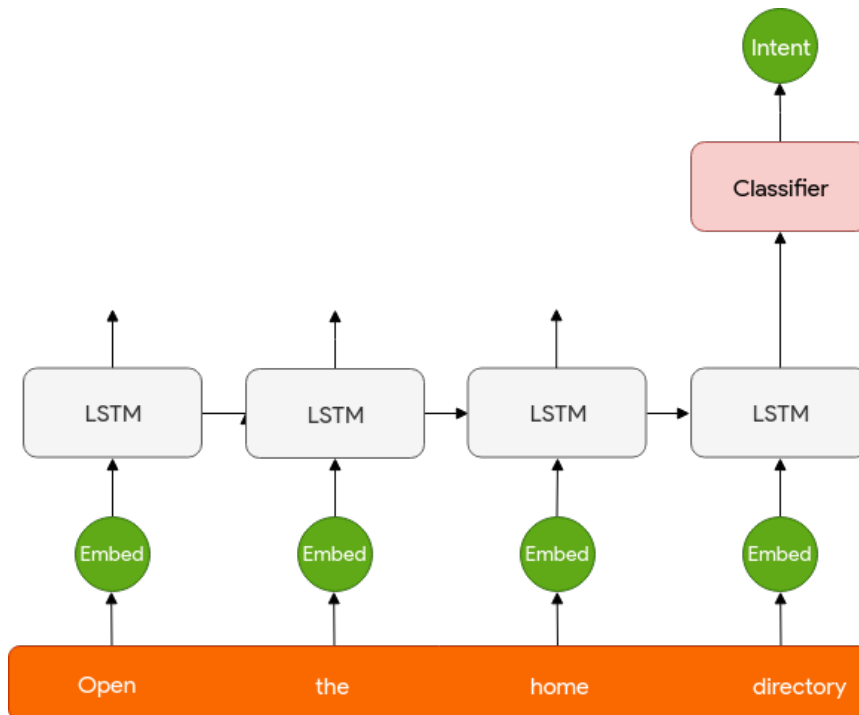


Figure 1.7 – Architecture de base d'un classificateur d'intentions (intents) (Liu and Lane, 2016)

1.5.3 Extraction d'entités

Déterminer l'intention d'un utilisateur ne s'arrête pas au stade de l'identification de l'*intent*. En effet, pour mieux représenter l'information récoltée depuis la requête, il faut en extraire des entités (nommées ou spécifiques du domaine) qui seront des arguments de l'intent identifié. Cette tâche consiste donc, pour une intention I donné, à extraire les arguments $Args$ qui lui sont appropriés depuis le texte de la requête. Plusieurs approches sont possibles. Dans (Goo et al., 2018) les auteurs ont attaqué le problème comme étant

la traduction d'une séquence de mots en entrée en une séquence d'entités en sortie ; le schéma suivant explicite le processus :

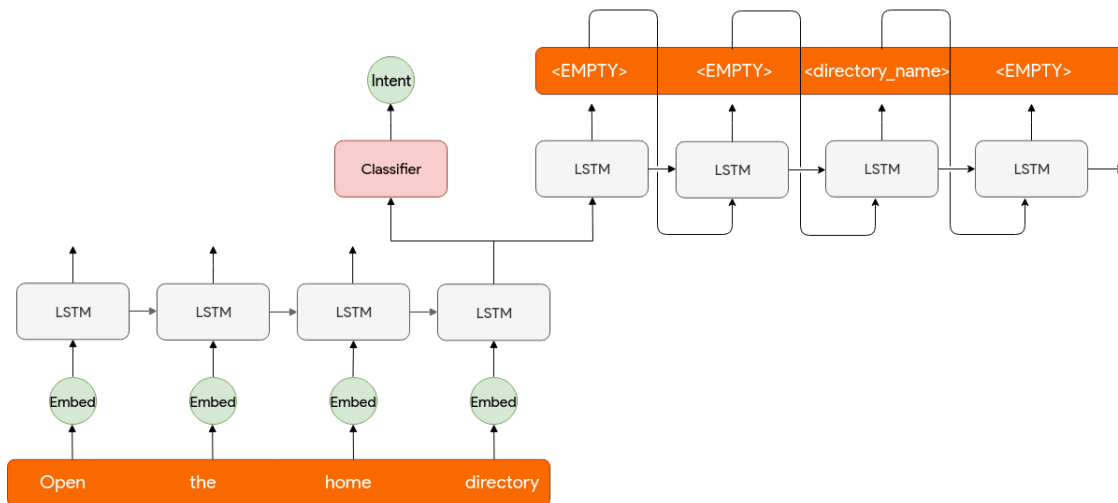


Figure 1.8 – Architecture de base d'un classificateur d'intentions doublé d'un extracteur d'entités (Goo et al., 2018)

1.5.4 Analyse sémantique

Disposant des deux modèles précédemment cités, le module NLU peut construire une représentation sémantique adéquate qui va être transmise au module suivant qui sera le gestionnaire du dialogue. L'avantage d'avoir en sortie une structure sémantique universelle est la non-dépendance par rapport à la langue de l'utilisateur. En effet, le système pourra encore fonctionner si une correspondance entre la nouvelle langue et le format choisi pour la représentation sémantique peut être trouvée. Le module donnera donc en sortie une trame sémantique (Semantic frame) qui comprendra les informations préalablement extraites, à savoir l'intention et les arguments (slots) qui lui sont propres (Liu and Lane, 2016 ; Goo et al., 2018 ; Wang et al., 2018).

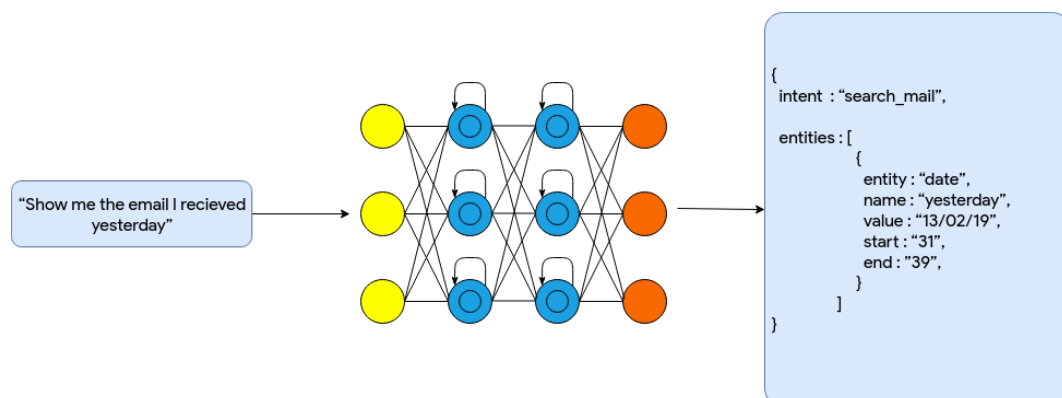


Figure 1.9 – Exemple d'une trame sémantique pour une requête donnée

1.6 Gestion du dialogue

La compréhension du langage naturel permet de transformer un texte en une représentation sémantique. Afin qu'un système puisse réaliser un dialogue aussi anthropomorphe que possible, il doit décider, à partir des représentations sémantiques reçues au cours du dialogue, quelle action prendre à chaque étape de la conversation. Cette action est transmise au générateur du langage naturel (voir 1.7) pour afficher un résultat à l'utilisateur. Généralement, deux principaux modules sont présents dans les systèmes de gestion de dialogue :

- Un module qui met à jour l'état du gestionnaire de dialogue : le traqueur d'état.
- Un module qui détermine la politique d'action du gestionnaire de dialogue.

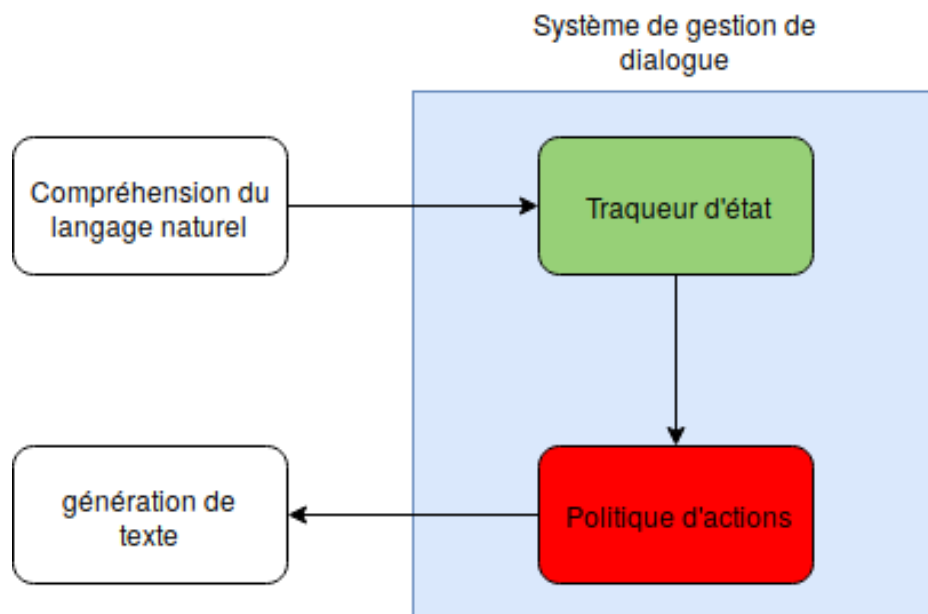


Figure 1.10 – Schéma général d'un gestionnaire de dialogue

Ainsi, le gestionnaire de dialogue passe d'un état à un autre après chaque interaction avec l'utilisateur. Le problème à résoudre est donc de trouver la meilleure action à prendre en étant dans un état donné.

1.6.1 Modélisation

Pour résoudre ce problème, un gestionnaire de dialogue peut être modélisé par un processus de décision Markovien (Markovian Decision Process, MDP) (Bellman, 1957). Ce dernier est modélisé par un 4-tuple (S, A, P, R) :

- S : ensemble des états du système.
- A : ensemble des actions du système.
- P : distribution de probabilités de transitions entre états sachant l'action prise. $P(s'/s, a)$ est la probabilité de passer à l'état s' sachant qu'on était à l'état s après avoir réalisé l'action a .

- R : est la récompense reçue immédiatement après avoir changé l'état avec une action donnée. $R(s'/s, a)$ est la récompense reçue après être passé à l'état s' sachant que le système était à l'état s après avoir réalisé l'action a .

Un MDP, à tout instant t , est dans un état s . Dans notre cas c'est l'état du gestionnaire de dialogue. Il peut prendre une action a afin de passer à un nouvel état s' . De ce fait, il reçoit une récompense qui, dans notre cas, est une mesure sur les performances du système de dialogue. Le but est de maximiser les récompenses reçues.

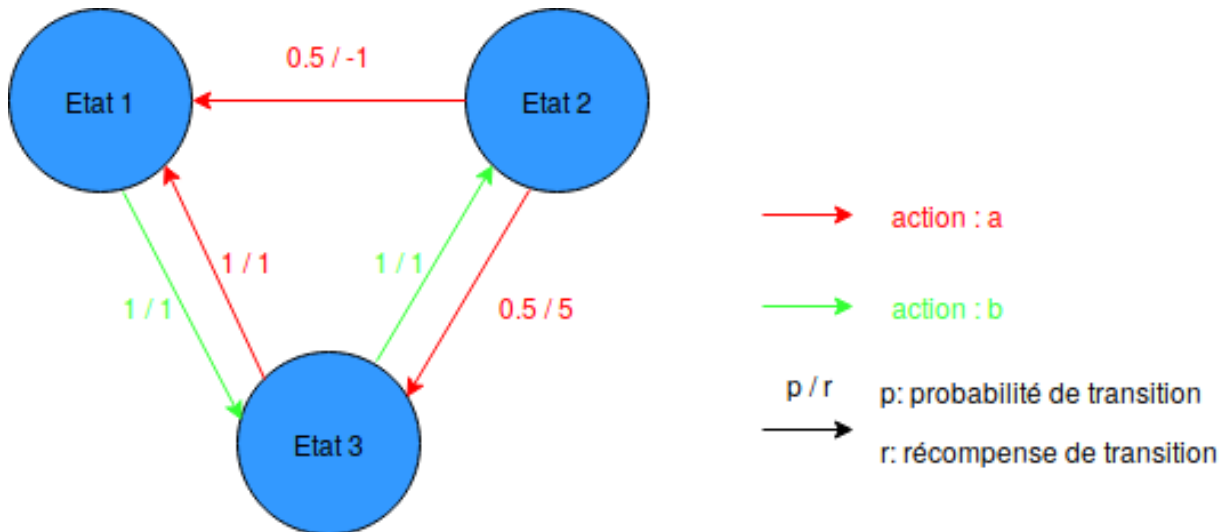


Figure 1.11 – Schéma représentant les transitions entre états dans un MDP

1.6.2 État du gestionnaire de dialogue

L'état d'un système de dialogue est une représentation sémantique qui contient des informations sur le but final de l'utilisateur ainsi que l'historique de la conversation. La représentation souvent utilisée dans les systèmes de dialogue est celle de la trame sémantique (Chen et al., 2017). Cette structure contient des emplacements à remplir dans un domaine donné. La figure 1.12 illustre un exemple de trame sémantique.

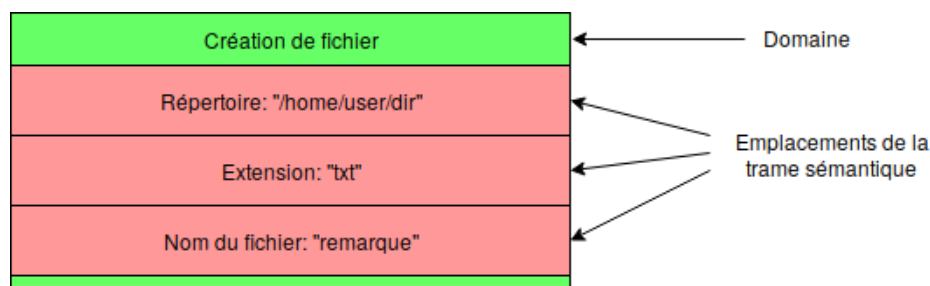


Figure 1.12 – Schéma représentant une trame sémantique avec comme domaine : création de fichier

À l'arrivée d'une nouvelle information, un module dédié met à jour l'état du gestionnaire de dialogue. Comme l'action du système de dialogue est décidée à partir de son état, cette

tâche est donc essentielle au bon fonctionnement du système. Plusieurs méthodes ont été proposées pour gérer le suivi de l'état du gestionnaire de dialogue (Williams and Young, 2007).

1.6.2.1 Suivi de l'état du gestionnaire de dialogue avec une base de règles

La méthode traditionnelle utilisée consiste à écrire manuellement les règles à suivre lors de l'arrivée d'une nouvelle information pour mettre à jour l'état (Goddeau et al., 1996). Cependant, les bases de règles sont très susceptibles à faire des erreurs (Chen et al., 2017) car elles sont peu robustes face aux incertitudes.

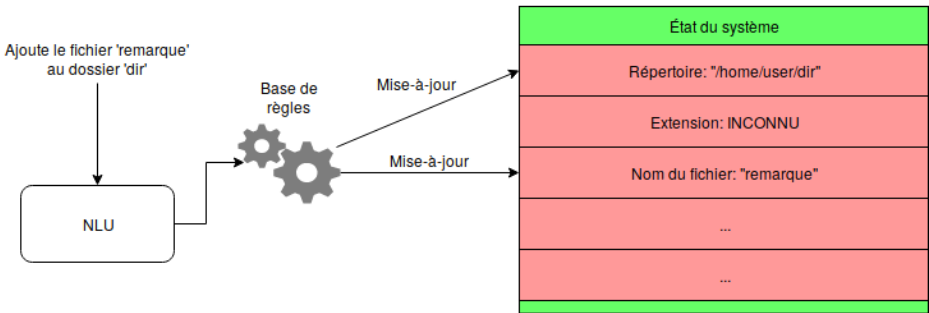


Figure 1.13 – Schéma représentant la mise-à-jour de l'état du gestionnaire de dialogue par un système basé règles

1.6.2.2 Suivi de l'état du gestionnaire de dialogue avec des méthodes statistiques

Le suivi dans ce cas se fait en gardant une distribution de probabilités sur l'état du système, ce qui nécessite une nouvelle modélisation non déterministe du problème. Les processus de décision markoviens partiellement observables (Partially Observable Markov Decision Process POMDP) (Young et al., 2010) sont une variante des MDP capable de répondre à ce besoin que nous introduirons par la suite. Dans ce cas, le système garde une distribution de probabilités sur les valeurs possibles des différents emplacements de la trame sémantique.

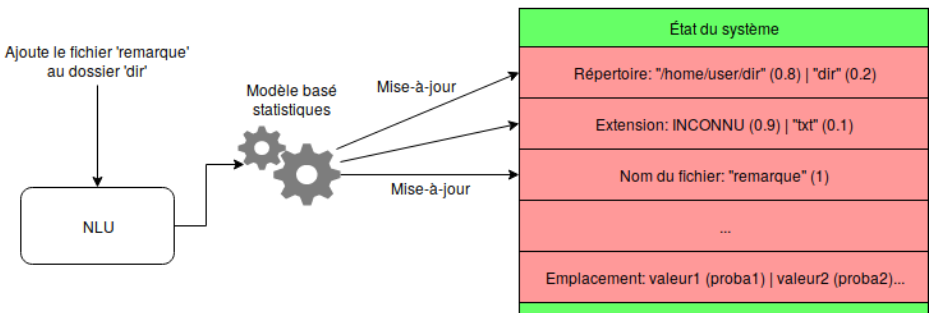


Figure 1.14 – Schéma représentant la mise-à-jour de l'état du gestionnaire de dialogue par un système basé statistiques

Processus de décision markovien partiellement observable (POMDP) Comme dans les processus de décision markoviens, un POMDP (Åström, 1965) passe d'un état à un autre

en prenant une des actions possibles. Cependant, un POMDP ne connaît pas l'état exact dans lequel le système se trouve à un instant t . Il reçoit par contre une observation qui est, dans notre cas, l'action de l'utilisateur, à partir de laquelle il peut estimer une distribution de probabilités sur l'état actuel. Pour résumer, un POMDP est un 6-tuple (S, A, P, R, M, O) où :

- Les 4 premiers composants sont les mêmes que ceux d'un MDP (voir 1.6.1).
- M : l'ensemble des observations.
- O : la distribution de probabilités sur les observations o en connaissant l'état s et l'action a prise pour y arriver. $O(o|s, a)$ est la probabilité d'observer o sachant que le système se trouve à l'état s et qu'il a pris l'action a pour y arriver.

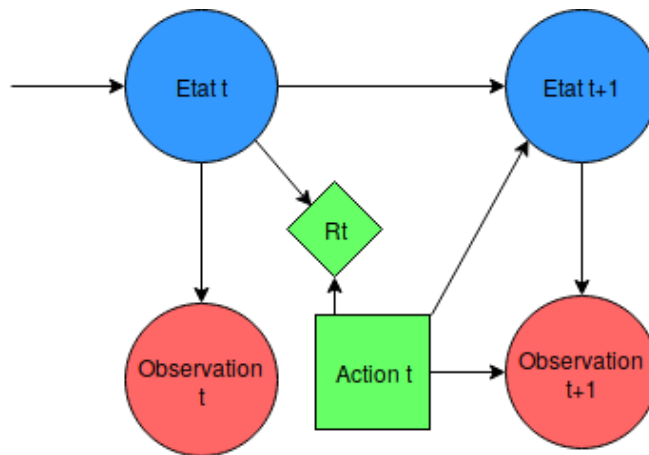


Figure 1.15 – Diagramme d'influence dans un POMDP

1.6.2.3 Suivi de l'état du gestionnaire de dialogue avec réseaux de neurones profonds

Récemment, des approches utilisant les réseaux de neurones profonds (voir 1.3.2.2) ont fait leur apparition. En effet, l'utilisation des architectures profondes permet de capter des relations complexes entre les caractéristiques d'un dialogue et, ainsi, mieux estimer l'état du système. Le réseau de neurones estime les probabilités de toutes les valeurs possibles d'un emplacement de la trame sémantique (Henderson et al., 2013). En conséquence, il peut être utilisé comme modèle de suivi d'état pour un processus partiellement observable.

1.6.3 Politique de gestion de dialogue

La première partie est dédiée au module qui suit l'état du système de dialogue. Dans cette partie, nous allons présenter des approches proposées afin d'arriver au but du MDP, c'est à dire quelles actions prendre pour maximiser la somme des récompenses obtenues.

1.6.3.1 Gestion de dialogue avec une base de règles

Les premières approches utilisaient des systèmes de règles destinés à un domaine bien spécifique. Elles étaient déployées dans plusieurs domaines d'application pour leur simplicité. Cependant, le travail manuel nécessaire reste difficile à faire et, généralement, n'aboutit pas à des résultats flexibles qui peuvent suivre le flux du dialogue convenablement (Lee et al., 2010).

1.6.3.2 Gestion de dialogue par apprentissage

La résolution d'un MDP revient à trouver une estimation de la fonction de récompense afin de pouvoir choisir la meilleure action. La majorité des approches récentes utilise l'apprentissage par renforcement dans le but d'estimer la récompense obtenue par une action et un état donnés. Cette préférence par rapport aux approches supervisées revient à la difficulté de produire des corpus de dialogues (Henderson et al., 2008), encore moins des corpus annotés avec les récompenses à chaque transition. Néanmoins, il existe des approches de bout en bout qui exploitent des architectures avec réseaux de neurones profonds et traitent le problème comme Seq2Seq² afin de produire directement une sortie à partir des informations reçues de l'utilisateur (Wen et al., 2017 ; Serban et al., 2016).

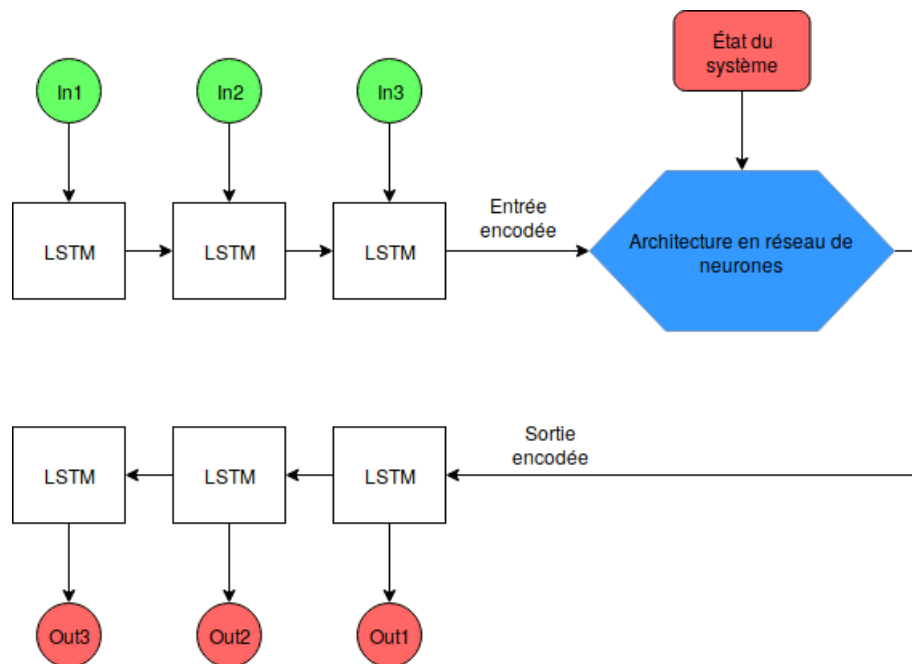


Figure 1.16 – Schéma de gestion de dialogue de bout en bout avec architecture Seq2Seq

2. Les modèles Seq2Seq sont des architectures de réseaux de neurones profonds qui prennent en entrée une séquence et produisent en sortie une autre séquence en utilisant les réseaux de neurones récurrents (RNN).

1.6.3.3 Apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement est une approche qui a pour but d'estimer une politique d'actions à prendre dans un environnement donné. Cette politique doit maximiser une mesure d'évaluation qui est sous forme de récompenses obtenues après chaque action (Weisz et al., 2018). L'environnement est souvent modélisé comme un MDP, ou éventuellement POMDP. L'agent d'apprentissage passe donc d'un état à un autre en prenant des actions dans cet environnement. L'apprentissage se fait dans ce cas en apprenant par l'expérience de l'agent, à savoir les récompenses obtenues par les actions prises dans des états donnés. Il peut ainsi estimer la fonction de récompense pour pouvoir faire le choix d'actions optimales.

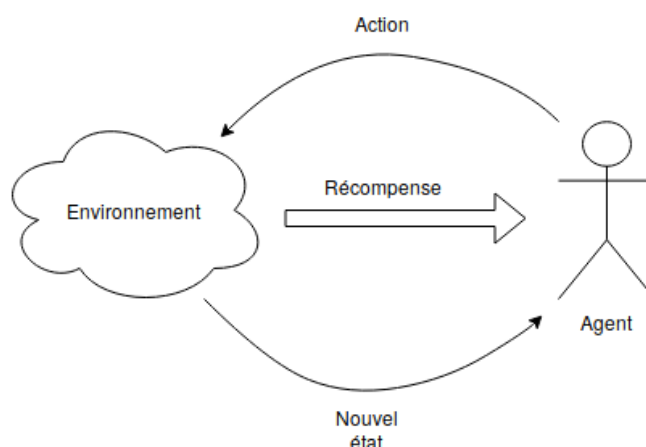


Figure 1.17 – Schéma d'interaction agent-environnement dans l'apprentissage par renforcement

Il existe plusieurs méthodes que l'agent peut utiliser pour estimer la fonction de récompense (Bertsekas, 2012), notamment Deep Q Learning (DQN) (Mnih et al., 2015) qui utilise les réseaux de neurones profonds pour trouver une approximation à cette fonction. Dans cette approche, à chaque fois que l'agent prend une action, il compare la récompense reçue avec celle estimée par le réseau de neurones, et applique ensuite l'algorithme de rétro-propagation pour corriger les erreurs du réseau.

Le système de dialogue est modélisé par un MDP. Seulement, ce dernier inclut l'utilisateur comme partie de l'environnement. Par conséquent, pour appliquer l'apprentissage par renforcement, il est nécessaire qu'un utilisateur communique avec le système pour qu'il apprenne. D'où la nécessité d'utiliser un **simulateur d'utilisateur** qui est un programme capable de se comporter comme un humain interagissant avec un système de dialogue. Le simulateur doit pouvoir estimer la satisfaction de l'utilisateur après une interaction. En d'autres termes, il doit comporter une fonction de récompense. Il existe plusieurs méthodes pour créer un simulateur d'utilisateur :

- Les simulateurs d'utilisateur basés règles : dans ce cas une liste de règles est écrite manuellement et le simulateur doit les suivre pour communiquer avec le système (Schatzmann et al., 2007).

- Les simulateurs d'utilisateur basés n-grammes : ils traitent un dialogue comme une séquence d'actions en prenant les n-1 actions précédentes pour estimer l'action la plus probable que peut prendre le simulateur à partir des statistiques tirées d'un corpus de dialogues (Georgila et al., 2005).
- Les simulateurs d'utilisateur basés HMM : les états du modèle sont les états du système et les observations sont ses actions. Ainsi un HMM peut estimer l'état le plus probable du système pour prendre une action. Il existe d'autres variantes, IHMM et IOHMM, qui incluent les probabilités conditionnelles des actions de l'utilisateur sachant l'état du système ou l'action du système directement dans le modèle HMM (Cuayáhuitl et al., 2005).
- Les simulateurs d'utilisateur avec apprentissage par renforcement : Comme le gestionnaire de dialogue, le simulateur apprend par renforcement au même temps. Dans ce cas la fonction de récompense pour les deux agents peut être apprise à partir des dialogues humain-humain (Chandramohan et al., 2011).

1.7 Génération du langage naturel (Natural Language Generation, NLG)

Le domaine de la génération automatique du langage naturel est l'un des domaines dont les limites sont difficiles à définir (Evans et al., 2002). Il est vrai que la sortie d'un tel système est clairement du texte. Cependant, l'ambiguïté se trouve dans ses entrées, c'est-à-dire, sur quoi se basera le système pour générer le texte. D'après (Reiter and Dale, 1997), la génération du langage naturel est décrite comme étant le sous domaine de l'intelligence artificielle qui traite la construction des systèmes de génération de texte à partir d'une représentation non-linguistique de l'information. Celle-ci peut être une représentation sémantique, des données numériques, une base de connaissances ou même des données visuelles (images ou vidéos). Ceci dit, d'autres travaux, comme (Labbé and Portet, 2012), utilisent les mêmes techniques pour des entrées linguistiques. Enfin, la génération du langage naturel peut être très proche de la gestion de dialogue (Dethlefs, 2014). En effet, le texte généré doit prendre en compte l'historique de la conversation et le contexte de l'utilisateur.

Il existe six tâches trouvées fréquemment dans les systèmes de génération de texte (Reiter and Dale, 1997) ; nous les présentons dans cette section.

1.7.1 Détermination du contenu

Cette partie consiste à sélectionner les informations de l'entrée dont le système veut transmettre leur contenu sous forme de texte naturel à l'utilisateur. En effet, les données en entrée peuvent contenir plus d'informations que ce que l'on désire communiquer (Yu et al., 2007). De plus, le choix de l'information peut aussi dépendre de l'utilisateur et de ses connaissances (Dethlefs, 2014). Ceci requiert de mettre au point un système qui détecte les informations pertinentes à l'utilisateur.

1.7.2 Structuration de texte

Après la détermination du contenu, le système doit ordonner les informations à transmettre. Ceci dépend grandement du domaine d'application qui peut exiger des contraintes d'ordre temporel ou de préférence par importance des idées. Les informations à transmettre en elles-mêmes sont souvent reliées par sens, ce qui implique une certaine structuration de texte à respecter.

1.7.3 Agrégation de phrases

Certaines informations peuvent être transmises dans une même phrase. Cette partie introduit des notions de la linguistique afin que le texte généré soit plus lisible et éviter les répétitions. Un exemple de cela peut être la description de la météo à Alger au cours de la matinée :

- Il va faire 16° à Alger à 7h.
- Il va faire 17° à Alger à 8h.
- Il va faire 18° à Alger à 9h.
- Il va faire 18° à Alger à 10h.

Ceci peut être agrégé en un texte plus compacte : "La température moyenne à Alger sera de 17.25°entre 7h et 10h."

1.7.4 Lexicalisation

Le système choisit les mots et les expressions à utiliser pour communiquer le contenu des phrases sélectionnées. La difficulté de cette tâche revient à l'existence de plusieurs manières d'exprimer la même idée. Cependant, certains mots ou expressions sont plus appropriés en certaines situations que d'autres. En effet, "inscrire un but" est une façon inadéquate d'exprimer "un but contre son camp" (Gatt and Krahmer, 2018).

1.7.5 Génération d'expressions référentielles (REG)

Cette partie du système se focalise sur la génération d'expressions référentielles qui peuvent être entre autres : des noms propres, groupes nominaux ou pronoms et ceci a pour but d'identifier les entités du domaine. Cette tâche semble être très proche de la lexicalisation dans le sens où elle aussi a pour but de choisir les mots et les expressions ; elle s'avère néanmoins plus délicate dû à la difficulté de confier suffisamment d'information sur l'entité afin de la différencier des autres (Reiter and Dale, 1997). Le système doit faire un choix de l'expression référentielle en se basant sur plusieurs facteurs. Par exemple "Mohammed", "Le professeur" ou "Il" faisant référence à la même personne, le choix entre eux dépend de comment l'entité a été mentionnée auparavant, si elle l'a été, et des détails qui l'ont accompagnée.

1.7.6 Réalisation linguistique

La dernière tâche consiste à combiner les mots et expressions sélectionnés pour construire une phrase linguistiquement correcte. Ceci requiert l'utilisation des bonnes formes morphologiques des mots, les ordonner, et éventuellement l'addition de certains mots du langage afin de réaliser une structure de phrase grammaticalement et sémantiquement correcte. Plusieurs méthodes ont été proposées, principalement les méthodes basées sur des règles manuellement construites (modèles de phrases, systèmes basés grammaires) et des approches statistiques (Gatt and Krahmer, 2018).

Modèles de phrases : La réalisation se fait en utilisant des modèles de phrases prédéfinis. Il suffit de remplacer des espaces réservés par certaines entrées du système. Par exemple, une application dans un contexte météorologique pourrait utiliser le modèle suivant : la température à [ville] atteint [température]° le [date].

Cette méthode est utilisée lorsque les variations des sorties de l'application sont minimales. Son utilisation a l'avantage et l'inconvénient d'être rigide. D'un côté, il est facile de contrôler la qualité des sorties syntaxiquement et sémantiquement tout en utilisant des règles de remplissage complexes (Theune et al., 2001). Cependant, lorsque le domaine d'application présente beaucoup d'incertitude, cette méthode exige un travail manuel énorme, voire impossible à faire, pour réaliser une tâche pareille. Bien que certains travaux ont essayé de faire un apprentissage de modèles de phrases à partir d'un corpus (Angeli et al., 2012), cette méthode reste inefficace lorsqu'il s'agit d'applications qui nécessitent un grand nombre de variations linguistiques.

Systèmes basés grammaire : La réalisation peut se faire en suivant une grammaire du langage. Celle-ci contient les règles morphologiques et de structures de la langue, notamment la grammaire systémique fonctionnelle (SFG) (Halliday and Matthiessen, 2004) qui a été largement utilisée comme dans NIGEL (Mann and Matthiessen, 1983) ou KPML (Bateman, 1997). L'exploitation des grammaires dans la génération du texte nécessite généralement des entrées détaillées. En plus des composantes du lexique sélectionnées, des descriptions de leurs rôles ainsi que leurs fonctions grammaticales sont souvent exigées. Un exemple d'entrée d'un système basé grammaire est celui de SURGE (Elhadad and Robin, 1996) dans la figure 1.18 qui génère la phrase : "She hands the draft to the editor".

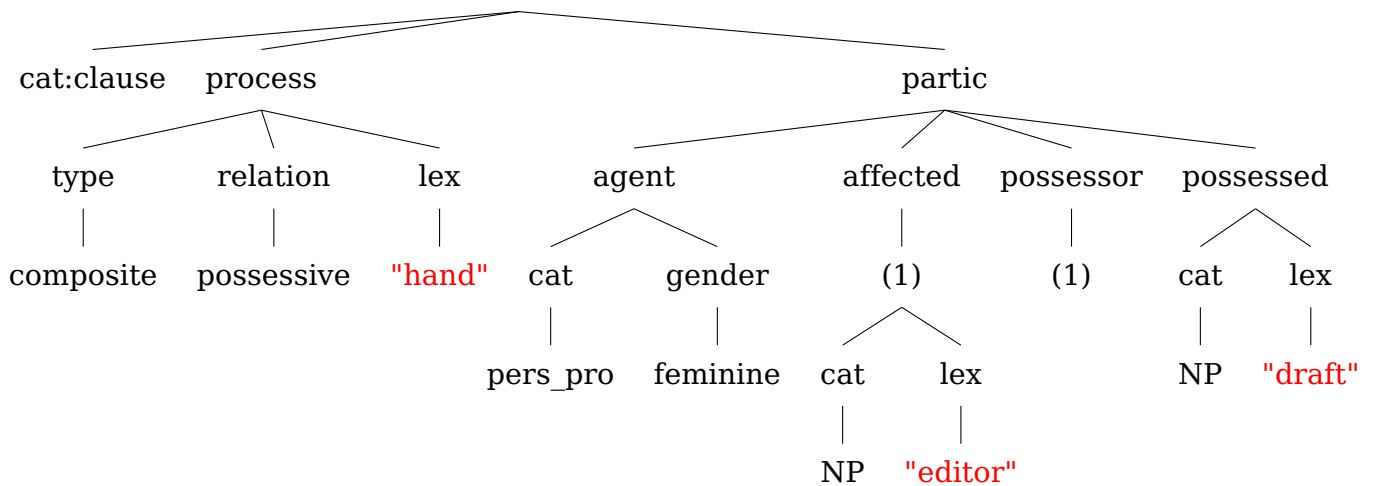


Figure 1.18 – Un exemple d'entrée de SURGE (Elhadad and Robin, 1996)

Comme les modèles de phrases, les systèmes basés grammaire nécessitent un énorme travail manuel. En particulier, il est difficile de prendre en compte le contexte en définissant les règles de choix entre les variantes possibles du texte résultat à partir des entrées (Gatt and Krahmer, 2018).

Approches statistiques : Il existe plusieurs méthodes basées sur des statistiques pour la tâche de réalisation. Certains se basent sur des grammaires probabilistes, qui ont l'avantage de minimiser le travail manuel tout en couvrant plus de cas de réalisation. Il existe principalement deux approches l'utilisant (Gatt and Krahmer, 2018) :

- La première se base sur une petite grammaire qui génère plusieurs alternatives qui sont ensuite ordonnées selon un modèle statistique basé sur un corpus pour sélectionner la phrase la plus probable comme par exemple (Langkilde-Geary, 2000).
- La deuxième méthode utilise les informations statistiques directement au niveau de la génération pour produire la solution optimale (Belz, 2008).

Dans les deux méthodes sus-citées la grammaire de base peut être manuellement développée. Dans ce cas, les informations statistiques aideront à la détermination de la solution optimale. Elle peut être aussi extraite à partir des données, comme l'utilisation des Treebanks³ pour déduire les règles de grammaire (Espinosa et al., 2008).

D'autres approches statistiques n'utilisent pas des grammaires mais se basent sur des classificateurs. Ces derniers peuvent être cascades de telle sorte à décider quel constituant utiliser dans quelle position ainsi que les modifications nécessaires pour générer un texte correct. À noter qu'une telle approche, ne nécessitant pas l'utilisation de grammaire, utilise des entrées plus abstraites et moins détaillées linguistiquement. À voir même la

3. un Treebank est un texte analysé qui contient des informations syntaxiques ou sémantiques sur les structures de phrases

possibilité qu'elle s'étend aux autres tâches de NLG, c'est-à-dire un système qui accomplit plusieurs tâches de NLG en parallèle jusqu'à la réalisation linguistique en utilisant les entrées initiales. Par exemple, les systèmes encodeur-décodeur sont des systèmes de bout-en-bout qui peuvent, directement à partir des entrées, générer du texte sans passer explicitement par les étapes citées précédemment. Dans la suite de ce travail, nous allons présenter ces systèmes basés encodeur-décodeur qui sont récemment plus utilisés.

1.8 Systèmes basés encodeur-décodeur

Une architecture souvent utilisée dans le traitement du langage naturel est l'encodeur-décodeur. En particulier, son utilisation dans les tâches seq2seq permet de mettre en correspondance une séquence de taille variable en entrée avec une autre séquence en sortie. Les modèles seq2seq peuvent être adaptés pour convertir une représentation abstraite de l'information en langage naturel (Ferreira et al., 2017).

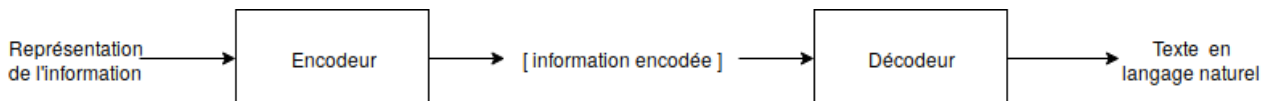


Figure 1.19 – Schéma d'une architecture encodeur-décodeur pour NLG

Beaucoup d'approches de génération de langage naturel en gestion de dialogue utilisent des encodeurs-décodeurs. Wen et al. (2015) utilisent par exemple des LSTMs sémantiquement conditionnés; ils ajoutent aux LSTMs classiques une couche contenant des informations sur l'action prise par le gestionnaire de dialogue pour assurer que la génération représente le sens désiré. D'autres travaux utilisent des réseaux de neurones récurrents pour encoder l'état du gestionnaire de dialogue et l'entrée reçue, suivie par un décodeur pour générer le texte de la réponse (Sordoni et al., 2015; Serban et al., 2016; Goyal et al., 2016).

1.9 Conclusion

Au terme de ce chapitre et après avoir étudié l'état de l'art sur les systèmes existants, nous avons pu construire un bagage théorique assez complet dans le domaine des SPAs. En assimilant les différentes approches, il est maintenant temps de passer à la conception de notre propre système. Le chapitre suivant introduira nos propositions pour le développement de notre propre SPA qui sera destiné à la manipulation d'un ordinateur.

Chapitre 2

Réalisation et résultats

2.1 Introduction

Dans la partie conception, nous avons proposé certaines modifications à apporter sur des approches existantes ainsi que des méthodes que nous avons jugées intéressantes pour notre système. Nous allons, dans la suite de ce chapitre, montrer la faisabilité de ces méthodes ainsi que leurs avantages et leurs limites.

Nous commençons par décrire l'environnement de travail. Nous détaillerons par la suite les aspects de l'implémentation des différents modules de notre application qui seront évalués et analysés. Pour clôturer avec une application d'un assistant personnel pour la manipulation de fichiers.

2.2 Environnement de développement

Dans cette section nous allons présenter les différents outils (logiciels et matériels) qui ont été utilisé pour l'implémentation de Speech2Act.

2.2.1 Machines utilisées

Principalement, le développement se divise en deux parties :

- Apprentissage : les données sont récoltées ou construites puis nettoyées et préparées. Les modèles sont développés, entraînés puis testés.
- Les modules sont implémentés puis connectés et intégrés dans l'application.

Pour ce faire nous avons utilisé des machines dont les spécificités sont mentionnés ci-dessous :

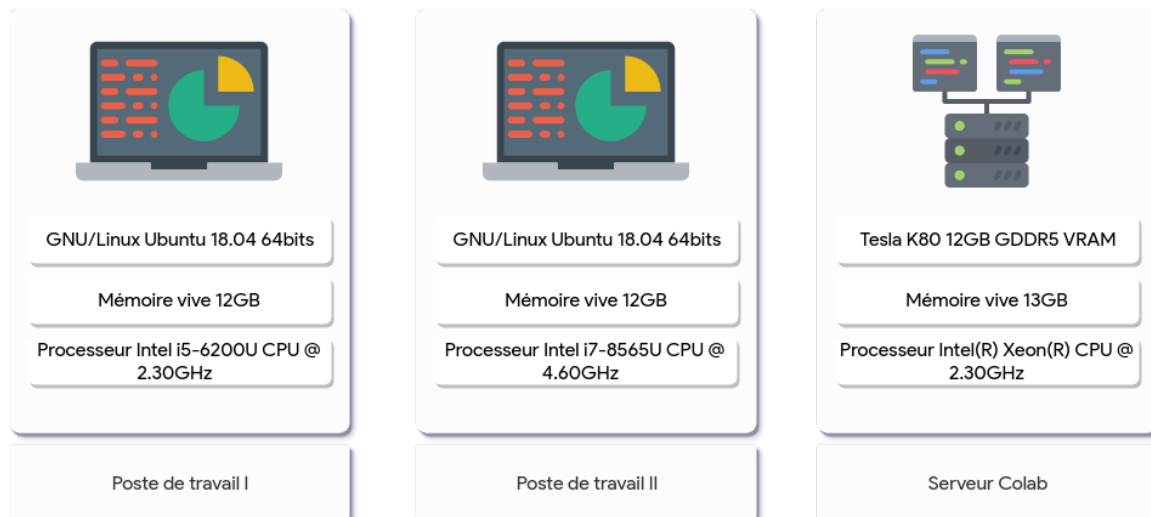


Figure 2.1 – *Caractéristiques des machines*

En ce qui concerne la partie logicielle, une liste non exhaustive est présentée ci dessous, qui ne mentionne que les outils les plus utilisés et les plus exploités :

2.2.2 Langages de programmation

Python

Python¹ est un langage de programmation interprété de haut niveau, structuré et open source. Il est multi-paradigme (orienté objet, programmation fonctionnelle et impérative) et multi-usage. Il est, comme la plupart des applications et outils open source, maintenu par une équipe de développeurs un peu partout dans le monde. Il offre une grande panoplie d'extensions (packages) pour résoudre une variété de problèmes, qu'ils soient liés au développement d'applications de bureau, web ou mobiles.

Javascript

JavaScript² est un langage de programmation utilisé principalement par les navigateurs web pour exécuter un bout de code incorporé dans une page web, plus communément appelé script. Il permet la manipulation de tous les éléments inclus dans une page, et par conséquent permet une gestion dynamique de ces derniers. Il est beaucoup utilisé du côté client mais peut aussi être exécuté du côté serveur. Tout comme Python, il offre une grande variété dans le choix des modules qui peuvent ajouter de nouvelles fonctionnalités, le tout géré par un gestionnaire de module *npm*³ devenu un standard.

1. https://fr.wikibooks.org/wiki/Programmation_Python/Introduction

2. https://fr.wikibooks.org/wiki/Programmation_JavaScript/Introduction

3. Node Package Manager ou Gestionnaire de packages Node

2.2.3 Bibliothèques et bibliothèques



Figure 2.2 – Bibliothèques et librairies les plus utilisées dans ce projet.

DeepSpeech API

Package python qui fait office d'interface entre un script Python et la librairie de reconnaissance automatique de la parole DeepSpeech (Hannun et al., 2014). Il permet entre autres de charger différents modèles acoustiques ou modèles de langues. Il offre aussi la possibilité d'utiliser des scripts d'apprentissage prédéfinis pour peu que les données soient organisées suivant une certaine norme ; ces scripts sont notamment hautement paramétrables.

PyAudio

PyAudio⁴ est une librairie python destinée à la manipulation des fichiers ou flux audios. Elle offre entre autres la possibilité d'extraire des méta-données sur un flux audio (fréquence d'échantillonnage, débit, etc.). La possibilité d'extraire le vecteur de caractéristiques d'un extrait audio est aussi présente comme fonctionnalité.

Beautiful Soup

Beautiful Soup⁵ est une bibliothèque Open source permettant l'analyse de fichiers html pour en extraire ou y injecter des données. Principalement utilisée pour filtrer les balises html depuis une page web.

4. <https://pypi.org/project/PyAudio/>

5. <https://pypi.org/project/beautifulsoup4/>

PySpark

PySpark⁶ est un package Python utilisé comme interface pour interagir avec un serveur Spark. Il permet entre autres de lire et écrire des données dans le nouveau format Hadoop.

Scikit-Learn

Scikit-Learn⁷ est une bibliothèque Open source conçue pour rapidement développer des modèles pour l'apprentissage automatique, principalement utilisée pour ses nombreux outils de pré-traitement des données (codification, normalisation, filtrage ...).

Numpy

Numpy⁸ est une bibliothèque spécialisée dans la manipulation de grands volumes de données numériques, notamment les vecteurs (tableaux) multi-dimensionnels. Les opérations sur ces derniers sont implémentées en C pour optimiser au maximum leur coût en temps de calcul ou ressources mémoires utilisées. Elle offre des structures de données compatibles avec beaucoup d'autre librairies comme Tensorflow ou Keras.

Tensorflow & Keras

Tensorflow⁹ est une bibliothèque dédiée à l'apprentissage automatique, et plus particulièrement aux réseaux de neurones et l'apprentissage profond. Optimisée pour exécuter des opérations à grande échelle et massivement distribuées sur un réseau, Tensorflow offre la possibilité d'implémenter une grande variété d'architectures de modèles avec un maximum d'efficacité. Elle dispose d'un package Python permettant d'interagir avec le cœur de la bibliothèque mais reste néanmoins assez bas-niveau. Keras¹⁰ quant-à elle propose de rajouter une couche d'abstraction à Tensorflow. C'est un package python destiné à faciliter le développement de modèles pour l'apprentissage profond tout en offrant la possibilité de rajouter et modifier un grand nombre de fonctionnalités par défaut. Sa force réside dans le fait qu'il peut utiliser au plus bas niveau plusieurs librairies autres que Tensorflow comme Theano¹¹ et CNTK¹².

Flask

Falsk¹³ est une micro-librairie Open source dédiée au développement d'applications basées web. De base, cette librairie est très légère, mais elle offre la possibilité d'ajouter des

6. <https://spark.apache.org/>

7. <https://scikit-learn.org/stable/>

8. <https://www.numpy.org/>

9. <https://www.tensorflow.org/>

10. <https://keras.io/>

11. <http://deeplearning.net/software/theano/>

12. <https://github.com/microsoft/CNTK>

13. <http://flask.pocoo.org/>

extensions qui s'intègrent très facilement au système de base.

Vuetify

Vuetify est une librairie Open source basée sur VueJs dédié au développement d'interfaces web ou mobiles. Elle implémente le paradigme Material Design de Google et offre la possibilité d'étendre les composants de base et de créer des interfaces belles et adaptatives.

2.2.4 Outils et logiciels de développement

PyCharm

PyCharm est un environnement de développement intégré spécialisé et optimisé pour programmer dans le langage Python (voir 2.2.2 ci dessus). Il permet l'analyse de code en continu et offre un débogueur intégré pour exécuter un code instruction par instruction. Il offre également l'intégration de logiciel de gestion de versions comme Git, et supporte le développement web avec Flask.

Git

Système décentralisé de gestion de versions. Il permet entre autres de gérer les différentes versions d'un projet durant son développement, mais aussi de garder l'historique des modifications effectuées ainsi que la possibilité de régler des conflits lors de l'intégration finale des contributions des développeurs.

Google Colaboratory

Colaboratory¹⁴ est un outil de recherche et développement pour la formation et la recherche associées à l'apprentissage profond. C'est un environnement Python qui ne nécessite aucune configuration et offre la possibilité d'utiliser de puissantes machines rendues accessibles par Google pour accélérer la phase d'apprentissage.

Protégé

Protégé est un système dédié à la création et la modification d'ontologies. Il est développé en Java et est Open source distribué sous une licence libre (la Mozilla Public License). Il se démarque par le fait qu'il permet de travailler sur des ontologies de très grandes dimensions.

14. <https://colab.research.google.com/>

2.3 Reconnaissance automatique de la parole

Pour ce premier module, il a été très difficile d'effectuer les tests idéaux. En effet, nous n'avons pas pu trouver un ensemble de données qui proposait du contenu en rapport avec Speech2Act. Cependant puisque nous avons pu construire un mini-ensemble pour tester l'apport de notre modèle de langue. Les résultats ne doivent pas être pris comme une référence absolue, mais plutôt comme une indication pour de futurs possibles tests.

2.3.1 Ensemble de test

Pour tester le modèle acoustique, les données récoltées à travers le projet CommonVoice (voir la section ??) constituent un assez bon échantillon, de par la nature des enregistrements (sur téléphone portable, par plusieurs genres et accents de locuteurs ...), mais aussi de par le volume (environs 500 heures d'enregistrements audios). Nous avons toutefois décidé de construire un mini-ensemble de test d'environ 204 enregistrements audio d'une longueur moyenne de 5 secondes chacun. Ces échantillons ont été prélevés sur trois locuteurs masculins. 20% de ces échantillons ont été prélevés dans un environnement fermé mais bruyé (il s'agit d'un espace de travail pour étudiants) et sur téléphone. Le reste a été prélevé dans un environnement fermé avec peu de bruit à partir du micro d'un ordinateur portable. Chaque enregistrement est soit :

- une requête prélevée de l'ensemble de test du module de compréhension du langage naturel (voir les sections 2.4.2 et ??), ou
- une question prélevée de l'ensemble de données AskUbuntu¹⁵ qui regroupe des questions relatives à la manipulation d'un ordinateur sous le système d'exploitation GNU/Linux.

Pour le modèle de langue il s'agit de celui mentionné dans la section 1.4.3. Quelques modifications ont été rajoutées comme le filtrage des mots qui n'appartiennent pas à la langue anglaise, mais au prix du sacrifice de quelques noms propres non reconnus ou bien de séquences de mots/lettres sans réel sens.

2.3.2 Méthodologie d'évaluation

Les tests ont été effectués dans un serveur Colab pour libérer les machines locales. Les principales étapes sont les suivantes :

1. **Préparation des données** : Les données sont prélevées d'une base de données sqlite qui comprend une seule table Transcriptions. Les colonnes de la table sont :
 - **id** : identifiant de l'enregistrement
 - **path** : chemin vers le fichier audio de la requête.
 - **text** : transcription textuelle de la requête.

15. <https://github.com/taolei87/askubuntu>

Un script de conversion est ensuite lancé pour s'assurer que chaque enregistrement est au format .wav avec une fréquence de rafraîchissement égale à 16KHz (le modèle acoustique de DeepSpeech attend cette valeur exacte pour lancer l'inférence, sinon une erreur se produira).

2. **Métriques retenues** : À chaque instance testée, le **WER** (Word Error Rate) est calculé. Pour rappel la formule du WER est la suivante :

$$WER(y, \hat{y}) = \frac{S + D + I}{S + D + C} = \frac{S + D + I}{N}$$

où :

- \hat{y} est la séquence de mots prédite appelée Hypothèse.
 - y est la séquence de mots réelle appelée Référence.
 - S est le nombre de substitutions (compté en mots) réalisées entre l'hypothèse et la référence.
 - D est le nombre de suppressions qu'a effectué le système, donc le nombre de mots supprimés dans l'hypothèse par rapport à la référence.
 - I est le nombre d'insertions effectuées par le système (c.à.d, le nombre de mots rajoutés à l'hypothèse par rapport à la référence).
 - C est le nombre de mots bien placés.
 - N est la longueur totale de la séquence en nombre de mots
3. **Boucle d'évaluation** l'opération précédente est réitérée en incrémentant à chaque fois le taux d'utilisation de notre modèle de langue (de 20% à 100% avec un pas de 10%). Le WER associé est ensuite comparé à celui obtenu en utilisant le modèle de langue par défaut que propose DeepSpeech, le modèle acoustique sans modèle de langue, le résultat de l'API de Google¹⁶ et enfin le modèle par défaut de CMU Sphinx¹⁷

2.3.3 Résultats

Les résultats sont décrits dans le tableau 2.1 et la figure 2.3. Nous remarquons que sur notre mini-ensemble de test, les modèles par défaut obtiennent un score très proche de 1, ce qui démontre qu'ils ont été entraînés sur des cas assez généraux, ce qui n'est pas très bon. Cependant, en changeant juste le modèle de langue par défaut en injectant des échantillons, une nette amélioration est visible (environ -20%). Ce taux d'erreur diminue en augmentant la taille du corpus utilisé pour le modèle de langue. Toutefois, après avoir pris plus de 75% du corpus, l'erreur a légèrement augmenté. Cela peut s'expliquer par la nature assez bruitée du corpus, les fichiers README.MD qui sont rédigés par des personnes, l'erreur humaine, et l'absence de processus de vérification de l'orthographe, de la grammaire ou de la syntaxe du contenu. Nous avons envisagé de choisir comme corpus des extraits de livres dédiés à la manipulation des ordinateurs sous Linux, mais nous n'avons pas trouvé de ressources gratuites ou Open source exploitables.

16. <https://cloud.google.com/speech-to-text/>

17. <https://cmusphinx.github.io/>

Il est à noter que le meilleur résultat obtenu, c.à.d un taux d'erreur de 72.6% est très loin d'être satisfaisant comparé au taux d'erreur de l'API de Google par exemple qui est d'approximativement 0.3496%. Néanmoins, l'ajout d'un modèle de langue personnalisé a pu améliorer nettement les résultats observés durant l'utilisation du modèle de base. Comme mentionné dans la section ??, DeepSpeech reste la meilleure option en Open Source à notre portée.

| | WER (Word Error Rate) |
|---|-----------------------|
| Goole API | 0,34955014 |
| Modèle acoustique avec 50% du corpus | 0,72634931 |
| Modèle acoustique avec 75% du corpus | 0,72809889 |
| Modèle acoustique avec 100% du corpus | 0,72928369 |
| Modèle acoustique avec 25% du corpus | 0,73910913 |
| Modèle acoustique - 10% du corpus | 0,74333040 |
| Modèle acoustique et modèle de langue de base | 0,79569078 |
| Modèle acoustique seulement | 0,91092787 |
| CMU Sphinx de base | 0,94024028 |

Table 2.1 – Tableau récapitulatif des résultats pour le module de reconnaissance automatique de la parole.

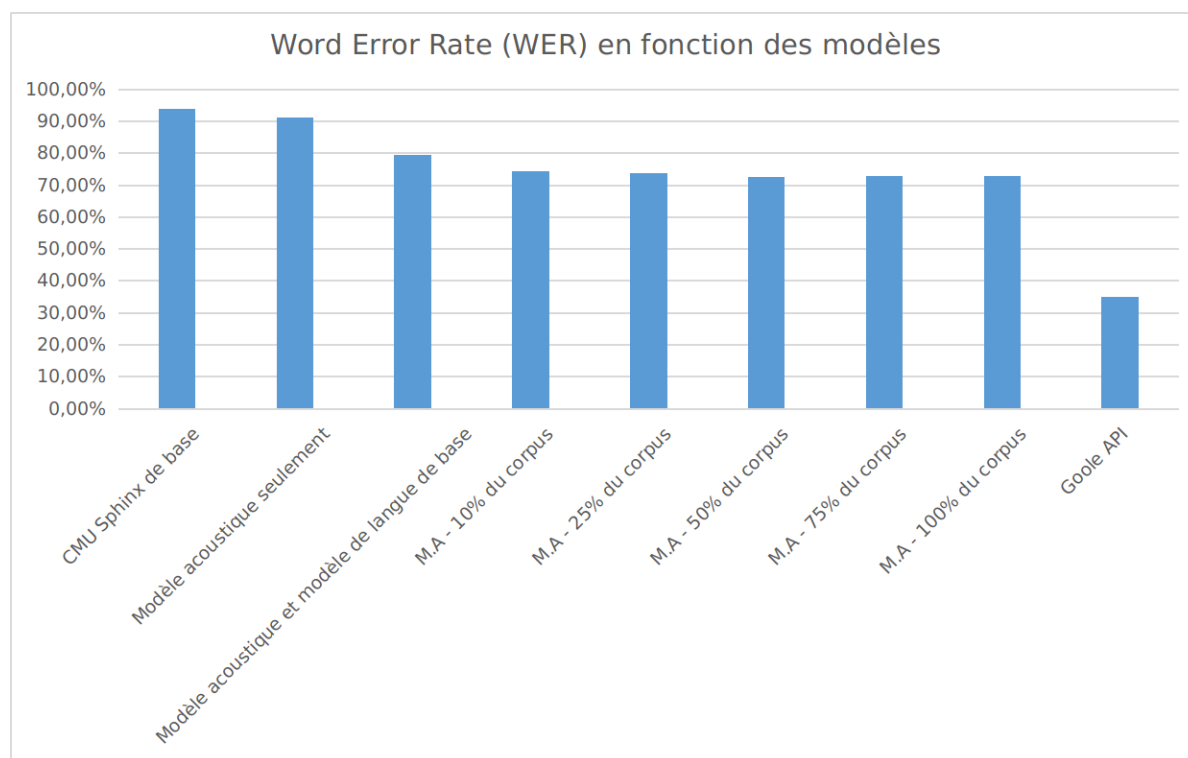


Figure 2.3 – Graphe récapitulatif des résultats pour le a reconnaissance automatique de la parole

2.4 Classification d'intentions et extractions d'entités de domaine

Pour ce module, une approche assez classique a été utilisée et l'ensemble de test est extrait de l'ensemble d'apprentissage (plus de détails dans la section suivante). Les métriques d'évaluation utilisées sont mentionnées dans la sous section 2.4.2. Nous commençons d'abord par détailler le contenu de l'ensemble de tests. Puis nous présenterons la méthodologie suivie pour la réalisation de ces tests. Un tableau récapitulatif sera présenté avant la fin pour illustrer les différents résultats.

2.4.1 Ensemble de test

Comme mentionné dans le chapitre précédent (voir la section ??), nous avons nous mêmes construit un ensemble d'apprentissage relativement varié. Il regroupe essentiellement des commandes, ou requêtes liées à l'exploration de fichiers pour le moment car c'est la tâche rudimentaire que Speech2Act peut accomplir.

L'ensemble de test est dérivé de celui d'apprentissage selon une politique de découpage basée sur le taux de présence d'un intent (intention). Comme illustré dans la figure 2.4, un pourcentage de chaque groupe d'instances affilié à la même classe est utilisé à la fois pour la validation et pour le test. Ce choix est motivé par le fait que les proportions des distributions des intentions dans l'ensemble original sont non-équilibrées.

Une liste exhaustive des intentions et slots accompagnée d'une description est introduite dans le tableau 2.2 ci dessous.

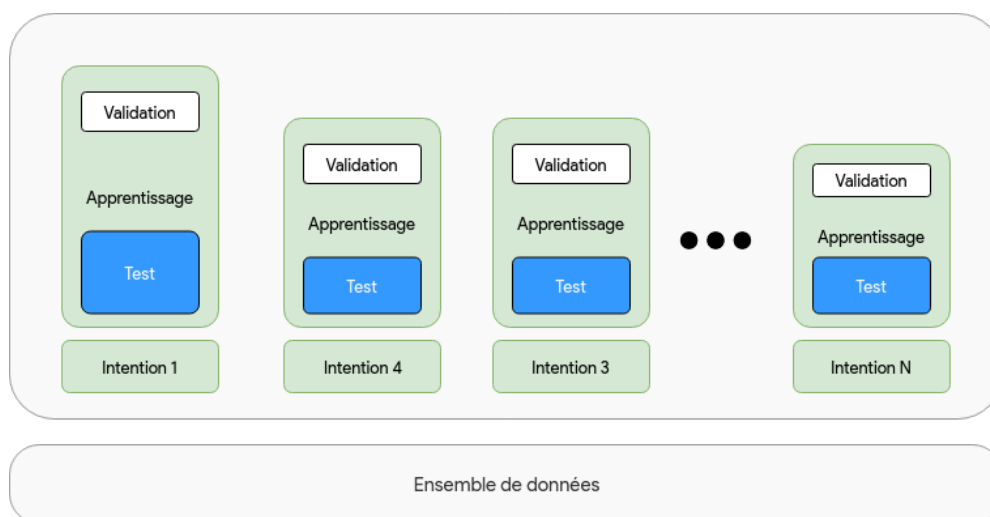


Figure 2.4 – Schéma de découpage des données pour l'apprentissage du modèle de compréhension du langage naturel

| Intention | Description de l'intention | Groupe | Argument(s) (Entité(s)) |
|-------------------------|---|---------------|---------------------------------------|
| create_file_desire | Création d'un fichier | ALTER | -file_name -parent_directory |
| create_directory_desire | Création d'un répertoire | ALTER | -directory_name -parent_directory |
| delete_file_desire | Suppression d'un fichier | ALTER | -file_name -parent_directory |
| delete_directory_desire | Suppression d'un répertoire | ALTER | -directory_name -parent_directory |
| open_file_desire | Ouverture d'un fichier | INFO | -file_name -parent_directory |
| close_file_desire | Fermeture d'un fichier | INFO | -file_name -parent_directory |
| copy_file_desire | Copie d'un fichier | ALTER | -file_name -origin -destination |
| move_file_desire | Déplacement d'un fichier | ALTER | -file_name -origin -destination |
| rename_file_desire | Renommage d'un fichier | - | -old_name -new_name |
| change_directory_desire | Changement du répertoire de travail courant | - | -new_directory |
| inform | Informé d'une intention | EXCH | -file_name -parent_directory |
| request | Demander une information | EXCH | -file_name -directory |
| deny | Réponse négative | - | - |
| confirm | Réponse positive | - | - |
| unknown | Intention inconnue | - | - |

Table 2.2 – *Tableau récapitulatif de toutes les intentions avec leurs descriptions et leurs arguments.*

Les intentions sont regroupées en groupes ; chaque groupe comporte des intentions qui influent sur les documents de la même manière. Il existe bien évidemment des intentions sans groupe (on peut considérer qu'ils forment un seul groupe, ou bien que chacun constitue son propre groupe) :

- **ALTER** : Groupe d'intentions qui altère l'état d'un document.
- **INFO** : Groupe d'intentions pour effectuer une opération puis informer l'utilisateur.
- **EXCH** : Groupe d'intentions dont le but est d'échanger des informations avec l'utilisateur.

2.4.2 Méthodologie d'évaluation

Après avoir construit l'ensemble de test, un parcours exhaustif des différentes combinaisons des paramètres suivants est effectué :

- **Architecture d'encodage** : C'est à dire l'utilisation ou pas d'un réseau récurrent LSTM de base ou bien BiLSTM. Le but étant de montrer que le modèle pourra mieux interpréter les données en entrée s'il capture le contexte de chaque mot.
- **Nombre neurones pour la couche de classification d'intention** : Lorsque l'encodeur retourne le dernier vecteur d'état caché, ce dernier passera par un réseau de neurones complètement connecté et multi-couches (nombre de couches fixé à 3 par souci de performance, une couche d'entrée, une couche intermédiaire et une couche de sortie). Le nombre de neurones sur la couche cachée dépend grandement de la complexité de la tâche à effectuer. La classification d'intentions pour l'exploration de fichier était relativement simple ; nous avons commencé avec 32 neurones puis nous avons doublé ce nombre jusqu'à 512 pour, en théorie, donner plus de puissance au classificateur tout en évitant un sur-apprentissage par surplus de neurones.
- **Nombre d'unités d'une cellule LSTM (respectivement BiLSTM)** : En effet, les portes d'une cellule LSTM (resp. BiLSTM) sont en vérité des réseaux de neurones denses (complètement connectés) et donc un ensemble de matrices de poids à optimiser. La capacité à "apprendre" la représentation des séquences dépend donc aussi du nombre de neurones dans ces mini-réseaux. Par le même raisonnement employé pour le classificateur d'intentions, nous avons commencé avec un petit nombre de neurones pour examiner où se trouverait le seuil minimal qui permettra au modèle de généraliser, mais aussi où le seuil critique se situerait pour permettre au modèle de ne pas tomber dans un cas de sur-apprentissage. Nous partons de 128 jusqu'à 512 unités avec pas de 32 unités.
- **Fonctions d'activations** : C'est un élément essentiel qui permet d'introduire la non-linéarité dans les relations entre chaque neurones de couches voisines. Ces fonctions permettent de mieux représenter les seuils d'activations des neurones. La fonction la plus utilisée dans la littérature est actuellement ReLu (Rectified Linear Unit) car elle a expérimentalement donné de meilleurs résultats dans une grande variété de tâches et problèmes liés à l'apprentissage automatique et à la classification et étiquetage de textes. Par souci d'exhaustivité nous avons quand même décidé de tester deux autres fonctions *tanh* (Tangente Hyperbolique) et *sigmoid* (Sigmoid). Pour chaque couche de sortie, la fonction *Softmax* a été appliquée car chaque couche traite d'un problème de classification multi-classes. Voici les équations pour chacune de ces fonctions :

$$\tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

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

$$\text{softmax}_i(x) = \frac{e^{x_i}}{\sum_{j=1}^K e^{x_j}} \text{ pour } i = 1, \dots, K \text{ et } x = (x_1, \dots, x_K) \in \mathbb{R}^K$$

- **Fonction erreur** : C'est l'élément clé pour la phase d'apprentissage, cette fonction détermine le degré d'exactitude du modèle, c'est à dire à quel point il est proche de la bonne réponse. Nous avons décidé d'utiliser comme fonction erreur la fonction *Categorical_Crossentropy* ou Erreur Logistique; de par la nature de l'ensemble d'apprentissage et de test. Une version pondérée de cette fonction a été préférée, pour palier au problème du non équilibrage des classes, que ce soit pour la classification d'intentions, ou pour la reconnaissance d'entités du domaine.

Les poids des classes sont calculés selon la formule suivante :

$$Poids_i = \max(1, \log \frac{T}{T_i})$$

où :

- T est le nombre total d'instances
- T_i est le nombre d'instances dont la classe est C_i

La formule de la fonction erreur devient donc :

$$Erreur(y, \hat{y}) = - \sum_i^C y_i * \log(\hat{y}_i) * Poids_i$$

où :

- \hat{y} est le vecteur en sortie produit par le modèle à la suite d'une fonction *Softmax*.
- y est le vecteur de classe réelle présent dans l'ensemble d'apprentissage
- C est le nombre de classes au total.
- **Fonction d'apprentissage** : Le choix de la fonction d'apprentissage est généralement affecté par un désir de précision et de rapidité. Une fonction qui converge rapidement en un minimum local peut être parfois préférée à une autre qui prendrait un temps considérable pour soit se retrouver dans le même minimum ou un autre minimum local (donc sans garantie de minimum optimal de la fonction erreur). Les deux fonctions utilisées sont RmsProp et Adam qui sont connues pour leur rapidité de convergence.
- **Encodage des entrée-sorties** : Là encore le choix de l'encodage des données influe grandement sur la capacité du modèle à distinguer et à représenter les différentes informations qui lui sont présentées. Comme initiative de notre part, nous avons mentionné dans la section ?? l'ajout de l'étiquette morphosyntaxique de chaque mot à l'encodage. Nous avons donc lancé les tests sur un encodage avec (respectivement sans) l'ajout des étiquettes pour mieux constater son impact.
- **Découpage des données** La stratégie adoptée était de prendre aléatoirement les mêmes proportions pour chaque sous-ensemble de chaque classe (intentions ou entités de domaine). Nous avons aussi décidé de faire varier les proportions de test et d'apprentissage en fixant celui de validation car nous avons remarqué que notre modèle n'arrivait pas à bien généraliser la relation entre les entrées et les sorties. Notre intuition portait sur le fait que le manque de données pouvait en être la cause (voir la section ?? pour plus de détails). Ainsi, nous avons varié le taux de découpage pour les

données de tests entre 25% et 75% avec un pas de 25%. Le taux de découpage pour l'apprentissage est évidemment de $(100\% - T_{test}) * 90\%$.

Pour éviter que le modèle ne sur-apprenne, nous avons volontairement interchangé quelques mots dans la séquence d'entrée et celle de sortie pour introduire un certain taux d'erreur et de variété. Cet échange se fait suivant une probabilité q fixée à 20%. Bien entendu, les étiquettes morphosyntaxiques ne sont pas échangées, et ce pour garder la structure de la phrase correcte.

Pour le reste des hyper-paramètres, la plupart ont été fixés par manque de temps et de ressources. Ainsi, le nombre d'epochs (itérations) a été limité au maximum à 15 avec une politique d'arrêt anticipé si la fonction erreur d'évaluation ne diminue pas plus d'un taux $\Delta E = 2 * 10^{-3}$ pendant au moins 4 itérations successives. Les métriques employées pour évaluer les deux classificateurs sont les suivantes :

- **Précision** : il s'agit d'une métrique classique qui évalue à quel point le modèle est bon pour prédire les classes.

$$P = \frac{VP}{VP + FP}$$

où :

- VP (Vrais Positifs) : nombre de cas où le modèle prédit correctement la classe comme étant positive.
 - FP (Faux Positifs) : nombre de cas où le modèle ne prédit pas correctement la classe comme étant positive.
- **Rappel** : Cette métrique évalue la capacité du modèle à effectuer des classifications correctes par rapport à tout l'ensemble de test. Plus formellement :

$$R = \frac{VP}{VP + FN}$$

où :

- FN (Faux Négatifs) : nombre de cas où le modèle ne prédit pas correctement la classe comme étant négative.
- **F-Mesure** : Mesure qui combine (d'un point de vue ensembliste) la précision et le rappel. Elle ne privilégie aucune des deux et essaye de donner un aperçu plus global de l'efficacité de l'algorithme en prenant compte des résultats de ces deux mesures.

$$F - Measure = \frac{2 * R * P}{R + P}$$

2.4.3 Résultats

Pour les résultats qui vont suivre, chaque tableau sera accompagné d'un paragraphe qui servira de commentaire aux résultats obtenus. Des remarques peuvent y être insérées pour attirer l'attention sur des détails non évidents.

| Nombre de neurones | Unités LSTM | Activation | Apprentissage | Précision Intention | Rappel Intention | Précision Entités de domaine | Rappel Entités de domaine | F-Mesure moyenne |
|--------------------|-------------|------------|---------------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|
| 32 | 128 | relu | rmsprop | 0,9743 | 0,9725 | 0,9214 | 0,9128 | 0,9452 |
| 32 | 256 | relu | rmsprop | 0,9755 | 0,9741 | 0,9066 | 0,8985 | 0,9387 |
| 32 | 512 | relu | rmsprop | 0,9750 | 0,9735 | 0,9082 | 0,9019 | 0,9396 |
| 64 | 128 | relu | rmsprop | 0,9700 | 0,9689 | 0,8744 | 0,8636 | 0,9192 |
| 64 | 256 | relu | rmsprop | 0,9753 | 0,9743 | 0,9141 | 0,9061 | 0,9424 |
| 64 | 512 | relu | rmsprop | 0,9687 | 0,9669 | 0,9293 | 0,9230 | 0,9470 |
| 128 | 128 | relu | rmsprop | 0,9638 | 0,9626 | 0,8425 | 0,8283 | 0,8993 |
| 128 | 256 | relu | rmsprop | 0,9714 | 0,9707 | 0,8431 | 0,8345 | 0,9049 |
| 128 | 512 | relu | rmsprop | 0,9647 | 0,9635 | 0,8690 | 0,8584 | 0,9139 |
| 256 | 128 | relu | rmsprop | 0,9704 | 0,9692 | 0,8473 | 0,8342 | 0,9052 |
| 256 | 256 | relu | rmsprop | 0,7215 | 0,7141 | 0,7573 | 0,7275 | 0,7299 |
| 256 | 512 | relu | rmsprop | 0,9716 | 0,9711 | 0,8842 | 0,8761 | 0,9257 |

Table 2.3 – Résultats des tests pour un encodage sans étiquetage morphosyntaxique avec des cellules LSTM avec découpage Apprentissage : 25%, Validation : 10%, Test : 75%.

Nous pouvons remarquer depuis le tableau 2.3 que pour un ensemble d'apprentissage assez réduit, le modèle arrive tout de même à bien classifier la majorité des intentions avec un rappel maximum de 97,43%. Cependant le slot-filling se révèle être une tâche plus ardue avec un rappel ne dépassant pas 92,30%. La meilleure combinaison qui équilibre les deux tâches utilise un petit nombre de neurones pour la classification d'intentions, mais en revanche demande une grande capacité de calcul pour la mémorisation des séquences en utilisant 512 unités dans les cellules LSTM.

| Nombre de neurones | Unités LSTM | Activation | Apprentissage | Précision Intention | Rappel Intention | Précision Entités de domaine | Rappel Entités de domaine | F-Mesure moyenne |
|--------------------|-------------|------------|---------------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|
| 32 | 128 | relu | rmsprop | 0,9736 | 0,9721 | 0,8894 | 0,8817 | 0,9292 |
| 32 | 256 | relu | rmsprop | 0,9746 | 0,9735 | 0,9344 | 0,9298 | 0,9531 |
| 32 | 512 | relu | rmsprop | 0,9721 | 0,9714 | 0,9149 | 0,9089 | 0,9418 |
| 64 | 128 | relu | rmsprop | 0,9687 | 0,9684 | 0,9344 | 0,9286 | 0,9500 |
| 64 | 256 | relu | rmsprop | 0,9737 | 0,9729 | 0,9389 | 0,9325 | 0,9545 |
| 64 | 512 | relu | rmsprop | 0,9741 | 0,9732 | 0,9257 | 0,9188 | 0,9479 |
| 128 | 128 | relu | rmsprop | 0,9684 | 0,9674 | 0,9354 | 0,9299 | 0,9503 |
| 128 | 256 | relu | rmsprop | 0,9709 | 0,9703 | 0,9360 | 0,9304 | 0,9519 |
| 128 | 512 | relu | rmsprop | 0,9749 | 0,9736 | 0,9426 | 0,9380 | 0,9573 |
| 256 | 128 | relu | rmsprop | 0,9681 | 0,9673 | 0,9349 | 0,9286 | 0,9497 |
| 256 | 256 | relu | rmsprop | 0,9686 | 0,9679 | 0,9048 | 0,8995 | 0,9352 |
| 256 | 512 | relu | rmsprop | 0,9768 | 0,9762 | 0,9272 | 0,9221 | 0,9505 |

Table 2.4 – Résultats des tests pour un encodage sans étiquetage morphosyntaxique avec des cellules BiLSTM avec découpage Apprentissage : 25%, Validation : 10%, Test : 75%.

Dans le tableau 2.4, l'ajout de l'information du contexte pour un mot à une position donnée à travers l'utilisation d'une architecture BiLSTM affecte systématiquement les scores (Précision, Rappel et F-Mesure). Ceux-ci augmentent d'un certain taux ($\approx 10\%$) dans la majorité des cas. Il est à noter que pour le même nombre d'unités BiLSTM, le nombre de neurones pour la classification d'intentions a doublé.

| Nombre de neurones | Unités LSTM | Activation | Apprentissage | Précision Intention | Rappel Intention | Précision Entités de domaine | Rappel Entités de domaine | F-Mesure moyenne |
|--------------------|-------------|------------|---------------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|
| 32 | 128 | relu | rmsprop | 0,9769 | 0,9738 | 0,9189 | 0,9115 | 0,9453 |
| 32 | 256 | relu | rmsprop | 0,9703 | 0,9693 | 0,8609 | 0,8513 | 0,9129 |
| 32 | 512 | relu | rmsprop | 0,9717 | 0,9706 | 0,9304 | 0,9238 | 0,9491 |
| 64 | 128 | relu | rmsprop | 0,9696 | 0,9672 | 0,8556 | 0,8465 | 0,9097 |
| 64 | 256 | relu | rmsprop | 0,969 | 0,9686 | 0,9354 | 0,9287 | 0,9504 |
| 64 | 512 | relu | rmsprop | 0,9761 | 0,9750 | 0,8275 | 0,8201 | 0,8997 |
| 128 | 128 | relu | rmsprop | 0,9713 | 0,9695 | 0,8565 | 0,8455 | 0,9107 |
| 128 | 256 | relu | rmsprop | 0,9689 | 0,9681 | 0,9204 | 0,9131 | 0,9426 |
| 128 | 512 | relu | rmsprop | 0,9714 | 0,9708 | 0,8756 | 0,8693 | 0,9218 |
| 256 | 128 | relu | rmsprop | 0,9707 | 0,9699 | 0,8767 | 0,8674 | 0,9212 |
| 256 | 256 | relu | rmsprop | 0,965 | 0,9642 | 0,8767 | 0,8707 | 0,9191 |
| 256 | 512 | relu | rmsprop | 0,9751 | 0,9739 | 0,8418 | 0,8291 | 0,905 |

Table 2.5 – Résultats des tests pour un encodage avec étiquetage morphosyntaxique avec des cellules LSTM avec découpage Apprentissage : 25%, Validation : 10%, Test : 75%.

| Nombre de neurones | Unités LSTM | Activation | Apprentissage | Précision Intention | Rappel Intention | Précision Entités de domaine | Rappel Entités de domaine | F-Mesure moyenne |
|--------------------|-------------|------------|---------------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|
| 32 | 128 | relu | rmsprop | 0,9726 | 0,9708 | 0,93 | 0,9232 | 0,9491 |
| 32 | 256 | relu | rmsprop | 0,9726 | 0,9715 | 0,9481 | 0,9436 | 0,9589 |
| 32 | 512 | relu | rmsprop | 0,9683 | 0,9656 | 0,9392 | 0,933 | 0,9515 |
| 64 | 128 | relu | rmsprop | 0,9735 | 0,9719 | 0,8369 | 0,8278 | 0,9025 |
| 64 | 256 | relu | rmsprop | 0,9735 | 0,9731 | 0,937 | 0,9329 | 0,9541 |
| 64 | 512 | relu | rmsprop | 0,9651 | 0,9636 | 0,9324 | 0,9261 | 0,9468 |
| 128 | 128 | relu | rmsprop | 0,9702 | 0,9687 | 0,8721 | 0,867 | 0,9195 |
| 128 | 256 | relu | rmsprop | 0,9741 | 0,9732 | 0,8209 | 0,8114 | 0,8949 |
| 128 | 512 | relu | rmsprop | 0,9794 | 0,979 | 0,923 | 0,9163 | 0,9494 |
| 256 | 128 | relu | rmsprop | 0,9654 | 0,9645 | 0,9324 | 0,9266 | 0,9472 |
| 256 | 256 | relu | rmsprop | 0,9682 | 0,967 | 0,9394 | 0,9352 | 0,9525 |
| 256 | 512 | relu | rmsprop | 0,9733 | 0,9723 | 0,9357 | 0,9304 | 0,9529 |

Table 2.6 – Résultats des tests pour un encodage avec étiquetage morphosyntaxique avec des cellules BiLSTM avec découpage Apprentissage : 25%, Validation : 10%, Test : 75%.

Quant-aux deux tableaux 2.5 et 2.6, ils montrent que l'ajout de l'étiquette morphosyntaxique a amélioré les résultats pour cas de l'utilisation d'une cellule LSTM simple tout en réduisant le nombre d'unités requises, moins de calculs et plus d'efficacité. Cela se confirme encore plus pour le cas de l'utilisation de l'architecture BiLSTM, en réduisant de presque la moitié la puissance de calcul nécessaire et en augmentant un tout petit peu la qualité des prédictions.

| Nombre de neurones | Unités LSTM | Activation | Apprentissage | Précision Intention | Rappel Intention | Précision Entités de domaine | Rappel Entités de domaine | F-Mesure moyenne |
|--------------------|-------------|------------|---------------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|
| 32 | 128 | relu | rmsprop | 0,9707 | 0,9691 | 0,8897 | 0,8776 | 0,9267 |
| 32 | 256 | relu | rmsprop | 0,974 | 0,9724 | 0,8921 | 0,8859 | 0,9311 |
| 32 | 512 | relu | rmsprop | 0,9708 | 0,9699 | 0,9293 | 0,9222 | 0,948 |
| 64 | 128 | relu | rmsprop | 0,9751 | 0,9729 | 0,8901 | 0,8796 | 0,9294 |
| 64 | 256 | relu | rmsprop | 0,9706 | 0,9698 | 0,9096 | 0,903 | 0,9383 |
| 64 | 512 | relu | rmsprop | 0,9717 | 0,9708 | 0,934 | 0,9262 | 0,9506 |
| 128 | 128 | relu | rmsprop | 0,965 | 0,9633 | 0,8212 | 0,8081 | 0,8894 |
| 128 | 256 | relu | rmsprop | 0,9712 | 0,9706 | 0,893 | 0,8817 | 0,9291 |
| 128 | 512 | relu | rmsprop | 0,9711 | 0,9698 | 0,9316 | 0,9269 | 0,9498 |
| 256 | 128 | relu | rmsprop | 0,9749 | 0,9741 | 0,9079 | 0,8988 | 0,9389 |
| 256 | 256 | relu | rmsprop | 0,9718 | 0,9712 | 0,8629 | 0,8555 | 0,9153 |
| 256 | 512 | relu | rmsprop | 0,9728 | 0,9725 | 0,93 | 0,9239 | 0,9498 |

Table 2.7 – Résultats des tests pour un encodage sans étiquetage morphosyntaxique avec des cellules LSTM avec découpage Apprentissage : 50%, Validation : 10%, Test : 50%.

| Nombre de neurones | Unités LSTM | Activation | Apprentissage | Précision Intention | Rappel Intention | Précision Entités de domaine | Rappel Entités de domaine | F-Mesure moyenne |
|--------------------|-------------|------------|---------------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|
| 32 | 128 | relu | rmsprop | 0,9539 | 0,948 | 0,8215 | 0,8064 | 0,8824 |
| 32 | 256 | relu | rmsprop | 0,9649 | 0,9629 | 0,8947 | 0,8887 | 0,9278 |
| 32 | 512 | relu | rmsprop | 0,9689 | 0,9673 | 0,9456 | 0,9409 | 0,9557 |
| 64 | 128 | relu | rmsprop | 0,9679 | 0,9667 | 0,8941 | 0,8879 | 0,9291 |
| 64 | 256 | relu | rmsprop | 0,974 | 0,9732 | 0,9425 | 0,9369 | 0,9567 |
| 64 | 512 | relu | rmsprop | 0,9771 | 0,9762 | 0,9339 | 0,9302 | 0,9543 |
| 128 | 128 | relu | rmsprop | 0,9699 | 0,9693 | 0,9326 | 0,9264 | 0,9496 |
| 128 | 256 | relu | rmsprop | 0,9654 | 0,9645 | 0,9384 | 0,9328 | 0,9503 |
| 128 | 512 | relu | rmsprop | 0,8747 | 0,8657 | 0,7848 | 0,7628 | 0,8219 |
| 256 | 128 | relu | rmsprop | 0,971 | 0,97 | 0,7782 | 0,7656 | 0,8712 |
| 256 | 256 | relu | rmsprop | 0,9716 | 0,9711 | 0,9327 | 0,9266 | 0,9505 |
| 256 | 512 | relu | rmsprop | 0,9752 | 0,9745 | 0,939 | 0,9326 | 0,9553 |

Table 2.8 – Résultats des tests pour un encodage sans étiquetage morphosyntaxique avec des cellules BiLSTM avec découpage Apprentissage : 50%, Validation : 10%, Test : 50%.

D'après les résultats des tableaux 2.7 et 2.8, le choix de l'architecture BiLSTM a amélioré la qualité des classifications, même si ce n'est que d'un petit taux. Ces tableaux semblent aussi montrer que notre intuition sur la faible quantité de données que nous possédions soit fondée. Les scores de F-Mesure tendent en moyenne à augmenter avec l'injection de nouvelles données d'apprentissage.

| Nombre de neurones | Unités LSTM | Activation | Apprentissage | Précision Intention | Rappel Intention | Précision Entités de domaine | Rappel Entités de domaine | F-Mesure moyenne |
|--------------------|-------------|------------|---------------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|
| 32 | 128 | relu | rmsprop | 0,9729 | 0,9712 | 0,9256 | 0,9182 | 0,9469 |
| 32 | 256 | relu | rmsprop | 0,9734 | 0,9716 | 0,8769 | 0,8689 | 0,9227 |
| 32 | 512 | relu | rmsprop | 0,9692 | 0,9681 | 0,9278 | 0,9226 | 0,9469 |
| 64 | 128 | relu | rmsprop | 0,9712 | 0,9693 | 0,8732 | 0,8641 | 0,9195 |
| 64 | 256 | relu | rmsprop | 0,9720 | 0,9709 | 0,9278 | 0,9219 | 0,9482 |
| 64 | 512 | relu | rmsprop | 0,9689 | 0,9671 | 0,9187 | 0,9107 | 0,9414 |
| 128 | 128 | relu | rmsprop | 0,9631 | 0,9614 | 0,8223 | 0,8090 | 0,8889 |
| 128 | 256 | relu | rmsprop | 0,9694 | 0,9686 | 0,8020 | 0,7936 | 0,8834 |
| 128 | 512 | relu | rmsprop | 0,9723 | 0,9716 | 0,9388 | 0,9330 | 0,9539 |
| 256 | 128 | relu | rmsprop | 0,9662 | 0,9655 | 0,8661 | 0,8563 | 0,9135 |
| 256 | 256 | relu | rmsprop | 0,9702 | 0,9699 | 0,9077 | 0,9016 | 0,9373 |
| 256 | 512 | relu | rmsprop | 0,9737 | 0,9731 | 0,9238 | 0,9193 | 0,9475 |

Table 2.9 – Résultats des tests pour un encodage avec étiquetage morphosyntaxique avec des cellules LSTM avec découpage Apprentissage : 50%, Validation : 10%, Test : 50%.

| Nombre de neurones | Unités LSTM | Activation | Apprentissage | Précision Intention | Rappel Intention | Précision Entités de domaine | Rappel Entités de domaine | F-Mesure moyenne |
|--------------------|-------------|------------|---------------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|
| 32 | 128 | relu | rmsprop | 0,9906 | 0,9900 | 0,9559 | 0,9524 | 0,9722 |
| 32 | 256 | relu | rmsprop | 0,9920 | 0,9914 | 0,9650 | 0,9623 | 0,9777 |
| 32 | 512 | relu | rmsprop | 0,9900 | 0,9894 | 0,9603 | 0,9577 | 0,9744 |
| 64 | 128 | relu | rmsprop | 0,9903 | 0,9903 | 0,9621 | 0,9594 | 0,9755 |
| 64 | 256 | relu | rmsprop | 0,9871 | 0,9870 | 0,9570 | 0,9539 | 0,9713 |
| 64 | 512 | relu | rmsprop | 0,9893 | 0,9886 | 0,9604 | 0,9579 | 0,9741 |
| 128 | 128 | relu | rmsprop | 0,9935 | 0,9931 | 0,9581 | 0,9550 | 0,9749 |
| 128 | 256 | relu | rmsprop | 0,9885 | 0,9883 | 0,8658 | 0,8610 | 0,9259 |
| 128 | 512 | relu | rmsprop | 0,9896 | 0,9889 | 0,9619 | 0,9591 | 0,9749 |
| 256 | 128 | relu | rmsprop | 0,9878 | 0,9877 | 0,9518 | 0,9481 | 0,9689 |
| 256 | 256 | relu | rmsprop | 0,9882 | 0,9875 | 0,9016 | 0,8959 | 0,9433 |
| 256 | 512 | relu | rmsprop | 0,9883 | 0,9879 | 0,9652 | 0,9625 | 0,9760 |

Table 2.10 – Résultats des tests pour un encodage avec étiquetage morphosyntaxique avec des cellules BiLSTM avec découpage Apprentissage : 50%, Validation : 10%, Test : 50%.

Pour les tableaux 2.9 et 2.10, nous pouvons observer que l'ajout de l'information morphosyntaxique a amélioré le taux de réussite de la prédiction d'un faible taux au profit d'une moindre puissance de calculs.

| Nombre de neurones | Unités LSTM | Activation | Apprentissage | Précision Intention | Rappel Intention | Précision Entités de domaine | Rappel Entités de domaine | F-Mesure moyenne |
|--------------------|-------------|------------|---------------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|
| 32 | 128 | relu | rmsprop | 0,9873 | 0,9869 | 0,9556 | 0,9518 | 0,9704 |
| 32 | 256 | relu | rmsprop | 0,9871 | 0,9869 | 0,9616 | 0,9589 | 0,9736 |
| 32 | 512 | relu | rmsprop | 0,9914 | 0,9913 | 0,9618 | 0,9588 | 0,9758 |
| 64 | 128 | relu | rmsprop | 0,9896 | 0,9896 | 0,9520 | 0,9477 | 0,9697 |
| 64 | 256 | relu | rmsprop | 0,9904 | 0,9904 | 0,9629 | 0,9600 | 0,9760 |
| 64 | 512 | relu | rmsprop | 0,9894 | 0,9894 | 0,9519 | 0,9479 | 0,9696 |
| 128 | 128 | relu | rmsprop | 0,9874 | 0,9874 | 0,9263 | 0,9204 | 0,9554 |
| 128 | 256 | relu | rmsprop | 0,9916 | 0,9897 | 0,9628 | 0,9600 | 0,9760 |
| 128 | 512 | relu | rmsprop | 0,9885 | 0,9883 | 0,9581 | 0,9548 | 0,9724 |
| 256 | 128 | relu | rmsprop | 0,9803 | 0,9792 | 0,9105 | 0,9014 | 0,9429 |
| 256 | 256 | relu | rmsprop | 0,9906 | 0,9906 | 0,9509 | 0,9470 | 0,9698 |
| 256 | 512 | relu | rmsprop | 0,9901 | 0,9892 | 0,9607 | 0,9576 | 0,9744 |

Table 2.11 – Résultats des tests pour un encodage sans étiquetage morphosyntaxique avec des cellules LSTM avec découpage Apprentissage : 75%, Validation : 10%, Test : 25%.

| Nombre de neurones | Unités LSTM | Activation | Apprentissage | Précision Intention | Rappel Intention | Précision Entités de domaine | Rappel Entités de domaine | F-Mesure moyenne |
|--------------------|-------------|------------|---------------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|
| 32 | 128 | relu | rmsprop | 0,9889 | 0,9887 | 0,9626 | 0,9601 | 0,9750 |
| 32 | 256 | relu | rmsprop | 0,9865 | 0,9865 | 0,9611 | 0,9571 | 0,9728 |
| 32 | 512 | relu | rmsprop | 0,9862 | 0,9846 | 0,9622 | 0,9597 | 0,9732 |
| 64 | 128 | relu | rmsprop | 0,9868 | 0,9866 | 0,9627 | 0,9598 | 0,9740 |
| 64 | 256 | relu | rmsprop | 0,9869 | 0,9856 | 0,8581 | 0,8504 | 0,9202 |
| 64 | 512 | relu | rmsprop | 0,9872 | 0,9871 | 0,9650 | 0,9626 | 0,9755 |
| 128 | 128 | relu | rmsprop | 0,9779 | 0,9779 | 0,9609 | 0,9580 | 0,9687 |
| 128 | 256 | relu | rmsprop | 0,9884 | 0,9870 | 0,9547 | 0,9516 | 0,9704 |
| 128 | 512 | relu | rmsprop | 0,9880 | 0,9879 | 0,9616 | 0,9587 | 0,9741 |
| 256 | 128 | relu | rmsprop | 0,9919 | 0,9919 | 0,9536 | 0,9502 | 0,9719 |
| 256 | 256 | relu | rmsprop | 0,9900 | 0,9900 | 0,9658 | 0,9626 | 0,9771 |
| 256 | 512 | relu | rmsprop | 0,9817 | 0,9817 | 0,9655 | 0,9630 | 0,9730 |

Table 2.12 – Résultats des tests pour un encodage sans étiquetage morphosyntaxique avec des cellules BiLSTM avec découpage Apprentissage : 75%, Validation : 10%, Test : 25%.

Les tableaux 2.11 et 2.12 démontrent que la taille des données d'apprentissage poussent vers de meilleurs résultats. Cela reste conforme à notre intuition théorique et encourage encore plus le développement d'un corpus plus volumineux pour l'obtention probable de meilleurs résultats.

Pour mieux récapituler et visualiser les différences de qualité de prédictions des différents modèles, la figure 2.5 ci dessous est proposée.

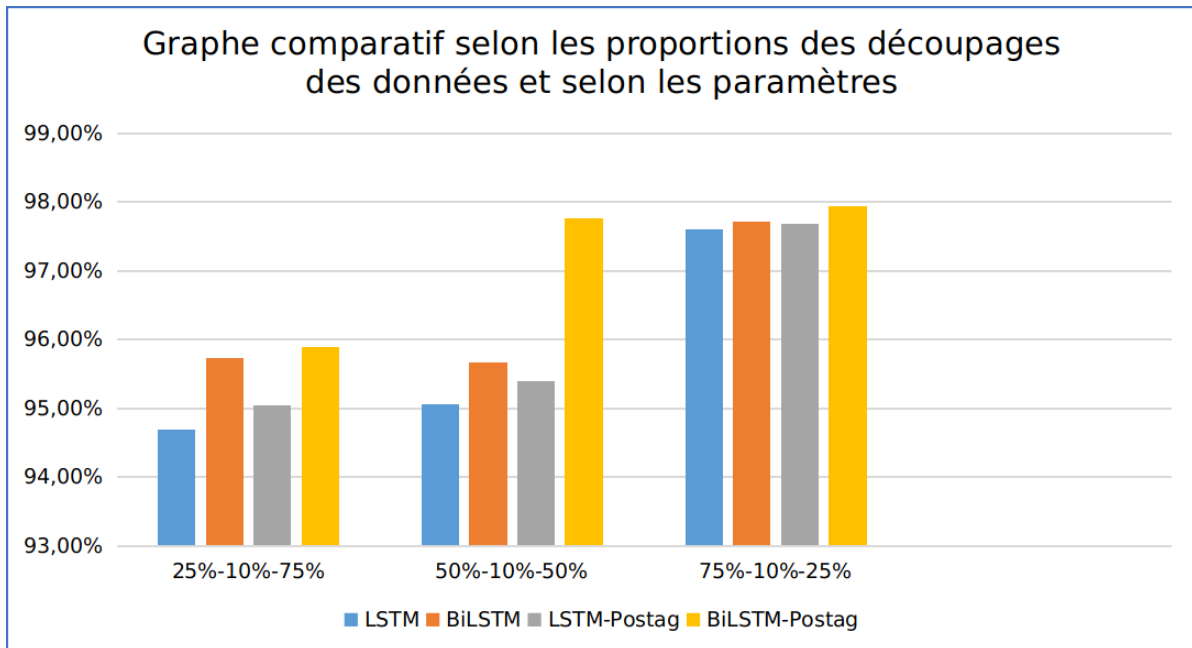


Figure 2.5 – Graphe comparatif selon les proportions des découpages des données et selon les paramètres.

Nous pouvons remarquer l’impact de trois facteurs :

- **La taille de l’ensemble d’apprentissage** : Systématiquement, le score F-Mesure moyen augmente avec la croissance du volume de données d’apprentissage. Cela laisse présager qu’avec plus de données le modèle pourrait mieux généraliser, ce qui éviterait de biaiser le modèle vers un type de données en particulier.
- **L’utilisation du contexte (LSTM contre BiLSTM)** : Le modèle BiLSTM donne de meilleur résultat lorsque l’information du contexte lui est accessible, ce qui confirme notre intuition.
- **L’utilisation de l’étiquetage morphosyntaxique** : L’ajout de l’information sur la syntaxe de la requête semble aider le modèle à construire une meilleure représentation interne de la requête. Il ne voit pas un mot seulement à un instant t , mais plutôt la paire (mot,rôle syntaxique du mot dans la phrase). Cet ajout est conforme à notre explication théorique dans la section ??

2.5 Ontologie et manipulation du graphe d’état

Les ontologies déjà présentées dans la section ?? ont été créées en utilisant Protégé. Elles ont été ensuite exportées en format Turtle¹⁸ afin de les exploiter dans la suite de ce travail en utilisant la bibliothèque RDFLib de Python.

Les nœuds et les relations du graphe ont des identifiants entiers pour faciliter leur utilisation.

18. Turtle est une syntaxe pour l’écriture des triplets d’un graphe de connaissance avec RDF

tion avec les réseaux de neurones. Une phase de transformation des URIs¹⁹ en identifiants entiers s'avère nécessaire. L'ontologie comprend 61 nœuds et 13 relations. Contrairement au nombre de relations, le nombre de concepts augmente au cours du dialogue ; de nouveaux nœuds sont introduits après chaque échange. Ceci nécessite de garder un ensemble d'identifiants non utilisés pour les associer pendant le dialogue. Le tableau suivant résume l'association des identifiants aux nœuds et relations des graphes.

| Ressource | Intervalles d'identifiants |
|---------------------------------|----------------------------|
| Nœuds de l'ontologie | [1-61] |
| Relations de l'ontologie | [1-13] |
| Nœuds créés pendant un dialogue | [62-256] |

Table 2.13 – *Tableau des identifiants*

2.6 L'agent de dialogue

Nous avons proposé dans la partie conception ?? deux architectures pour entraîner l'agent de dialogue. La première se compose de deux parties, un module pour encoder le graphe d'état et un autre pour décider l'action à prendre. Chacun est entraîné séparément. Les deux modules étant des réseaux de neurones, nous avons pensé à une deuxième architecture en les connectant pendant la phase d'apprentissage. Cette connexion permet à l'encodeur de graphe de choisir les parties du dialogue, représentées par le graphe d'état, à mémoriser afin de mieux estimer la fonction de récompense.

2.6.1 Encodeur de graphe

Dans la première méthode, l'entraînement de l'encodeur se fait avec une architecture encodeur-décodeur en passant les triplets du graphe comme entrées et sorties de cette architecture.

2.6.1.1 Implémentation

Le réseau de neurones a été implémenté en utilisant la bibliothèque Keras de Python. Nous avons utilisé des cellules GRUs (Gated Recurrent Units (Cho et al., 2014)) comme unités récurrentes pour l'encodeur et le décodeur vu leur efficacité comparable aux LSTMs tout en utilisant un seul vecteur d'état, ce qui les rend moins exigeants en mémoire. Comme notre tâche consiste à encoder un graphe dans un vecteur, la taille de ce dernier est très importante. Intuitivement, plus cette taille est grande plus le nombre de triplets qu'on peut y encoder est grand. D'où l'intérêt des cellules GRUs qui permettent d'utiliser de plus grands vecteurs d'état en moins d'espace mémoire que les LSTMs.

19. Les URIs identifient de manière unique les ressources dans le web sémantique et sont également utilisés pour identifier les concepts et les relations dans les ontologies

La génération aléatoire des graphes de taille t triplets se fait en suivant les étapes suivantes :

- choisir un nombre de nœuds nn aléatoire entre 2 et $t + 1$.
- choisir un nombre d'arcs na aléatoire entre 1 et $nn - 1$.
- tirer nn identifiants de nœuds et na identifiants d'arcs aléatoirement de l'ensemble des identifiants possibles.
- créer les triplets en tirant pour chaque triplet deux nœuds et un arc aléatoirement des ensembles résultats de l'étape précédente.

Pendant l'apprentissage, le générateur choisit une taille pour le graphe inférieure à une taille maximale et crée un graphe en suivant les étapes sus-citées. Ce dernier est passé à l'encodeur-décodeur comme entrée et sortie désirée.

2.6.1.2 Résultats et discussion

Pour estimer la capacité de l'encodeur du graphe, nous avons varié la taille maximale du graphe ainsi que le vecteur d'état du GRU. Les résultats sont présentés dans le figure suivante.

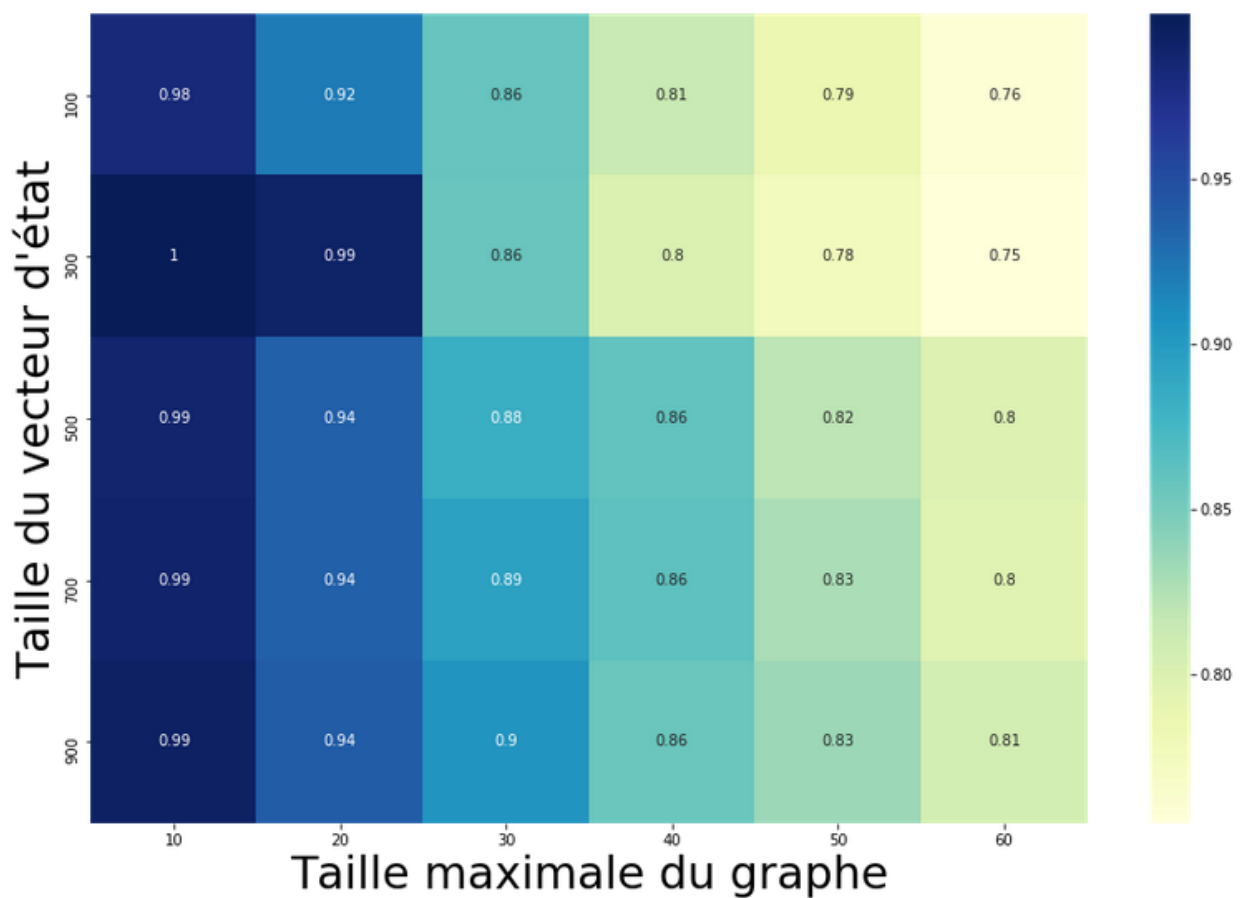


Figure 2.6 – Variation de la précision en fonction de la taille maximale du graphe et la taille du vecteur d'état

Nous remarquons évidemment que la précision diminue avec l'augmentation de la taille maximale du graphe. Cependant, l'augmentation de la taille du vecteur encodant le graphe n'améliore pas beaucoup les résultats. Ceci peut être dû à la nature combinatoire du problème. En effet, la taille du graphe augmente exponentiellement en fonction du nombre de triplets. Soit nb et t le nombre de triplets possibles et la fonction correspondant la taille du graphe avec le nombre de graphes possibles. t est définie par la fonction de récurrence suivante :

$$t(1) = nb$$

$$t(n + 1) = t(n) \times nb$$

La première équation montre que le nombre de graphes possibles est égale au nombre de triplets possibles lorsque le graphe se compose d'un seul triplet. Tandis que la deuxième vient du fait que les graphes de taille $n + 1$ peuvent être obtenus en combinant chaque graphe de taille n avec tous les triplets possibles. Le résultat des deux équations est :

$$t(n) = nb^n$$

Pour essayer de pallier à ce problème, le graphe d'état peut être divisé en plusieurs sous-graphes. De façon à ce que chaque sous-graphe soit assez petit pour être encodé par l'un des encodeurs déjà entraînés. Ainsi la concaténation de ces vecteurs peut être utilisée comme entrée pour le module suivant.

2.6.2 Apprentissage par renforcement

Nous allons à présent présenter les deux méthodes citées dans la section 2.6. La première consiste à utiliser le résultat de l'encodeur pour entraîner un réseau de neurones à estimer la récompense associée à chaque action possible. La deuxième, par contre, fait l'apprentissage des deux parties à la fois.

Nous utilisons un simulateur d'utilisateur pour communiquer avec l'agent de dialogue. Afin de simuler aussi les erreurs des modules précédents (reconnaissance automatique de la parole et compréhension du langage naturel), nous ajoutons un module qui insère du bruit dans les actions du simulateur. Sachant qu'une action utilisateur se compose de l'intention et des emplacements, ce dernier module prend donc deux valeurs de probabilités en paramètre ; la probabilité de bruiteur l'intention et celle de bruiteur les emplacements. Dans la suite de ce travail nous allons varier ces deux valeurs ainsi que la taille du vecteur d'état afin d'arriver à un compromis entre la robustesse face aux erreurs, la réussite des tâches utilisateur et l'utilisation de la mémoire.

Nous allons évaluer les différents résultats en comparant leur taux de succès qui est donné par le rapport entre le nombre de fois où l'agent arrive au but sur le nombre total d'essais.

Un succès nécessite d'arriver au but dans un nombre d'échanges limite que nous avons estimé comme suit :

$$limite = nb_{diff} \times 4 \times (1 + (pb_i + pb_e) \times 2)$$

- $limite$: le nombre d'échanges maximal.
- nb_{diff} : le nombre de fichiers dans l'arborescence de départ en plus ou en moins par rapport à l'arborescence but.
- pb_i : la probabilité d'erreurs dans l'intention de l'utilisateur.
- pb_e : la probabilité d'erreurs dans les emplacements de l'action.

La première partie de l'équation, $nb_{diff} \times 4$, détermine une approximation du nombre d'actions nécessaire afin d'arriver au but; nous avons estimé qu'il faut un maximum de 4 échanges pour ajouter ou supprimer un fichier. La deuxième partie permet de prendre en compte les erreurs du simulateur. Sachant que le nombre moyen d'actions erronées en n échanges est égal à $n \times (pb_i + pb_e)$, nous avons donc ajouté deux fois ce nombre. Ceci permet en premier lieu de ne pas compter les actions erronées dans la limite des échanges possibles, ainsi que d'ajouter des actions afin que l'agent puisse se retrouver dans la conversation après une erreur du simulateur.

2.6.2.1 Apprentissage avec DQN déconnecté

Dans cette partie, nous utilisons un des encodeurs déjà entraînés dans la partie précédente. Nous avons donc choisi d'utiliser l'encodeur de taille 300 qui a été entraîné avec des graphes de taille maximale de 20. Nous avons varié le nombre de vecteurs utilisés ainsi que les probabilités d'erreurs du simulateur. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.14.

| Nombre de vecteurs | probabilité pb_i | probabilité pb_e | taux de réussite maximal |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| 4 | 0.25 | 0.3 | 0.25 |
| 4 | 0.05 | 0.2 | 0.59 |
| 4 | 0.01 | 0.1 | 0.69 |
| 4 | 0 | 0 | 0.61 |
| 5 | 0.25 | 0.3 | 0.27 |
| 5 | 0.05 | 0.2 | 0.55 |
| 5 | 0.01 | 0.1 | 0.61 |
| 5 | 0 | 0 | 0.72 |
| 6 | 0.25 | 0.3 | 0.28 |
| 6 | 0.05 | 0.2 | 0.63 |
| 6 | 0.01 | 0.1 | 0.69 |
| 6 | 0 | 0 | 0.7 |

Table 2.14 – Taux de réussite en fonction des probabilités d'erreurs et du nombre de vecteurs d'état. Avec les probabilités pb_i et pb_e : les probabilités d'erreurs sur l'intention et les emplacements respectivement.

Le tableau 2.14 nous permet de conclure ce qui suit :

- Évidemment, avec moins de probabilités d'erreurs, le réseau arrive à mieux reconnaître les motifs dans le vecteur d'état et leurs relations avec les récompenses du simulateur. Cependant, l'augmentation de la taille du vecteur n'améliore que légèrement les résultats ; en calculons la moyenne des taux de réussite pour chaque nombre de vecteurs, les résultats sont comme suit : 53.5% de taux de réussite pour quatre vecteurs, 53.75% pour cinq vecteurs et 57.5% pour six vecteurs.
- Le meilleur résultat a été obtenu en utilisant quatre vecteurs et sans erreurs avec un taux de réussite de 72%. En pratique, ce modèle ne s'adapte pas aux erreurs des modules précédents. Par conséquent, il se perd lorsqu'une erreur se produit et il n'arrive pas à se resituer dans la conversation.
- Avec des probabilités d'erreurs très élevées, le réseau n'arrive pas à apprendre et ne dépasse pas 28% de taux de réussite.
- Les résultats les plus prometteurs dans ce cas sont celles qui sont entraînées avec des probabilités d'erreurs proches de la réalité avec des taux de réussite acceptables. Dans ce cas, nous avons obtenu un taux de réussite de 69% avec des probabilités d'erreurs de 1% et 10% sur les intentions et les emplacements respectivement.

2.6.2.2 Apprentissage avec DQN connecté

Connecter le DQN avec l'encodeur devrait permettre de réduire la taille du vecteur d'état nécessaire. Comme pour la partie précédente, nous avons varié la taille du vecteur d'état ainsi que les probabilités des erreurs pour pouvoir par la suite comparer les deux approches proposées.

| Taille du vecteur d'état | probabilité pb_i | probabilité pb_e | taux de réussite maximal |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| 50 | 0.25 | 0.3 | 0.69 |
| 50 | 0.05 | 0.2 | 0.77 |
| 50 | 0.01 | 0.1 | 0.80 |
| 50 | 0 | 0 | 0.87 |
| 100 | 0.25 | 0.3 | 0.59 |
| 100 | 0.05 | 0.2 | 0.81 |
| 100 | 0.01 | 0.1 | 0.84 |
| 100 | 0 | 0 | 0.89 |
| 150 | 0.25 | 0.3 | 0.58 |
| 150 | 0.05 | 0.2 | 0.82 |
| 150 | 0.01 | 0.1 | 0.80 |
| 150 | 0 | 0 | 0.93 |
| 200 | 0.25 | 0.3 | 0.59 |
| 200 | 0.05 | 0.2 | 0.82 |
| 200 | 0.01 | 0.1 | 0.85 |
| 200 | 0 | 0 | 0.86 |

Table 2.15 – Taux de réussite en fonction des probabilités d'erreurs et de la taille du vecteur d'état. Avec les probabilités pb_i et pb_e : les probabilités d'erreurs sur l'intention et les emplacements respectivement.

- Comme pour la méthode précédente, l'augmentation des probabilités d'erreurs diminue le taux de réussite en général.
- Le meilleur taux de réussite est toujours obtenu en faisant un apprentissage sans erreurs ce qui a donné 93% de réussite.
- Pour des probabilités d'erreurs élevées, le taux de réussite diminue considérablement par rapport aux autres valeurs de probabilités.
- Le réseau arrive à reconnaître les motifs encodés aussi bien pour de petites tailles du vecteur d'état que pour de grandes tailles. Cette méthode permet effectivement de réduire la taille du vecteur encodant le graphe d'état par rapport à son prédécesseur.

2.6.2.3 Comparaison des approches et discussion

En comparant les deux méthodes, apprentissage avec DQN déconnecté et apprentissage avec DQN connecté, il est évident que la deuxième méthode est beaucoup plus efficace. Dans cette partie nous allons donner de potentielle explications aux résultats trouvés en analysant les forces et faiblesses de chaque méthode. Nous allons analyser les méthodes par rapport à trois aspects : le taux de réussite, la vitesse d'apprentissage et la courbe d'apprentissage.

2.6.2.4 Taux de réussite

Il est clair que connecter l'encodeur avec le réseau DQN a donné de meilleurs résultats. Ceci peut être dû aux facteurs suivants :

- La difficulté de comprendre les motifs encodés séparément : En effet, la deuxième méthode permet au réseau de neurones d'apprendre à générer des motifs qui correspondent aux poids du réseau DQN.
- Deux états de dialogue lointains peuvent être encodés dans des vecteurs très proches en utilisant un encodeur séparé. Par exemple, il se peut que deux graphes soient similaires sauf pour un nœud d'action qui est dans un graphe de type **Create_node** et dans l'autre graphe **Delete_node**. Dans ce cas, si l'encodeur les encode dans des vecteurs proches, le DQN aura des difficultés à distinguer les deux états. Par contre, en connectant l'encodeur avec le DQN, il peut observer les récompenses pour avoir l'information que certains nœuds sont plus importants que d'autres, les nœuds d'action par exemple, et qu'ils peuvent changer complètement l'état du vecteur.
- Les erreurs provenant de l'encodeur : Bien que la précision de l'encodeur obtenue était de 99%, en empilant 6 vecteurs encodés avec le même taux d'erreurs pour chacun et sachant que la probabilité d'erreur dans un vecteur est indépendante des autres, cette précision diminue à 96%.

2.6.2.5 Vitesse d'apprentissage

Nous avons comparé les vitesses d'apprentissage des deux approches. En utilisant le réseau DQN séparé, ce dernier apprend avec une moyenne de **1013.15 instances/seconde**.

De l'autre côté, le réseau connecté ne fait que **197.61 instances/seconde**. La raison derrière la lenteur de la deuxième approche revient à la nécessité de refaire l'encodage de tout le graphe d'état de l'instance sauvegardée pendant les échanges avec le simulateur. Tandis que dans la deuxième approche, on ne sauvegarde que le vecteur déjà encodé.

Les temps des échanges avec le simulateur des deux approches sont proches puisqu'ils se comportent de la même manière dans ce cas. Les deux méthodes n'encodent que les nouveaux triplets arrivant dans le vecteur d'état précédent.

2.6.2.6 Courbe d'apprentissage

Enfin, nous comparons à présent les courbes d'apprentissage des deux méthodes. Celles-ci montrent le taux de réussite par rapport au nombre d'épisodes²⁰. La figure 2.7 contient quatre courbes : deux courbes pour chaque méthode, avec et sans erreurs.

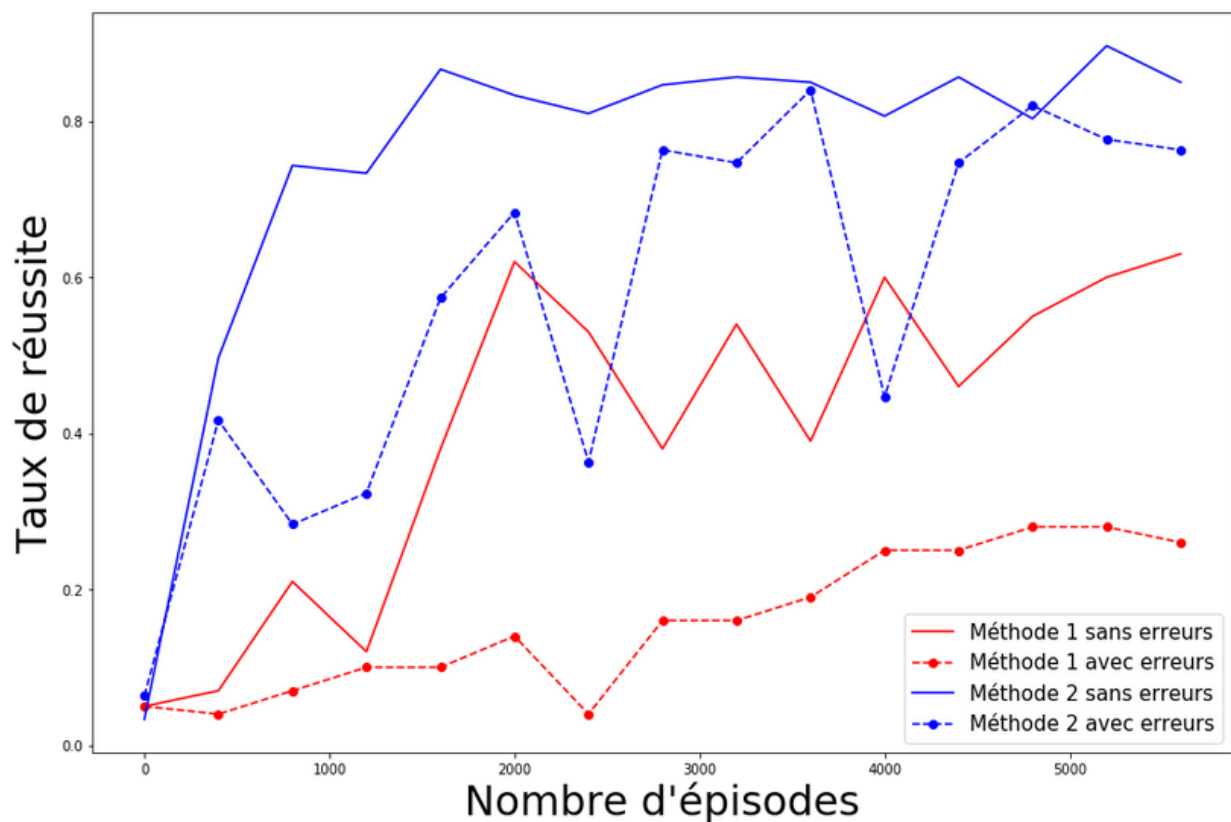


Figure 2.7 – Les courbes d'apprentissage des deux méthodes proposées avec et sans erreurs du simulateur d'utilisateur

Nous remarquons que la deuxième méthode arrive beaucoup plus rapidement à comprendre la fonction de récompense. Il s'avère donc que déconnecter le DQN de l'encodeur rend effectivement la tâche de trouver la relation entre les motifs des vecteurs d'états et les récompenses plus difficile.

20. Un épisode est un ensemble d'échanges agent-simulateur qui aboutit à un succès ou un échec

L'apprentissage peut être amélioré dans les deux cas, et surtout en ce qui concerne le premier, en utilisant un meilleur encodage des nœuds et des arcs du graphe. En effet, les nœuds sont actuellement encodés avec des identifiants entiers seulement, perdant ainsi les riches connaissances sémantiques qu'on peut extraire des relations du graphe. Un meilleur encodage serait d'utiliser des méthodes d'apprentissage semi-supervisé qui permettraient de donner aux nœuds proches un encodage similaire. Cette méthode permet d'éviter quelques problèmes que nous avons cités dans 2.6.2.4, entre autres le problème d'encoder deux états lointains dans des vecteurs proches.

2.7 Application Speech2Act

L'application Speech2Act relie les modules que nous avons implémentés dans un assistant qui aide à manipuler les fichiers de l'ordinateur avec la voix. Le schéma 2.8 montre les différentes parties que comporte l'application et les communications entre elles.

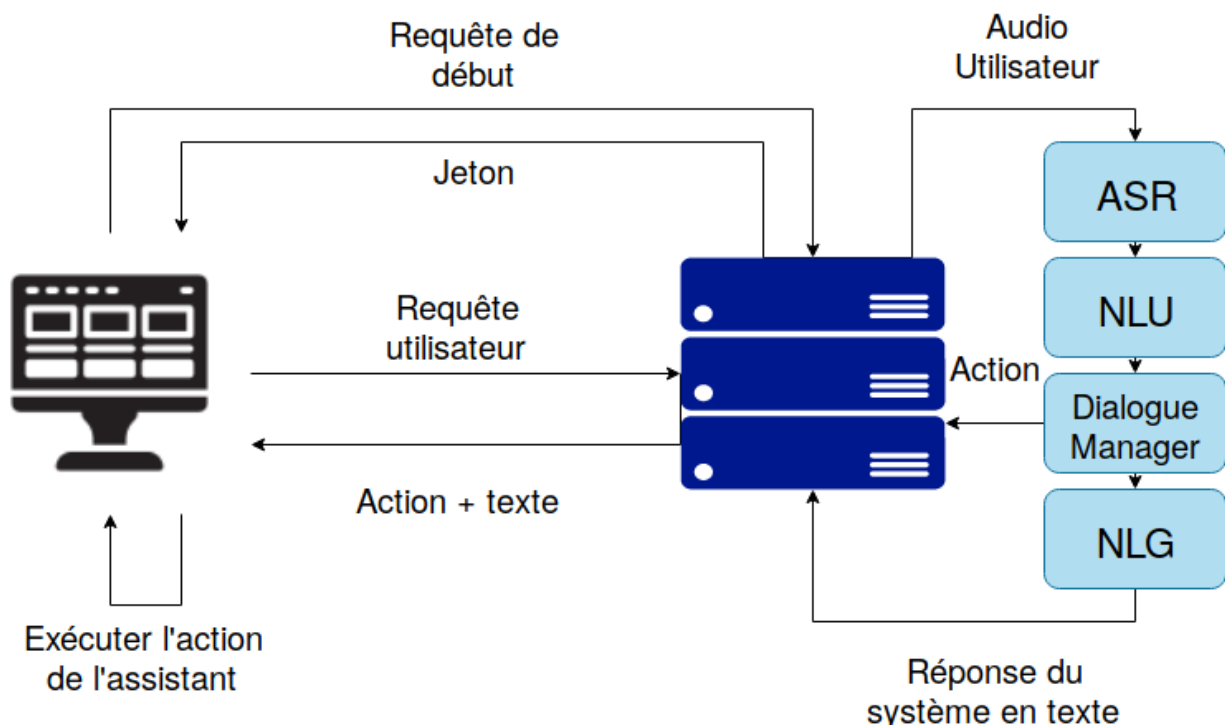


Figure 2.8 – Schéma général de l'application Speech2Act

L'application contient principalement deux parties : une partie frontend, avec laquelle l'utilisateur interagit, et une partie backend qui contient tous les modules que nous avons traités au cours de ce travail. Cette dernière partie se trouve dans un serveur qui répond aux requêtes de l'utilisateur. Les requêtes de l'utilisateur contiennent les données audio collectées par l'interface ainsi que les données du système sur lesquelles l'assistant peut agir. Quant à la réponse du backend, elle est sous forme d'une action qui peut être exécutée par le côté client de l'application. Nous n'avons cependant pas encore traité les cas de permissions et les limites de ce que peut manipuler l'assistant. Néanmoins, nous avons limité

l'espace des actions de l'assistant pour qu'il ne puisse agir que sur une arborescence de fichier test.

2.7.1 Backend

Pour implémenter le backend, nous avons utilisé le micro-framework Flask qui permet d'écrire en Python le côté serveur d'une application. Les communications client-serveur de notre application se font comme suit :

- Au lancement de l'application du côté client, celle-ci envoie une requête de début contenant l'état du système, dans notre cas une arborescence de fichiers.
- Le backend lui répond avec un token (jeton) qui sera l'identifiant de cet utilisateur.
- Lorsque l'utilisateur parle à l'assistant, une requête est envoyée contenant son enregistrement audio. Alternativement, l'utilisateur peut introduire directement du texte qui sera envoyé dans la requête.
- Le backend reçoit le contenu de la requête. S'il s'agit d'un enregistrement audio, il le fait passer par le module de reconnaissance de la parole pour le convertir en texte.
- Le texte passe ensuite par le module de compréhension du langage qui est directement connecté avec le gestionnaire de dialogue. Ce dernier reçoit l'action résultat du module précédent et décide quelle action prendre selon l'état du système de l'utilisateur en question.
- L'action de l'assistant est transformée en langage naturel avant qu'elle ne soit envoyée à l'utilisateur.
- Le côté client de l'application reçoit le texte et l'action de l'assistant. Il exécute l'action et affiche le texte à l'utilisateur.

2.7.2 Frontend

Pour la réalisation de l'interface de l'application, nous avons opté pour une interface basée web (facilement exportable vers Desktop). Pour cela nous avons utilisé le framework VueJS augmenté par le plugin Vuetify. le résultat est une interface épurée et qui se veut simple et légère. L'utilisation d'un framework basé web permet de facilement créer des boucles d'événements dont l'état interne est géré entièrement par le navigateur et le moteur VueJS.

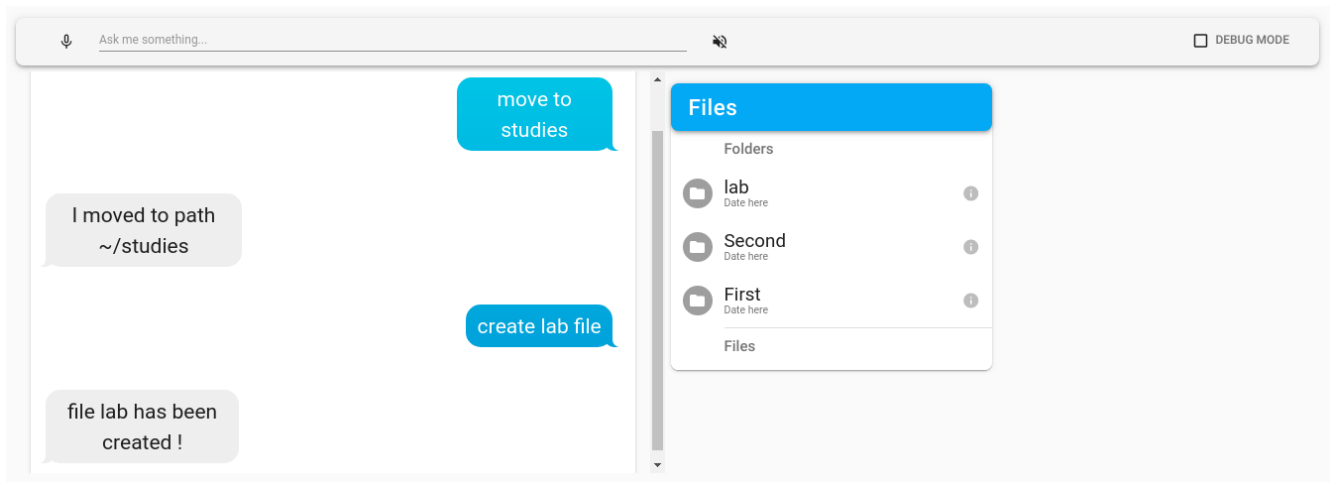


Figure 2.9 – Interface principale de Speech2Act

L'application se compose de quatre parties disposées sur une seule page web dynamiquement mise à jour au fur et à mesure du dialogue :

- **Champ de saisie** : C'est une petite surface qui permet à l'utilisateur de communiquer avec le système. Il lui est possible bien entendu d'utiliser du texte ou bien de cliquer sur le bouton Microphone à gauche pour lancer des commandes vocales. Pour l'instant, c'est à l'utilisateur d'arrêter l'enregistrement de la commande ou bien d'attendre une période limite fixée à 7 secondes. Le bouton de volume permet d'activer ou non la réponse vocale du système (extensions de synthèse vocale). Le bouton tout à droite est réservé au mode Développeur pour analyser l'interaction entre le système et l'utilisateur.
- **Arborescence virtuelle** : C'est une petite fenêtre pour faciliter à l'utilisateur la mémorisation de l'environnement d'interaction. Cette fenêtre est dynamiquement mise à jour à travers le déroulement du dialogue et la manipulation des fichiers/répertoires.

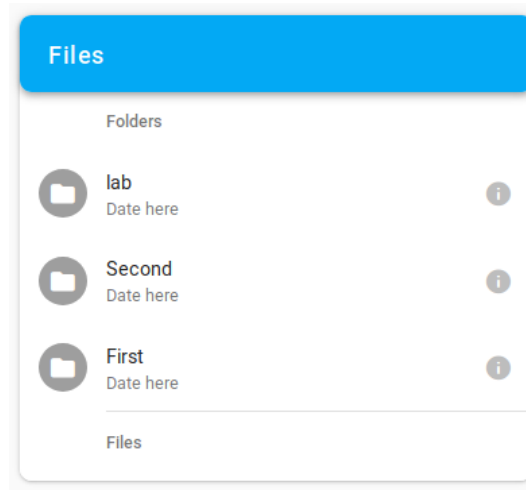


Figure 2.10 – Fenêtre d'affichage de l'arborescence virtuelle

- **Champ de dialogue** : C'est là que vont résider toutes les informations sur le dialogue tout au long du cycle de vie de l'application. Il est mis à jour à chaque échange avec

les messages échangés par l'utilisateur et l'assistant Speech2Act. Il permet ainsi de garder trace de tous les échanges effectués et pouvoir à tout moment vérifier ou réutiliser des messages.

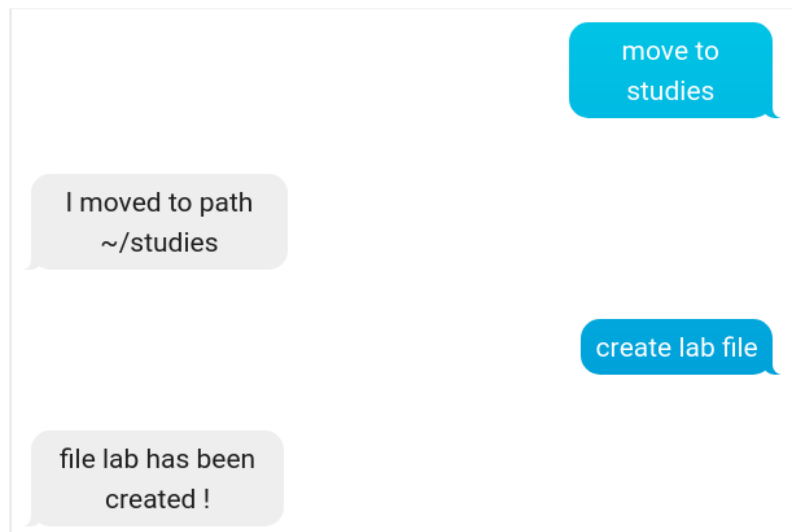


Figure 2.11 – Fenêtre de dialogue avec l'assistant

- **Fenêtre de Débogage** : C'est une option réservée aux développeurs pour faciliter les tests durant le développement. Toute réponse du serveur peut y être affichée pour peu qu'elle soit au format JSON sous la forme d'une réponse à une requête RESTFul. Pour le moment il y est affiché l'intention de l'utilisateur avec son degré de confiance généré par Speech2Act, ainsi que les arguments de la requête (nom, type, positions ...).



Figure 2.12 – Fenêtre de Débogage

2.8 Conclusion

Au terme de ce chapitre nous avons pu apprécier les fruits d'un long travail de conception. L'implémentation de certaines fonctionnalités a permis de mieux apprécier la complexité de la tâche qu'est le développement de Speech2Act. Chaque module a été soumis à une série de tests pour déterminer ses forces, faiblesses et limites. Une rapide analyse stipulant que pour un manque de données flagrant et un manque de ressources frustrant, Speech2Act a pu effectuer des petites tâches rudimentaires de manipulation du bureau sur un ordinateur et délivrer une mini-expérience de ce que peut être un véritable assistant virtuel intelligent.

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Schéma abstraitif d'un SPA (Milhorat et al., 2014) | 2 |
| 1.2 | Architecture basique d'un réseau de neurones multicouches | 5 |
| 1.3 | Architecture interne d'un réseau de neurones récurrent à un instant t (Olah, 2015) | 6 |
| 1.4 | Architecture interne d'une cellule mémoire dans un réseau LSTM (Olah, 2015) | 7 |
| 1.5 | Exemple d'une distribution de probabilités de transitions ainsi qu'une distribution de probabilités d'observations pour un HMM à 3 états et 2 observations | 9 |
| 1.6 | Architecture d'un système de reconnaissance de la parole (Yu and Deng, 2015) | 10 |
| 1.7 | Architecture de base d'un classificateur d'intentions (intents) (Liu and Lane, 2016) | 13 |
| 1.8 | Architecture de base d'un classificateur d'intentions doublé d'un extracteur d'entités (Goo et al., 2018) | 14 |
| 1.9 | Exemple d'une trame sémantique pour une requête donnée | 14 |
| 1.10 | Schéma général d'un gestionnaire de dialogue | 15 |
| 1.11 | Schéma représentant les transitions entre états dans un MDP | 16 |
| 1.12 | Schéma représentant une trame sémantique avec comme domaine : création de fichier | 16 |
| 1.13 | Schéma représentant la mise-à-jour de l'état du gestionnaire de dialogue par un système basé règles | 17 |
| 1.14 | Schéma représentant la mise-à-jour de l'état du gestionnaire de dialogue par un système basé statistiques | 17 |
| 1.15 | Diagramme d'influence dans un POMDP | 18 |
| 1.16 | Schéma de gestion de dialogue de bout en bout avec architecture Seq2Seq | 19 |
| 1.17 | Schéma d'interaction agent-environnement dans l'apprentissage par renforcement | 20 |
| 1.18 | Un exemple d'entrée de SURGE (Elhadad and Robin, 1996) | 24 |
| 1.19 | Schéma d'une architecture encodeur-décodeur pour NLG | 25 |
| 2.1 | Caractéristiques des machines | 27 |
| 2.2 | Bibliothèques et librairies les plus utilisées dans ce projet. | 28 |
| 2.3 | Graphe récapitulatif des résultats pour le a reconnaissance automatique de la parole | 33 |
| 2.4 | Schéma de découpage des données pour l'apprentissage du modèle de compréhension du langage naturel | 34 |
| 2.5 | Graphe comparatif selon les proportions des découpages des données et selon les paramètres. | 44 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.6 | Variation de la précision en fonction de la taille maximale du graphe et la taille du vecteur d'état | 46 |
| 2.7 | Les courbes d'apprentissage des deux méthodes proposées avec et sans erreurs du simulateur d'utilisateur | 51 |
| 2.8 | Schéma général de l'application Speech2Act | 52 |
| 2.9 | Interface principale de Speech2Act | 54 |
| 2.10 | Fenêtre d'affichage de l'arborescence virtuelle | 54 |
| 2.11 | Fenêtre de dialogue avec l'assistant | 55 |
| 2.12 | Fenêtre de Débogage | 55 |

Bibliographie

- Al-Anzi, F. and AbuZeina, D. (2018). Literature survey of arabic speech recognition. pages 1–6.
- Angeli, G., Manning, C. D., and Jurafsky, D. (2012). Parsing time : Learning to interpret time expressions. In *Proceedings of the 2012 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics : Human Language Technologies, NAACL HLT '12*, Stroudsburg, PA, USA. Association for Computational Linguistics.
- Åström, K. J. (1965). Optimal control of Markov Processes with incomplete state information. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 10:174–205.
- Barlow, H. (1989). Unsupervised learning. *Neural Computation*, 1(3):295–311.
- Bateman, J. A. (1997). Enabling technology for multilingual natural language generation : The kpml development environment. *Nat. Lang. Eng.*, 3(1).
- Bellman, R. (1957). A markovian decision process. *Indiana Univ. Math. J.*, 6:679–684.
- Belz, A. (2008). Automatic generation of weather forecast texts using comprehensive probabilistic generation-space models. *Nat. Lang. Eng.*, 14(4).
- Bertsekas, D. (2012). *Dynamic Programming & Optimal Control, Vol II : Approximate Dynamic Programming*. Athena Scientific.
- Bloit, J. and Rodet, X. (2008). Short-time viterbi for online hmm decoding : Evaluation on a real-time phone recognition task. pages 2121 – 2124.
- Chandramohan, S., Geist, M., Lefèvre, F., and Pietquin, O. (2011). User simulation in dialogue systems using inverse reinforcement learning. In *INTERSPEECH*, page 10251028.
- Chauhan, P. M. and Desai, N. P. (2014). Mel frequency cepstral coefficients (mfcc) based speaker identification in noisy environment using wiener filter. In *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, pages 1–5.
- Chen, H., Liu, X., Yin, D., and Tang, J. (2017). A survey on dialogue systems : Recent advances and new frontiers. *SIGKDD Explor. Newsl.*, 19(2):25–35.
- Cho, K., van Merriënboer, B., Gulcehre, C., Bahdanau, D., Bougares, F., Schwenk, H., and Bengio, Y. (2014). Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation. In *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, pages 1724–1734, Doha, Qatar. Association for Computational Linguistics.

- Chorowski, J., Bahdanau, D., Serdyuk, D., Cho, K., and Bengio, Y. (2015). Attention-based models for speech recognition. *CoRR*, abs/1506.07503.
- Cuayáhuítl, H., Renals, S., Lemon, O., and Shimodaira, H. (2005). Human-computer dialogue simulation using hidden markov models. *IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding, 2005.*, pages 290–295.
- Deng, I., Hinton, G., and Kingsbury, B. (2013). New types of deep neural network learning for speech recognition and related applications : An overview. pages 8599–8603.
- Dethlefs, N. (2014). Context-sensitive natural language generation : From knowledge-driven to data-driven techniques. *Language and Linguistics Compass*, 8.
- Elhadad, M. and Robin, J. (1996). An overview of surge : a reusable comprehensive syntactic realization component. In *International Natural Language Generation Workshop*.
- Espinosa, D., White, M., and Mehay, D. (2008). Hypertagging : Supertagging for surface realization with ccg. In *ACL*.
- Evans, R., Piwek, P., and Cahill, L. (2002). What is nlg? In *Proceedings of the Second International Conference on Natural Language Generation*.
- Ferreira, T. C., Calixto, I., Wubben, S., and Krahmer, E. (2017). Linguistic realisation as machine translation : Comparing different mt models for amr-to-text generation. In *INLG*.
- Forney, G. D. (1973). The viterbi algorithm. *Proceedings of the IEEE*, 61(3):268–278.
- Gatt, A. and Krahmer, E. (2018). Survey of the state of the art in natural language generation : Core tasks, applications and evaluation. *J. Artif. Int. Res.*, 61(1).
- Georgila, K., Henderson, J., and Lemon, O. (2005). Learning user simulations for information state update dialogue systems. In *INTERSPEECH*, pages 893–896.
- Ghahramani, Z. (2002). Hidden markov models. chapter An Introduction to Hidden Markov Models and Bayesian Networks, pages 9–42. World Scientific Publishing Co., Inc., River Edge, NJ, USA.
- Ghai, W. and Singh, N. (2012). Literature review on automatic speech recognition. *International Journal of Computer Applications*, 41(8):42–50. Full text available.
- Glass, R. and Kyle Mccandless, M. (1994). Automatic acquisition of language models for speech recognition.
- Goddeau, D., Meng, H., Polifroni, J., Seneff, S., and Busayapongchai, S. (1996). A form-based dialogue manager for spoken language applications. volume 2, pages 701 – 704.
- Goo, C.-W., Gao, G., Hsu, Y.-K., Huo, C.-L., Chen, T.-C., Hsu, K.-W., and Chen, Y.-N. (2018). Slot-gated modeling for joint slot filling and intent prediction. In *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics : Human Language Technologies, Volume 2 (Short Papers)*, New Orleans, Louisiana. Association for Computational Linguistics.
- Goyal, R., Dymetman, M., and Gaussier, E. (2016). Natural language generation through character-based rnns with finite-state prior knowledge. In *COLING*, pages 1083–1092.

- Graves, A., Mohamed, A., and Hinton, G. (2013). Speech recognition with deep recurrent neural networks. In *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pages 6645–6649.
- Halliday, M. A. K. and Matthiessen, C. M. I. M. (2004). *Introduction to Functional Grammar*. Hodder Arnold, London, 3 edition.
- Hannun, A. Y., Case, C., Casper, J., Catanzaro, B., Diamos, G., Elsen, E., Prenger, R., Sathesh, S., Sengupta, S., Coates, A., and Ng, A. Y. (2014). Deep speech : Scaling up end-to-end speech recognition. *CoRR*, abs/1412.5567.
- Henderson, J., Lemon, O., and Georgila, K. (2008). Hybrid reinforcement/supervised learning of dialogue policies from fixed data sets. *Comput. Linguist.*, 34(4):487–511.
- Henderson, M., Thomson, B., and Young, S. J. (2013). Deep neural network approach for the dialog state tracking challenge. In *SIGDIAL Conference*, pages 467–471.
- Hochreiter, S. (1998). The vanishing gradient problem during learning recurrent neural nets and problem solutions. *Int. J. Uncertain. Fuzziness Knowl.-Based Syst.*, 6(2):107–116.
- Hochreiter, S. and Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Comput.*, 9(8):1735–1780.
- Jurafsky, D. and Martin, J. H. (2008). *Speech and Language Processing, 2nd Edition*. Prentice Hall.
- Kemeny, J. G. and Laurie Snell, J. (1957). Markov processes in learning theory. *Psychometrika*, 22(3):221–230.
- Kotsiantis, S., Zaharakis, I., and Pintelas, P. (2006). Machine learning : A review of classification and combining techniques. *Artificial Intelligence Review*, 26:159–190.
- Labbé, C. and Portet, F. (2012). Towards an abstractive opinion summarisation of multiple reviews in the tourism domain. *CEUR Workshop Proceedings*, 917.
- Langkilde-Geary, I. (2000). Forest-based statistical sentence generation. In *ANLP*.
- LeCun, Y., Bengio, Y., and Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521:436–44.
- Lee, C., Jung, S., Kim, K., Lee, D., and Lee, G. G. (2010). Recent approaches to dialog management for spoken dialog systems. *JCSE*, 4:1–22.
- Lipton, Z. C. (2015). A critical review of recurrent neural networks for sequence learning. *CoRR*, abs/1506.00019.
- Liu, B. and Lane, I. (2016). Attention-based recurrent neural network models for joint intent detection and slot filling. *CoRR*, abs/1609.01454.
- Liu, P., Qiu, X., and Huang, X. (2016). Recurrent neural network for text classification with multi-task learning. *CoRR*, abs/1605.05101.
- M Mitchell, T. (2006). The discipline of machine learning.

- Mann, W. C. and Matthiessen, C. M. I. M. (1983). Nigel : A systemic grammar for text generation.
- Milhorat, P., Schlögl, S., Chollet, G., , B., Esposito, A., and Pelosi, G. (2014). Building the next generation of personal digital assistants.
- Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., Graves, A., Riedmiller, M. A., Fidjeland, A., Ostrovski, G., Petersen, S., Beattie, C., Sadik, A., Antonoglou, I., King, H., Kumaran, D., Wierstra, D., Legg, S., and Hassabis, D. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518.
- Murtagh, F. (1991). Multilayer perceptrons for classification and regression. *Neurocomputing*, 2(5-6):183–197.
- Narang, S. and Gupta, M. D. (2015). Speech feature extraction techniques : A review.
- Olah, C. (2015). Understanding lstm networks – colah’s blog. <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>. (Accessed on 02/19/2019).
- O’Shaughnessy, D. D. (1988). Linear predictive coding. *IEEE Potentials*, 7:29–32.
- Rabiner, R. and Juang, B. H. (1986). An introduction to hidden markov models. *IEEE ASSP Magazine*, 3:4–16.
- Rahali, H., Hajaiej, Z., and Ellouze, N. (2014). Robust features for speech recognition using temporal filtering technique in the presence of impulsive noise. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 6:17–24.
- Reiter, E. and Dale, R. (1997). Building applied natural language generation systems. *Natural Language Engineering*, 3(1).
- Roark, B., Saraclar, M., and Collins, M. (2007). Discriminative n-gram language modeling. *Comput. Speech Lang.*, 21(2).
- Schatzmann, J., Thomson, B., Weilhammer, K., Ye, H., and Young, S. J. (2007). Agenda-based user simulation for bootstrapping a pomdp dialogue system. In *HLT-NAACL*.
- Schuster, M. and Paliwal, K. (1997). Bidirectional recurrent neural networks. *Trans. Sig. Proc.*, 45(11).
- Serban, I. V., Sordoni, A., Bengio, Y., Courville, A., and Pineau, J. (2016). Building end-to-end dialogue systems using generative hierarchical neural network models. In *Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI*, pages 3776–3783. AAAI Press.
- Sonali, B. (2014). Research paper on basic of artificial neural network. page 1.
- Sordoni, A., Galley, M., Auli, M., Brockett, C., Ji, Y., Mitchell, M., Nie, J.-Y., Gao, J., and Dolan, W. B. (2015). A neural network approach to context-sensitive generation of conversational responses. In *HLT-NAACL*, pages 196–205.
- Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., and Wojna, Z. (2015). Rethinking the inception architecture for computer vision. *CoRR*, abs/1512.00567.

- Theune, M., Klabbers, E., De Pijper, J. R., Krahmer, E., and Odijk, J. (2001). From data to speech : A general approach. *Natural Language Engineering*, 7(1).
- Velay, M. and Daniel, F. (2018). Seq2seq and multi-task learning for joint intent and content extraction for domain specific interpreters. *CoRR*, abs/1808.00423:3–4.
- Wang, Y., Shen, Y., and Jin, H. (2018). A bi-model based rnn semantic frame parsing model for intent detection and slot filling. In *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics : Human Language Technologies, Volume 2 (Short Papers)*, New Orleans, Louisiana. Association for Computational Linguistics.
- Weisz, G., Budzianowski, P., hao Su, P., and Gax0161ix0107, M. (2018). Sample efficient deep reinforcement learning for dialogue systems with large action spaces. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 26:2083–2097.
- Wen, T.-H., Gasic, M., Mrksic, N., hao Su, P., Vandyke, D., and Young, S. J. (2015). Semantically conditioned lstm-based natural language generation for spoken dialogue systems. In *EMNLP*.
- Wen, T.-H., Gasic, M., Mrksic, N., Rojas-Barahona, L. M., hao Su, P., Ultes, S., Vandyke, D., and Young, S. J. (2017). A network-based end-to-end trainable task-oriented dialogue system. In *EACL*, pages 438–449.
- Williams, J. D. and Young, S. (2007). Scaling pomdps for spoken dialog management. *Trans. Audio, Speech and Lang. Proc.*, 15(7):2116–2129.
- Young, S., Gašić, M., Keizer, S., Mairesse, F., Schatzmann, J., Thomson, B., and Yu, K. (2010). The hidden information state model : A practical framework for pomdp-based spoken dialogue management. *Comput. Speech Lang.*, 24(2):150–174.
- Yu, D. and Deng, L. (2015). *Automatic Speech Recognition*. Springer London.
- Yu, J., Reiter, E., Hunter, J., and Mellish, C. (2007). Choosing the content of textual summaries of large time-series data sets. *Natural Language Engineering*, 13(1).