

Mémoire de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Informatique  
Option : Systèmes Informatiques

---

Création d'un corpus de l'aphasie de Broca et  
développement d'un système Speech-to-speech de  
réhabilitation de la parole

---

Réalisé par :  
BELGOUMRI Mohammed  
Djameleddine  
[im\\_belgoumri@esi.dz](mailto:im_belgoumri@esi.dz)

Encadré par :  
Pr. SMAILI Kamel  
[smaili@loria.fr](mailto:smaili@loria.fr)  
Dr. LANGLOIS David  
[david.langlois@loria.fr](mailto:david.langlois@loria.fr)  
Dr. ZAKARIA Chahnez  
[c\\_zakaria@esi.dz](mailto:c_zakaria@esi.dz)

# Table des matières

<b>Page de garde</b>	<b>1</b>
<b>Table des matières</b>	<b>1</b>
<b>Table des figures</b>	<b>2</b>
<b>Sigles et abréviations</b>	<b>3</b>
<b>1 Apprentissage séquence-à-séquence</b>	<b>4</b>
1.1 Énoncé du problème . . . . .	4
1.2 Réseaux de neurones feed-forward . . . . .	5
1.2.1 Généralités . . . . .	5
1.2.2 Application à la modélisation de séquence . . . . .	6
1.2.3 Avantages et inconvénients . . . . .	7
1.3 Réseaux de neurones récurrents . . . . .	7
<b>Bibliographie</b>	<b>8</b>

# Table des figures

1.1	Architecture sous-jacente d'un FFN de profondeur 3. . . . .	5
-----	---	---

# Sigles et abréviations

FFN	réseau de neurones feed-forward
ML	apprentissage automatique
MT	traduction automatique
NLP	traitement automatique du langage
RNN	réseau de neurones récurrent
S2S	séquence-à-séquence

# Chapitre 1

## Apprentissage séquence-à-séquence

Les modèles séquence-à-séquence (S2S) sont une famille d’algorithmes d’apprentissage automatique (ML, de l’anglais: machine learning) dont l’entrée et la sortie sont des séquences (MARTINS, 2018). Plusieurs tâches d’ML, notamment en traitement automatique du langage (NLP, de l’anglais, natural language processing), peuvent être formulées comme tâches d’apprentissage S2S. Parmi ces tâches, nous citons : la création de chatbots, la réponse aux questions, la traduction automatique (MT) et la reconnaissance automatique de la parole (FATHI, 2021).

Dans ce chapitre, nous commençons par formuler le problème de modélisation de séquences. En suite, nous présentons les architectures neuronales les plus utilisées pour cette tâche. En fin, nous terminons avec une étude comparative de celles-ci.

### 1.1 Énoncé du problème

Formellement, le problème de modélisation S2S est celui de calculer une fonction partielle  $f : X^* \rightarrow Y^*$ , où :

- $X$  est un ensemble dit d’entrées.
- $Y$  est un ensemble dit de sorties.
- Pour un ensemble  $A$ ,  $A^* = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A^n$  est l’ensemble de suites de longueur finie d’éléments de  $A$ .

$f$  prend donc un  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X^n$  et renvoie un  $y = (y_1, y_2, \dots, y_m) \in Y^m$ . Dans le cas général,  $n \neq m$  et aucune hypothèse d’alignement n’est supposée. Il est souvent de prendre  $X = \mathbb{R}^{d_e}$  et  $Y = \mathbb{R}^{d_s}$  avec  $d_e, d_s \in \mathbb{N}$ . Dans ce cas,  $x \in \mathbb{R}^{d_e \times n}$  et  $y \in \mathbb{R}^{d_s \times m}$ . Les indices peuvent représenter une succession temporelle ou un ordre plus abstrait comme celui des mots dans une phrase (MARTINS, 2018).

La majorité des outils mathématiques historiquement utilisées pour ce problème viennent de la théorie du traitement de signal numérique. Cependant, l’approche actuellement dominante et celle qui a fait preuve de plus de succès, est de les combiner avec les réseaux de neurones.

## 1.2 Réseaux de neurones feed-forward

Les réseaux de neurones profonds sont parmi les modèles les plus expressifs en ML. Leur succès pratique est incomparable aux modèles qui les ont précédés, que se soit en termes de qualité des résultats ou de variétés de domaines d’application (RASCHKA, 2015). De plus, grâce aux théorèmes dits d’approximation universelle, ce succès empirique est formellement assuré (CALIN, 2020).

### 1.2.1 Généralités

Dans cette section, nous introduisons les réseaux de neurones feed-forward (FFN, de l’anglais : feed-forward network), l’architecture neuronale la plus simple et la plus utilisée. Il s’agit d’une simple composition de couches affines avec des activations non affines (voire Définition 1).

**Définition 1** (FFN (MUKHERJEE, 2021)).

Soient  $k, w_0, w_1, \dots, w_{k+1} \in \mathbb{N}$ , un réseau de neurones feed-forward de profondeur  $k + 1$ , à  $w_0$  entrées et  $w_{k+1}$  sorties, est défini par une fonction :

$$\begin{cases} \mathbb{R}^{w_0} \rightarrow \mathbb{R}^{w_{k+1}} \\ x \mapsto \varphi_{k+1} \circ A_{k+1} \circ \varphi_k \circ A_k \circ \dots \circ \varphi_1 \circ A_1(x) \end{cases} \quad (1.1)$$

Où les  $A_i$  sont des fonctions affines  $\mathbb{R}^{w_{i-1}} \rightarrow \mathbb{R}^{w_i}$  et les  $\varphi_i$  sont des fonctions quelconques, typiquement non affines  $\mathbb{R}^{w_i} \rightarrow \mathbb{R}^{w_i}$ , dites *d’activations*. La fonction  $\varphi_i \circ A_i$  est appelée la  $i^{\text{ème}}$  couche du réseau.

Un tel réseau de neurones est souvent représenté par un graphe orienté acyclique  $(k + 1)$ -partie appelé son “architecture sous-jacente” (KEARNS & VAZIRANI, 1994). La Figure 1.1 illustre l’architecture d’un FFN de profondeur 4 avec  $(w_0, w_1, w_2, w_3, w_4) = (4, 5, 7, 5, 4)$ .



FIGURE 1.1 – Architecture sous-jacente d’un FFN de profondeur 3.

Deux FFN peuvent avoir la même architecture sous-jacente, en effet, cette dernière ne dépend que des dimensions de leurs couches respectives. De ce fait, une méthode de trouver pour une architecture et une fonction cible données le meilleur FFN est nécessaire.

Pour ce faire, nous exploitons le fait que les  $A_i$  soient des applications affines sur des espaces de dimensions finies. Nous pouvons donc les écrire comme combinaisons de produits matriciels et de translations. Le problème se réduit donc à régler<sup>1</sup> les paramètres des matrices en question. Cela nécessite une façon de quantifier la qualité d'approximation d'une fonction  $f$  par une autre  $\hat{f}$ . L'analyse fonctionnelle nous en donne plusieurs, les équations (1.2) et (1.3) sont deux exemples récurrents de fonctions dites *de perte*.

$$L_1(f, \hat{f}) = \int \|f - \hat{f}\| \quad (1.2)$$

$$L_2(f, \hat{f}) = \int \|f - \hat{f}\|^2 \quad (1.3)$$

Ayant fixé une fonction de perte  $L$ , l'entraînement revient à un problème d'optimisation. Dans le cas particulier où  $L$  est différentiable, l'algorithme du gradient peut être utilisé pour trouver un minimum local. Les gradients sont calculés en utilisant une méthode de dérivation automatique comme la rétro-propagation.

## 1.2.2 Application à la modélisation de séquence

Les réseaux de neurones opèrent sur des vecteurs. À fin de les utiliser dans le contexte de la modélisation S2S, il faut donc utiliser une représentation vectorielle des entrées. Une telle représentation s'appelle un *plongement* (embedding en anglais). Le plongement peut-être appris ou prédéfini.

Dans le cas des FFN, la séquence d'entrée est d'abord décomposée en sous-séquences. En suite, les plongements de ces sous-séquences sont traités un par un par le réseau de neurones, ce qui produit une séquence de vecteurs en sortie. (Voire l'Algorithme 1.1).

---

### ALGORITHME 1.1 : Passe d'un FFN

---

```

Input : input_sequence // Séquence d'entrée
1 begin
2    $y \leftarrow \emptyset$ 
3   foreach  $x \in \text{sub\_sequences}(\text{input\_sequence})$  do
4      $\tilde{x} \leftarrow \text{embedding}(x)$ 
5      $y \leftarrow y \cup \text{FFN}(\tilde{x})$ 
6   end
7 end
Output :  $y$  // Séquence de sortie
```

---

1. En ML, le terme “entraîner” est plutôt utilisé.

### 1.2.3 Avantages et inconvénients

Les FFN présentent deux avantages par rapport aux architectures discutées dans le reste de ce chapitre. Le premier est leur simplicité. Elle les rend plus simples à comprendre et à implémenter. Le deuxième est le fait qu'ils traitent indépendamment les sous-séquences. Cela rend très facile la tâche de les paralléliser, et par conséquent, il accélère considérablement leur entraînement.

Cependant, ce dernier point pose un grand problème. Comme ils traitent indépendamment les blocs de la séquence, les FFN ne peuvent pas modéliser les dépendances inter-bloc. Par conséquent, leur performance sur les séquences composées de plusieurs blocs est très médiocre. La seule solution pour y remédier est d'augmenter la taille du bloc (est donc aussi la dimension d'entrée). Ce problème est aussi grave que les FFN ne sont jamais utilisées pour la modélisation de séquence.

## 1.3 Réseaux de neurones récurrents

Comme nous l'avons établi en Section 1.2, les FFN sont très mal adaptés à l'apprentissage S2S. D'autres architectures doivent donc être utilisées. Le réseau de neurones récurrent (RNN, de l'anglais : recurrent neural network) est une telle architecture. Étant conçues spécifiquement pour ce type de tâche, les RNN peuvent capturer les dépendances séquentielles.



# Bibliographie

- CALIN, O. (2020). *Deep Learning Architectures*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-36721-3>
- FATHI, S. (2021). *Recurrent Neural Networks*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-89929-5>
- KEARNS, M. J., & VAZIRANI, U. (1994). *An Introduction to Computational Learning Theory* [Google-Books-ID : vCA01wY6iywC]. MIT Press.
- MARTINS, A. (2018). Lecture 9 : Machine Translation and Sequence-to-Sequence Models.
- MUKHERJEE, A. (2021). A Study of the Mathematics of Deep Learning [arXiv :2104.14033 [cs, math, stat]], (arXiv :2104.14033). <http://arxiv.org/abs/2104.14033>
- RASCHKA, S. (2015). *Python Machine Learning* [Google-Books-ID : GOVOCwAAQBAJ]. Packt Publishing Ltd.