

Cours Machine Learning

Chapitre 08 Deep Learning : RNN et Transformers

Objectifs d'apprentissage :

- Comprendre les RNN (Recurrent Neural Networks) pour les séquences
- Maîtriser LSTM et GRU pour résoudre les problèmes de vanishing gradient
- Découvrir le mécanisme d'attention et son importance
- Étudier l'architecture Transformer et son fonctionnement
- Appliquer ces modèles au NLP et aux séries temporelles

Prérequis : Chapitre 06 (Réseaux de Neurones Fondamentaux)

Durée estimée : 8-10 heures

Notebooks : 08_demo_*.ipynb

Table des matières

1 Introduction aux Données Séquentielles	3
1.1 Qu'est-ce qu'une séquence ?	3
1.2 Limitations des MLP et CNN pour les séquences	3
1.3 Types de tâches séquentielles	3
2 Recurrent Neural Networks (RNN)	3
2.1 Architecture	3
2.2 Déroulement dans le temps (Unfolding)	4
2.3 Backpropagation Through Time (BPTT)	6
2.4 Problème du Vanishing/Exploding Gradient	6
2.5 Implémentation simple	6
3 Long Short-Term Memory (LSTM)	8
3.1 Motivation	8
3.2 Architecture	8
3.3 Interprétation des portes	8
3.4 Nombre de paramètres	10
3.5 Implémentation PyTorch	10
4 Gated Recurrent Unit (GRU)	11
4.1 Architecture	11
4.2 Différences avec LSTM	11
4.3 Implémentation PyTorch	11
5 Bidirectional RNN/LSTM/GRU	12
5.1 Motivation	12
5.2 Architecture	12
5.3 Implémentation	12
6 Mécanisme d'Attention	13
6.1 Motivation : Problème du goulot d'étranglement	13
6.2 Attention de Bahdanau	13
6.3 Fonctions de score	13
6.4 Scaled Dot-Product Attention	14
7 Transformers	14
7.1 Motivation	14
7.2 Architecture globale	14
7.3 Multi-Head Attention	15
7.4 Positional Encoding	15
7.5 Encoder Layer	15
7.6 Decoder Layer	15
7.7 Implémentation simplifiée	16
8 Applications NLP	18

8.1	Modèles pré-entraînés	18
8.1.1	BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)	18
8.1.2	GPT (Generative Pre-trained Transformer)	18
8.1.3	T5, BART, RoBERTa, etc.	18
8.2	Utilisation avec HuggingFace Transformers	18
9	Séries Temporelles	19
9.1	Prédiction	19
10	Bonnes Pratiques	20
10.1	RNN/LSTM/GRU	20
10.2	Transformers	21
11	Résumé du Chapitre	21
11.1	Points Clés	21
11.2	Formules Essentielles	21
12	Exercices	21
12.1	Questions de compréhension	21
12.2	Exercices pratiques	22
13	Notebooks Pratiques	22
14	Pour Aller Plus Loin	23
14.1	Lectures Recommandées	23
14.2	Ressources	23
14.3	Prochaines Étapes	23

1 Introduction aux Données Séquentielles

1.1 Qu'est-ce qu'une séquence ?

Une **séquence** est une suite ordonnée d'éléments où l'ordre a une importance cruciale.

Exemple

Exemples de séquences

- **Texte** : "Le chat mange la souris" (ordre des mots → sens)
- **Audio** : Signal sonore échantillonné dans le temps
- **Vidéo** : Séquence d'images (frames)
- **Séries temporelles** : Cours de bourse, température, trafic web
- **ADN** : Séquence de nucléotides (A, C, G, T)

1.2 Limitations des MLP et CNN pour les séquences

MLP :

- ✗ Taille d'entrée fixe (impossible pour séquences de longueur variable)
- ✗ Pas de mémoire du contexte précédent
- ✗ Nombre de paramètres explose avec la longueur

CNN :

- ✗ Peut traiter des séquences avec Conv1D
- ✗ Champ récepteur limité (contexte local uniquement)
- ✗ Pas de mémoire à long terme

1.3 Types de tâches séquentielles

TABLE 1 – Architectures séquence-to-X

Type	Description	Exemple
One-to-One	Entrée fixe → Sortie fixe	Classification d'image (CNN)
One-to-Many	Entrée fixe → Séquence	Image captioning
Many-to-One	Séquence → Sortie fixe	Sentiment analysis
Many-to-Many	Séquence → Séquence (même longueur) (longueur différente)	Traduction, génération texte Étiquetage de séquences (NER) Traduction automatique

2 Recurrent Neural Networks (RNN)

2.1 Architecture

Définition

RNN Un RNN traite une séquence $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_T)$ en maintenant un état caché \mathbf{h}_t qui

se propage dans le temps :

$$\mathbf{h}_t = \tanh(\mathbf{W}_{hh}\mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{W}_{xh}\mathbf{x}_t + \mathbf{b}_h) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{W}_{hy}\mathbf{h}_t + \mathbf{b}_y \quad (2)$$

où :

- $\mathbf{h}_t \in \mathbb{R}^h$: état caché au temps t
- $\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^d$: entrée au temps t
- $\mathbf{y}_t \in \mathbb{R}^k$: sortie au temps t
- $\mathbf{W}_{hh} \in \mathbb{R}^{h \times h}$: poids récurrents
- $\mathbf{W}_{xh} \in \mathbb{R}^{h \times d}$: poids d'entrée
- $\mathbf{W}_{hy} \in \mathbb{R}^{k \times h}$: poids de sortie

Caractéristique clé : Les mêmes poids $\mathbf{W}_{hh}, \mathbf{W}_{xh}, \mathbf{W}_{hy}$ sont partagés à chaque pas de temps
 → capacité à traiter des séquences de longueur variable.

2.2 Déroulement dans le temps (Unfolding)

On peut "dérouler" le RNN dans le temps :

$$\mathbf{h}_1 = \tanh(\mathbf{W}_{hh}\mathbf{h}_0 + \mathbf{W}_{xh}\mathbf{x}_1 + \mathbf{b}_h)$$

$$\mathbf{h}_2 = \tanh(\mathbf{W}_{hh}\mathbf{h}_1 + \mathbf{W}_{xh}\mathbf{x}_2 + \mathbf{b}_h)$$

$$\mathbf{h}_3 = \tanh(\mathbf{W}_{hh}\mathbf{h}_2 + \mathbf{W}_{xh}\mathbf{x}_3 + \mathbf{b}_h)$$

$$\vdots$$

Initialisation : $\mathbf{h}_0 = \mathbf{0}$ (ou appris)

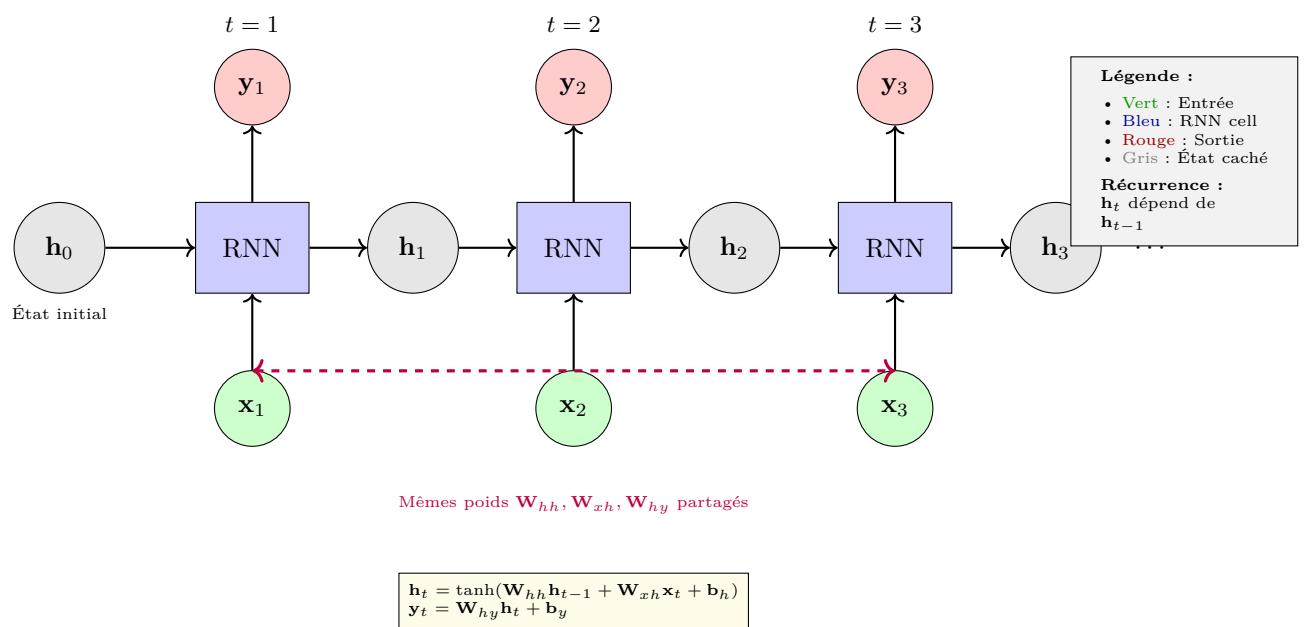


FIGURE 1 – RNN déroulé dans le temps (Unfolding). Chaque cellule RNN (en bleu) partage les mêmes poids \mathbf{W}_{hh} , \mathbf{W}_{xh} , \mathbf{W}_{hy} . À chaque pas de temps t : (1) l'entrée \mathbf{x}_t et l'état caché précédent \mathbf{h}_{t-1} sont combinés, (2) l'état caché \mathbf{h}_t est calculé avec tanh, (3) la sortie \mathbf{y}_t est produite, (4) \mathbf{h}_t est propagé au pas suivant. Cette récurrence permet au RNN de capturer les dépendances temporelles dans les séquences.

2.3 Backpropagation Through Time (BPTT)

Pour entraîner un RNN, on utilise **BPTT** : backpropagation appliquée au réseau déroulé.

Forward pass : Calculer $\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_T$ et $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_T$

Backward pass : Calculer gradients en remontant dans le temps :

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{h}_t} = \frac{\partial L}{\partial \mathbf{y}_t} \frac{\partial \mathbf{y}_t}{\partial \mathbf{h}_t} + \frac{\partial L}{\partial \mathbf{h}_{t+1}} \frac{\partial \mathbf{h}_{t+1}}{\partial \mathbf{h}_t} \quad (3)$$

2.4 Problème du Vanishing/Exploding Gradient

/!\ Attention

Le gradient se propage à travers tous les pas de temps :

$$\frac{\partial \mathbf{h}_t}{\partial \mathbf{h}_0} = \prod_{k=1}^t \frac{\partial \mathbf{h}_k}{\partial \mathbf{h}_{k-1}} = \prod_{k=1}^t \mathbf{W}_{hh}^T \cdot \text{diag}(\tanh'(\mathbf{z}_k)) \quad (4)$$

Vanishing gradient : Si $\|\mathbf{W}_{hh}\| < 1$, le gradient $\rightarrow 0$ exponentiellement.

- Le RNN ne peut pas apprendre de dépendances à long terme

Exploding gradient : Si $\|\mathbf{W}_{hh}\| > 1$, le gradient $\rightarrow \infty$.

- Solution : **gradient clipping** (limiter la norme du gradient)

2.5 Implémentation simple

```

1 import numpy as np
2
3 class SimpleRNN:
4     def __init__(self, input_dim, hidden_dim, output_dim):
5         self.hidden_dim = hidden_dim
6
7         # Initialisation Xavier
8         self.Wxh = np.random.randn(hidden_dim, input_dim) * 0.01
9         self.Whh = np.random.randn(hidden_dim, hidden_dim) * 0.01
10        self.Why = np.random.randn(output_dim, hidden_dim) * 0.01
11        self.bh = np.zeros((hidden_dim, 1))
12        self.by = np.zeros((output_dim, 1))
13
14    def forward(self, inputs):
15        """
16            inputs: liste de vecteurs (seq_len, input_dim)
17        """
18        h = np.zeros((self.hidden_dim, 1)) # h0
19        self.last_inputs = inputs
20        self.last_hs = {0: h}
21
22        # Forward pass
23        for t, x in enumerate(inputs):
24            x = x.reshape(-1, 1)
25            h = np.tanh(self.Wxh @ x + self.Whh @ h + self.bh)

```

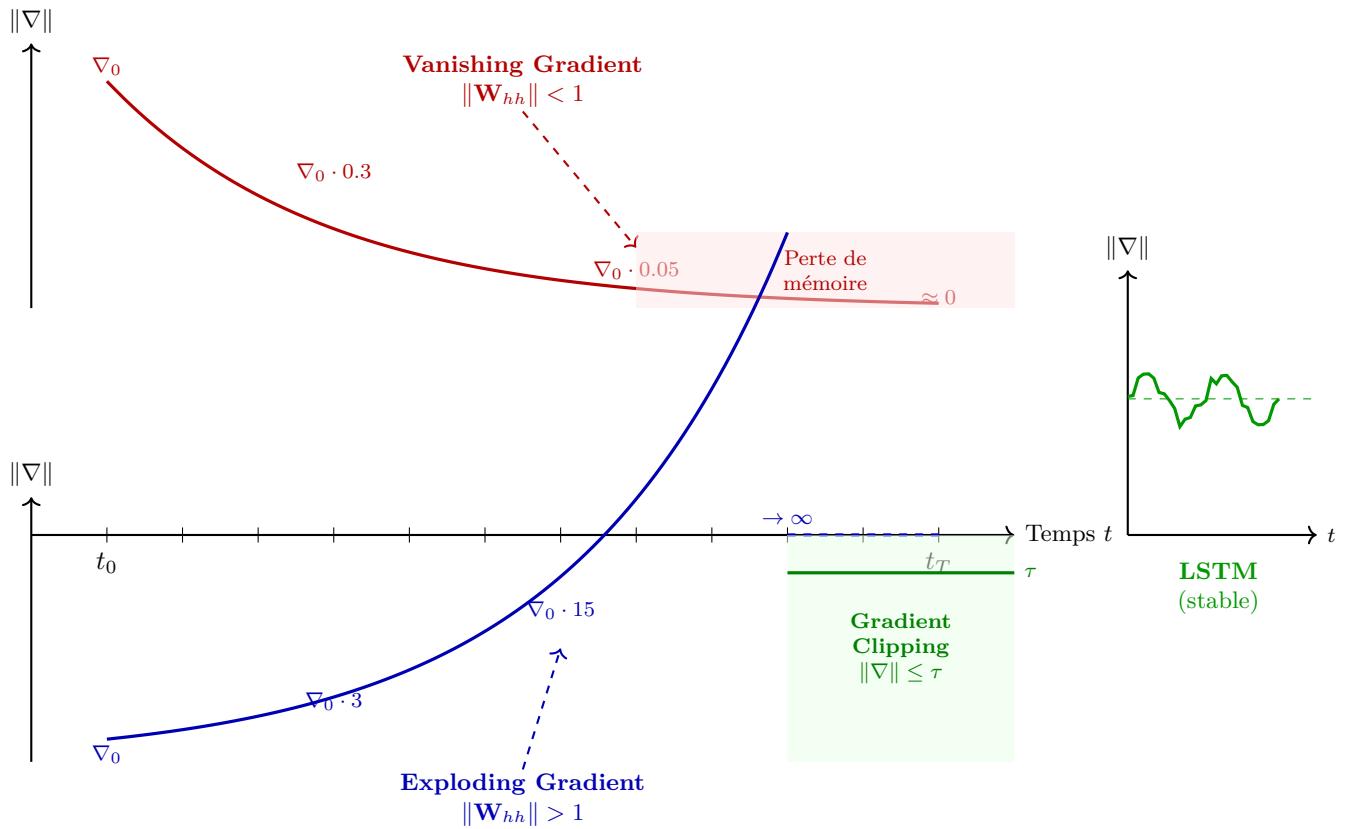


FIGURE 2 – Problème du vanishing/exploding gradient dans les RNN. **(Haut)** Avec $\|\mathbf{W}_{hh}\| < 1$, le gradient décroît exponentiellement à travers le temps, empêchant l'apprentissage de dépendances à long terme. **(Bas)** Avec $\|\mathbf{W}_{hh}\| > 1$, le gradient explose, rendant l'entraînement instable ; le gradient clipping limite la norme maximale. **(Droite)** Les LSTM maintiennent un gradient stable grâce aux connexions de mémoire.

```

26         self.last_hs[t + 1] = h
27
28     # Output au dernier pas de temps (many-to-one)
29     y = self.Why @ h + self.by
30     return y, h
31
32 def backward(self, dy, learning_rate=0.001):
33     """
34     BPTT simplifi (output au dernier pas uniquement)
35     """
36     n = len(self.last_inputs)
37
38     # Gradients accumuls
39     dWxh, dWhh, dWhy = np.zeros_like(self.Wxh), \
40                         np.zeros_like(self.Whh), \
41                         np.zeros_like(self.Why)
42     dbh, dby = np.zeros_like(self.bh), np.zeros_like(self.by)
43
44     # Gradient output
45     dWhy += dy @ self.last_hs[n].T
46     dby += dy

```

```

47
48     # Backprop through time
49     dh = self.Why.T @ dy
50
51     for t in reversed(range(n)):
52         temp = (1 - self.last_hs[t + 1] ** 2) * dh  # tanh'
53         dbh += temp
54         dWxh += temp @ self.last_inputs[t].reshape(1, -1)
55         dWhh += temp @ self.last_hs[t].T
56         dh = self.Whh.T @ temp
57
58     # Gradient clipping
59     for grad in [dWxh, dWhh, dWhy, dbh, dby]:
60         np.clip(grad, -1, 1, out=grad)
61
62     # Update
63     self.Wxh -= learning_rate * dWxh
64     self.Whh -= learning_rate * dWhh
65     self.Why -= learning_rate * dWhy
66     self.bh -= learning_rate * dbh
67     self.by -= learning_rate * dby

```

Listing 1 – RNN vanilla from scratch

3 Long Short-Term Memory (LSTM)

3.1 Motivation

LSTM résout le problème du vanishing gradient en introduisant une **cellule mémoire** \mathbf{c}_t et des **portes (gates)** qui contrôlent le flux d'information.

3.2 Architecture

Définition

LSTM Un LSTM a 3 portes et 1 cellule mémoire :

$$\mathbf{f}_t = \text{sigmoid}(\mathbf{W}_f[\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_f) \quad (\text{forget gate}) \quad (5)$$

$$\mathbf{i}_t = \text{sigmoid}(\mathbf{W}_i[\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_i) \quad (\text{input gate}) \quad (6)$$

$$\tilde{\mathbf{c}}_t = \tanh(\mathbf{W}_c[\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_c) \quad (\text{candidate cell}) \quad (7)$$

$$\mathbf{c}_t = \mathbf{f}_t \odot \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i}_t \odot \tilde{\mathbf{c}}_t \quad (\text{cell state}) \quad (8)$$

$$\mathbf{o}_t = \text{sigmoid}(\mathbf{W}_o[\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_o) \quad (\text{output gate}) \quad (9)$$

$$\mathbf{h}_t = \mathbf{o}_t \odot \tanh(\mathbf{c}_t) \quad (\text{hidden state}) \quad (10)$$

où \odot est le produit élément par élément (Hadamard).

3.3 Interprétation des portes

- **Forget gate (\mathbf{f}_t)** : Décide quelle information de \mathbf{c}_{t-1} oublier

- $f_t = 0$: oublier complètement
- $f_t = 1$: conserver complètement
- **Input gate (i_t)** : Décide quelle nouvelle information stocker dans \mathbf{c}_t
 - $i_t = 0$: ignorer la nouvelle information
 - $i_t = 1$: stocker complètement
- **Output gate (\mathbf{o}_t)** : Décide quelle partie de \mathbf{c}_t exposer dans \mathbf{h}_t

Flux d'information :

$$\mathbf{c}_t = \underbrace{\mathbf{f}_t \odot \mathbf{c}_{t-1}}_{\text{mémoire passée}} + \underbrace{\mathbf{i}_t \odot \tilde{\mathbf{c}}_t}_{\text{nouvelle info}} \quad (11)$$

(i) Astuce

La cellule \mathbf{c}_t agit comme une "autoroute" permettant au gradient de se propager sans atténuation (si $\mathbf{f}_t \approx 1$). Cela résout le vanishing gradient !

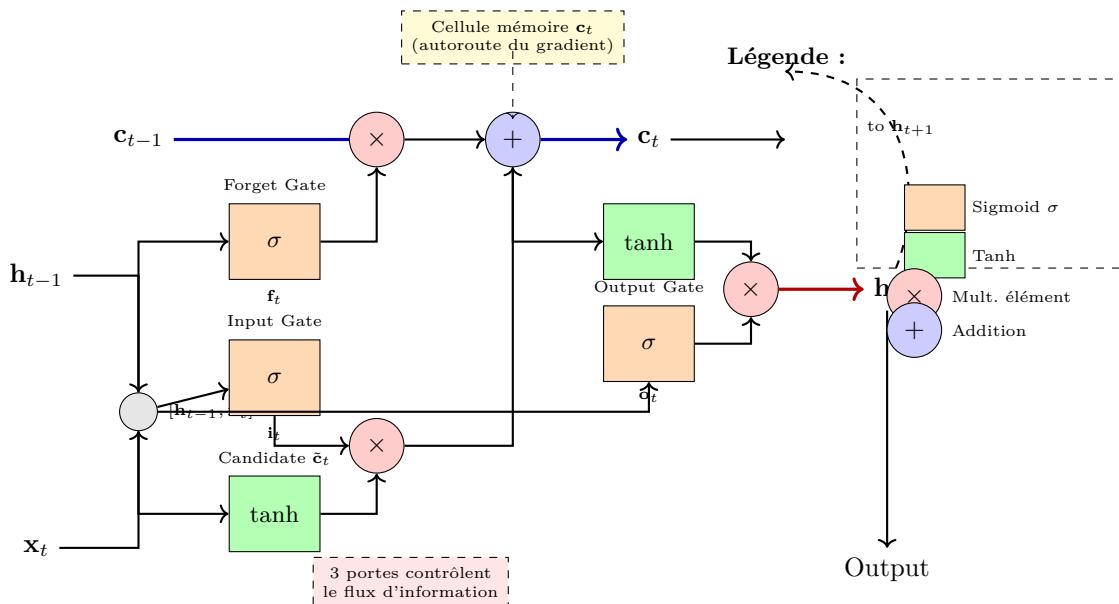


FIGURE 3 – Architecture LSTM (Long Short-Term Memory). **Portes** : (1) **Forget gate \mathbf{f}_t** : décide quelle information oublier de \mathbf{c}_{t-1} ; (2) **Input gate \mathbf{i}_t** : décide quelle nouvelle information ajouter via $\tilde{\mathbf{c}}_t$; (3) **Output gate \mathbf{o}_t** : décide quelle partie de \mathbf{c}_t exposer dans \mathbf{h}_t . **Cellule mémoire \mathbf{c}_t** (en bleu) : "autoroute" permettant au gradient de se propager sans atténuation, résolvant le vanishing gradient. Le flux $\mathbf{c}_t = \mathbf{f}_t \odot \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i}_t \odot \tilde{\mathbf{c}}_t$ permet de conserver/oublier sélectivement les informations sur de longues séquences.

3.4 Nombre de paramètres

Pour un LSTM avec h unités cachées et d inputs :

$$\text{Params} = 4 \times (h \times (h + d) + h) = 4h(h + d + 1) \quad (12)$$

Le facteur 4 vient des 4 matrices de poids (forget, input, candidate, output).

Exemple

LSTM(128) avec input(100)

$$\text{Params} = 4 \times 128 \times (128 + 100 + 1) = 117,248$$

3.5 Implémentation PyTorch

```

1 import torch
2 import torch.nn as nn
3
4 class LSTMModel(nn.Module):
5     def __init__(self, input_dim, hidden_dim, output_dim, num_layers=1):
6         super(LSTMModel, self).__init__()
7
8         self.hidden_dim = hidden_dim
9         self.num_layers = num_layers
10
11     # LSTM layer
12     self.lstm = nn.LSTM(input_dim, hidden_dim, num_layers,
13                         batch_first=True)
14
15     # Fully-connected output
16     self.fc = nn.Linear(hidden_dim, output_dim)
17
18     def forward(self, x):
19         """
20             x: (batch, seq_len, input_dim)
21         """
22         # Initialiser h0, c0
23         h0 = torch.zeros(self.num_layers, x.size(0),
24                          self.hidden_dim).to(x.device)
25         c0 = torch.zeros(self.num_layers, x.size(0),
26                          self.hidden_dim).to(x.device)
27
28         # LSTM forward
29         # out: (batch, seq_len, hidden_dim)
30         out, (hn, cn) = self.lstm(x, (h0, c0))
31
32         # Prendre le dernier timestep (many-to-one)
33         out = self.fc(out[:, -1, :])
34
35         return out

```

```

36 # Exemple d'utilisation
37 model = LSTMModel(input_dim=10, hidden_dim=128, output_dim=5)
38
39 # S quence de longueur 20
40 x = torch.randn(32, 20, 10) # (batch=32, seq_len=20, input_dim=10)
41 output = model(x)
42 print(output.shape) # (32, 5)

```

Listing 2 – LSTM avec PyTorch

4 Gated Recurrent Unit (GRU)

4.1 Architecture

GRU est une variante simplifiée du LSTM avec **2 portes** au lieu de 3.

Définition

GRU

$$\mathbf{z}_t = \text{sigmoid}(\mathbf{W}_z[\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_t]) \quad (\text{update gate}) \quad (13)$$

$$\mathbf{r}_t = \text{sigmoid}(\mathbf{W}_r[\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_t]) \quad (\text{reset gate}) \quad (14)$$

$$\tilde{\mathbf{h}}_t = \tanh(\mathbf{W}[\mathbf{r}_t \odot \mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_t]) \quad (\text{candidate}) \quad (15)$$

$$\mathbf{h}_t = (1 - \mathbf{z}_t) \odot \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{z}_t \odot \tilde{\mathbf{h}}_t \quad (16)$$

4.2 Différences avec LSTM

TABLE 2 – LSTM vs GRU

	LSTM	GRU
Nombre de portes	3	2
Cellule mémoire séparée	Oui (\mathbf{c}_t)	Non (seulement \mathbf{h}_t)
Paramètres	$4h(h+d+1)$	$3h(h+d+1)$
Vitesse	Plus lent	Plus rapide
Performance	Légèrement meilleure	Comparable

(i) Astuce

Règle pratique :

- LSTM : Séquences très longues, dépendances complexes
- GRU : Séquences courtes/moyennes, plus rapide, moins de paramètres
- En pratique, essayer les deux et comparer !

4.3 Implémentation PyTorch

```

1 class GRUModel(nn.Module):
2     def __init__(self, input_dim, hidden_dim, output_dim, num_layers=1):
3         super(GRUModel, self).__init__()

```

```

4
5     self.hidden_dim = hidden_dim
6     self.num_layers = num_layers
7
8     self.gru = nn.GRU(input_dim, hidden_dim, num_layers,
9                         batch_first=True)
10    self.fc = nn.Linear(hidden_dim, output_dim)
11
12 def forward(self, x):
13     h0 = torch.zeros(self.num_layers, x.size(0),
14                      self.hidden_dim).to(x.device)
15
16     out, hn = self.gru(x, h0)
17     out = self.fc(out[:, -1, :])
18     return out

```

Listing 3 – GRU avec PyTorch

5 Bidirectional RNN/LSTM/GRU

5.1 Motivation

Un RNN classique ne voit que le **contexte passé**. Pour certaines tâches (NER, POS tagging), le contexte **futur** est aussi important.

Exemple

Prédiction de mots Phrase : "Le _____ mange la souris"

- Contexte passé : "Le"
- Contexte futur : "mange la souris" → animal carnivore → "chat"

5.2 Architecture

Définition

Bidirectional RNN Un Bi-RNN a deux RNN :

- **Forward RNN** : lit la séquence de gauche à droite → $\vec{\mathbf{h}}_t$
- **Backward RNN** : lit la séquence de droite à gauche → $\overleftarrow{\mathbf{h}}_t$

La sortie finale est la concaténation :

$$\mathbf{h}_t = [\vec{\mathbf{h}}_t; \overleftarrow{\mathbf{h}}_t] \quad (17)$$

Nombre de paramètres : Doublé (2 RNN indépendants)

5.3 Implémentation

```

1 class BiLSTM(nn.Module):
2     def __init__(self, input_dim, hidden_dim, output_dim):
3         super(BiLSTM, self).__init__()
4

```

```

5     # bidirectional=True
6     self.lstm = nn.LSTM(input_dim, hidden_dim,
7                           batch_first=True, bidirectional=True)
8
9     # hidden_dim * 2 car bidirectionnel
10    self.fc = nn.Linear(hidden_dim * 2, output_dim)
11
12   def forward(self, x):
13       # out: (batch, seq_len, hidden_dim * 2)
14       out, _ = self.lstm(x)
15       out = self.fc(out[:, -1, :])  # Dernier timestep
16       return out

```

Listing 4 – Bidirectional LSTM

6 Mécanisme d'Attention

6.1 Motivation : Problème du goulot d'étranglement

En seq2seq (traduction), le décodeur doit tout comprendre à partir d'un seul vecteur contexte \mathbf{c} :

$$\text{Encoder} : (x_1, \dots, x_n) \rightarrow \mathbf{c} \rightarrow \text{Decoder} : (y_1, \dots, y_m) \quad (18)$$

Problème : \mathbf{c} est un goulot d'étranglement, surtout pour des séquences longues.

6.2 Attention de Bahdanau

Définition

Attention Mechanism Au lieu d'un vecteur contexte fixe, on calcule un vecteur contexte **dynamique** \mathbf{c}_t à chaque pas de décodage :

$$e_{t,i} = \text{score}(\mathbf{s}_{t-1}, \mathbf{h}_i) \quad (\text{score d'attention}) \quad (19)$$

$$\alpha_{t,i} = \frac{\exp(e_{t,i})}{\sum_{j=1}^n \exp(e_{t,j})} \quad (\text{poids d'attention}) \quad (20)$$

$$\mathbf{c}_t = \sum_{i=1}^n \alpha_{t,i} \mathbf{h}_i \quad (\text{contexte pondéré}) \quad (21)$$

où :

- \mathbf{s}_{t-1} : état caché du décodeur
- \mathbf{h}_i : états cachés de l'encodeur
- $\alpha_{t,i}$: attention sur le mot i de l'entrée

6.3 Fonctions de score

Dot product :

$$\text{score}(\mathbf{s}, \mathbf{h}) = \mathbf{s}^T \mathbf{h} \quad (22)$$

General (bilinear) :

$$\text{score}(\mathbf{s}, \mathbf{h}) = \mathbf{s}^T \mathbf{W}_a \mathbf{h} \quad (23)$$

Additive (Bahdanau) :

$$\text{score}(\mathbf{s}, \mathbf{h}) = \mathbf{v}_a^T \tanh(\mathbf{W}_1 \mathbf{s} + \mathbf{W}_2 \mathbf{h}) \quad (24)$$

6.4 Scaled Dot-Product Attention

Version utilisée dans les Transformers :

$$\text{Attention}(\mathbf{Q}, \mathbf{K}, \mathbf{V}) = \text{softmax} \left(\frac{\mathbf{Q}\mathbf{K}^T}{\sqrt{d_k}} \right) \mathbf{V} \quad (25)$$

où :

- **Q** (Queries) : ce qu'on cherche
- **K** (Keys) : ce qu'on a
- **V** (Values) : ce qu'on renvoie
- d_k : dimension des clés (facteur de normalisation)

Interprétation :

1. Calculer similarité entre **Q** et **K** : $\mathbf{Q}\mathbf{K}^T$
2. Normaliser par $\sqrt{d_k}$ pour éviter valeurs trop grandes
3. Appliquer softmax pour obtenir poids d'attention
4. Pondérer les valeurs **V**

7 Transformers

7.1 Motivation

Limites des RNN :

- ✗ Traitement séquentiel (pas de parallélisation)
- ✗ Difficulté avec dépendances à très long terme
- ✗ Lent à entraîner

Transformer (Vaswani et al., 2017) :

- ✓ Uniquement basé sur l'attention (pas de récurrence)
- ✓ Complètement parallélisable
- ✓ Capture dépendances à longue distance facilement
- ✓ State-of-the-art en NLP (BERT, GPT, T5, etc.)

7.2 Architecture globale

Encoder-Decoder avec 6 couches chacun (original paper) :

- **Encoder** : Traite la séquence d'entrée
- **Decoder** : Génère la séquence de sortie (autorégressif)

7.3 Multi-Head Attention

Définition

Multi-Head Attention Au lieu d'une seule attention, on calcule h attentions en parallèle avec des projections différentes :

$$\text{head}_i = \text{Attention}(\mathbf{Q}\mathbf{W}_i^Q, \mathbf{K}\mathbf{W}_i^K, \mathbf{V}\mathbf{W}_i^V) \quad (26)$$

$$\text{MultiHead}(\mathbf{Q}, \mathbf{K}, \mathbf{V}) = \text{Concat}(\text{head}_1, \dots, \text{head}_h)\mathbf{W}^O \quad (27)$$

où $\mathbf{W}_i^Q, \mathbf{W}_i^K, \mathbf{W}_i^V$ sont des matrices de projection apprenables.

Avantages :

- Chaque tête peut se concentrer sur des aspects différents (syntaxe, sémantique, etc.)
- Plus expressif qu'une seule attention

7.4 Positional Encoding

Problème : Sans récurrence, le Transformer ne connaît pas l'ordre des mots !

Solution : Ajouter un **encodage de position** à chaque embedding :

$$PE_{(pos,2i)} = \sin\left(\frac{pos}{10000^{2i/d}}\right) \quad (28)$$

$$PE_{(pos,2i+1)} = \cos\left(\frac{pos}{10000^{2i/d}}\right) \quad (29)$$

où pos est la position et i la dimension.

$$\mathbf{x}_{\text{input}} = \text{Embedding}(\text{token}) + \text{PositionalEncoding}(pos) \quad (30)$$

7.5 Encoder Layer

Une couche encoder contient :

1. **Multi-Head Self-Attention**
2. **Add & Norm** (Residual connection + Layer Normalization)
3. **Feed-Forward Network** (2 couches FC avec ReLU)
4. **Add & Norm**

$$\mathbf{z} = \text{LayerNorm}(\mathbf{x} + \text{MultiHeadAttention}(\mathbf{x}, \mathbf{x}, \mathbf{x})) \quad (31)$$

$$\text{output} = \text{LayerNorm}(\mathbf{z} + \text{FFN}(\mathbf{z})) \quad (32)$$

7.6 Decoder Layer

Une couche decoder contient :

1. **Masked Multi-Head Self-Attention** (ne voit que le passé)
2. **Add & Norm**

3. Multi-Head Cross-Attention (attention sur l'encodeur)
4. Add & Norm
5. Feed-Forward Network
6. Add & Norm

Masking : En génération, le décodeur ne doit voir que les tokens précédents (autorégressif).

7.7 Implémentation simplifiée

```

1 import torch
2 import torch.nn.functional as F
3
4 def scaled_dot_product_attention(Q, K, V, mask=None):
5     """
6     Q, K, V: (batch, seq_len, d_k)
7     """
8     d_k = Q.size(-1)
9
10    # Scores: (batch, seq_len, seq_len)
11    scores = torch.matmul(Q, K.transpose(-2, -1)) / torch.sqrt(torch.
12        tensor(d_k, dtype=torch.float32))
13
14    # Masking (optionnel)
15    if mask is not None:
16        scores = scores.masked_fill(mask == 0, -1e9)
17
18    # Softmax
19    attention_weights = F.softmax(scores, dim=-1)
20
21    # Weighted sum
22    output = torch.matmul(attention_weights, V)
23
24    return output, attention_weights

```

Listing 5 – Scaled Dot-Product Attention

```

1 class MultiHeadAttention(nn.Module):
2     def __init__(self, d_model, num_heads):
3         super(MultiHeadAttention, self).__init__()
4         assert d_model % num_heads == 0
5
6         self.d_model = d_model
7         self.num_heads = num_heads
8         self.d_k = d_model // num_heads
9
10        # Linear projections
11        self.W_q = nn.Linear(d_model, d_model)
12        self.W_k = nn.Linear(d_model, d_model)
13        self.W_v = nn.Linear(d_model, d_model)
14        self.W_o = nn.Linear(d_model, d_model)
15

```

```

16 def split_heads(self, x):
17     """Split into multiple heads"""
18     batch_size, seq_len, d_model = x.size()
19     return x.view(batch_size, seq_len, self.num_heads, self.d_k).
20         transpose(1, 2)
21
22 def forward(self, Q, K, V, mask=None):
23     batch_size = Q.size(0)
24
25     # Linear projections
26     Q = self.split_heads(self.W_q(Q)) # (batch, num_heads, seq_len,
27     d_k)
27     K = self.split_heads(self.W_k(K))
28     V = self.split_heads(self.W_v(V))
29
30     # Scaled dot-product attention
31     attn_output, _ = scaled_dot_product_attention(Q, K, V, mask)
32
33     # Concatenate heads
34     attn_output = attn_output.transpose(1, 2).contiguous().view(
35         batch_size, -1, self.d_model
36     )
37
38     # Final linear
39     output = self.W_o(attn_output)
        return output

```

Listing 6 – Multi-Head Attention

```

1 class TransformerEncoderLayer(nn.Module):
2     def __init__(self, d_model, num_heads, d_ff, dropout=0.1):
3         super(TransformerEncoderLayer, self).__init__()
4
5         self.self_attn = MultiHeadAttention(d_model, num_heads)
6         self.feed_forward = nn.Sequential(
7             nn.Linear(d_model, d_ff),
8             nn.ReLU(),
9             nn.Linear(d_ff, d_model)
10        )
11
12         self.norm1 = nn.LayerNorm(d_model)
13         self.norm2 = nn.LayerNorm(d_model)
14         self.dropout = nn.Dropout(dropout)
15
16     def forward(self, x, mask=None):
17         # Self-attention + residual + norm
18         attn_output = self.self_attn(x, x, x, mask)
19         x = self.norm1(x + self.dropout(attn_output))
20
21         # Feed-forward + residual + norm
22         ff_output = self.feed_forward(x)

```

```

23     x = self.norm2(x + self.dropout(ff_output))
24
25     return x

```

Listing 7 – Transformer Encoder Layer

8 Applications NLP

8.1 Modèles pré-entraînés

8.1.1 BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)

Architecture : Encoder Transformer (12 ou 24 couches)

Pré-entraînement :

- Masked Language Modeling (MLM) : Prédire les mots masqués
- Next Sentence Prediction (NSP) : Prédire si phrase B suit phrase A

Fine-tuning : Classification, NER, Q&A, etc.

8.1.2 GPT (Generative Pre-trained Transformer)

Architecture : Decoder Transformer (autorégressif)

Pré-entraînement : Language modeling (prédire token suivant)

Modèles :

- GPT-2 (1.5B params)
- GPT-3 (175B params)
- GPT-4 (1.76T params estimé)

8.1.3 T5, BART, RoBERTa, etc.

NOMBREUSES VARIANTES AVEC DIFFÉRENTES STRATÉGIES DE PRÉ-ENTRAÎNEMENT.

8.2 Utilisation avec HuggingFace Transformers

```

1 from transformers import BertTokenizer, BertForSequenceClassification
2 import torch
3
4 # Charger modèle pré-entraîné
5 tokenizer = BertTokenizer.from_pretrained('bert-base-uncased')
6 model = BertForSequenceClassification.from_pretrained(
7     'bert-base-uncased',
8     num_labels=2 # Binary classification
9 )
10
11 # Texte classifier
12 text = "This movie is fantastic!"
13 inputs = tokenizer(text, return_tensors='pt', padding=True, truncation=
14     True)

```

```

15 # Forward
16 outputs = model(**inputs)
17 logits = outputs.logits
18 probs = torch.softmax(logits, dim=-1)
19
20 print(f"Positive: {probs[0, 1]:.2f}")
21 print(f"Negative: {probs[0, 0]:.2f}")

```

Listing 8 – BERT pour classification

```

1 from transformers import GPT2LMHeadModel, GPT2Tokenizer
2
3 tokenizer = GPT2Tokenizer.from_pretrained('gpt2')
4 model = GPT2LMHeadModel.from_pretrained('gpt2')
5
6 # Prompt
7 prompt = "Once upon a time"
8 inputs = tokenizer.encode(prompt, return_tensors='pt')
9
10 # Generation
11 outputs = model.generate(
12     inputs,
13     max_length=50,
14     num_return_sequences=1,
15     temperature=0.7,
16     top_p=0.9,
17     do_sample=True
18 )
19
20 generated_text = tokenizer.decode(outputs[0], skip_special_tokens=True)
21 print(generated_text)

```

Listing 9 – GPT-2 pour génération de texte

9 Séries Temporelles

9.1 Prédiction

```

1 import numpy as np
2 import torch
3 import torch.nn as nn
4
5 # Générer une série temporelle synthétique
6 t = np.linspace(0, 100, 1000)
7 data = np.sin(t) + 0.1 * np.random.randn(1000)
8
9 # Créer séquences (window = 50)
10 def create_sequences(data, window=50):
11     X, y = [], []
12     for i in range(len(data) - window):
13         X.append(data[i:i+window])

```

```

14     y.append(data[i+window])
15     return np.array(X), np.array(y)
16
17 X, y = create_sequences(data, window=50)
18 X = torch.FloatTensor(X).unsqueeze(-1) # (N, 50, 1)
19 y = torch.FloatTensor(y)
20
21 # Mod le LSTM
22 class TimeSeriesLSTM(nn.Module):
23     def __init__(self, input_dim=1, hidden_dim=64, num_layers=2):
24         super(TimeSeriesLSTM, self).__init__()
25         self.lstm = nn.LSTM(input_dim, hidden_dim, num_layers,
26                             batch_first=True)
27         self.fc = nn.Linear(hidden_dim, 1)
28
29     def forward(self, x):
30         out, _ = self.lstm(x)
31         out = self.fc(out[:, -1, :]) # Dernier timestep
32         return out.squeeze()
33
34 model = TimeSeriesLSTM()
35 criterion = nn.MSELoss()
36 optimizer = torch.optim.Adam(model.parameters(), lr=0.001)
37
38 # Training
39 num_epochs = 100
40 for epoch in range(num_epochs):
41     model.train()
42     optimizer.zero_grad()
43
44     outputs = model(X)
45     loss = criterion(outputs, y)
46
47     loss.backward()
48     optimizer.step()
49
50     if (epoch + 1) % 10 == 0:
51         print(f'Epoch [{epoch+1}/{num_epochs}], Loss: {loss.item():.4f}')
52

```

Listing 10 – LSTM pour prédiction de séries temporelles

10 Bonnes Pratiques

10.1 RNN/LSTM/GRU

- **Gradient clipping** : Limiter norme du gradient (5-10)
- **Layer Normalization** : Stabilise l’entraînement
- **Dropout** : Sur les connexions non-récurrentes uniquement
- **Teacher Forcing** : En seq2seq, utiliser vraies sorties pendant entraînement

- **Beam Search** : Pour génération (au lieu de greedy)

10.2 Transformers

- **Learning Rate Warmup** : Augmenter LR progressivement au début
- **Label Smoothing** : Régularisation pour classification
- **Dropout** : Sur attention et FFN
- **Layer Normalization** : Avant ou après chaque sous-couche
- **Gradient Accumulation** : Pour simuler grands batch sizes

11 Résumé du Chapitre

11.1 Points Clés

- **RNN** : État caché récurrent, vanishing/exploding gradient
- **LSTM** : 3 portes (forget, input, output) + cellule mémoire
- **GRU** : Variante simplifiée avec 2 portes
- **Bidirectional** : Contexte passé + futur
- **Attention** : Pondération dynamique des inputs
- **Transformer** : Uniquement attention, parallélisable, state-of-the-art NLP
- **BERT** : Encoder pré-entraîné (MLM)
- **GPT** : Decoder autorégressif (LM)

11.2 Formules Essentielles

Formules à retenir

RNN :

$$\mathbf{h}_t = \tanh(\mathbf{W}_{hh}\mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{W}_{xh}\mathbf{x}_t + \mathbf{b})$$

LSTM (simplifié) :

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_t &= \mathbf{f}_t \odot \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i}_t \odot \tilde{\mathbf{c}}_t \\ \mathbf{h}_t &= \mathbf{o}_t \odot \tanh(\mathbf{c}_t) \end{aligned}$$

Scaled Dot-Product Attention :

$$\text{Attention}(\mathbf{Q}, \mathbf{K}, \mathbf{V}) = \text{softmax} \left(\frac{\mathbf{Q}\mathbf{K}^T}{\sqrt{d_k}} \right) \mathbf{V}$$

12 Exercices

12.1 Questions de compréhension

1. Pourquoi le RNN vanilla souffre-t-il du vanishing gradient ?
2. Expliquer le rôle de chaque porte dans un LSTM.
3. Quelle est la différence principale entre LSTM et GRU ?
4. Pourquoi utiliser un Bidirectional RNN pour le NER ?

5. Comment le mécanisme d'attention résout-il le problème du goulot d'étranglement ?
6. Pourquoi le Transformer a-t-il besoin de positional encoding ?

12.2 Exercices pratiques

1. Prédiction de séries temporelles

- Implémenter un LSTM pour prédire une série temporelle
- Comparer LSTM vs GRU
- Visualiser les prédictions

2. Sentiment Analysis

- Fine-tuner BERT sur un dataset de reviews (IMDB, Yelp)
- Comparer avec un LSTM from scratch

3. Génération de texte

- Entraîner un RNN character-level sur Shakespeare
- Générer du texte avec temperature sampling

4. Attention Visualization

- Implémenter attention de Bahdanau
- Visualiser les poids d'attention sur une tâche de traduction

Solutions disponibles dans 08_exercices.ipynb (solutions intégrées dans le notebook)

13 Notebooks Pratiques

Ce chapitre est accompagné des notebooks suivants :

- 08_demo_lstm_sentiment.ipynb : Analyse de sentiment avec LSTM
 - LSTM bidirectionnel pour classification de texte
 - Dataset IMDB Reviews (sentiment positif/négatif)
 - Preprocessing et tokenization
 - Training avec PyTorch et visualisation des résultats
- 08_demo_transformers_huggingface.ipynb : Transformers avec Hugging Face
 - Fine-tuning de BERT pour classification de texte
 - Génération de texte avec GPT-2
 - Utilisation de la bibliothèque Transformers
 - Tokenization et gestion des modèles pré-entraînés
- 08_demo_rag_llm.ipynb : RAG et LLMs avancés (**NOUVEAU**)
 - Introduction au Retrieval-Augmented Generation (RAG)
 - Embeddings avec Sentence-BERT et recherche vectorielle (FAISS)
 - Pipeline RAG complet : Retrieval + Context + Generation
 - Chunking et preprocessing de documents longs
 - Techniques avancées : Reranking avec CrossEncoder
 - Hybrid Search : combinaison BM25 (keyword) + Dense embeddings
 - Évaluation du RAG : Precision@K, Recall@K
 - Visualisation des embeddings avec PCA
 - Applications pratiques : chatbots, QA systems, documentation
- 08_exercices.ipynb : Exercices pratiques avec solutions intégrées

- Implémentation de RNN vanilla et LSTM from scratch
- Seq2Seq avec attention pour traduction
- Génération de texte avec temperature sampling
- Attention visualization

14 Pour Aller Plus Loin

14.1 Lectures Recommandées

- Hochreiter & Schmidhuber (1997) - "Long Short-Term Memory"
- Bahdanau et al. (2014) - "Neural Machine Translation by Jointly Learning to Align and Translate"
- Vaswani et al. (2017) - "Attention Is All You Need" (Transformer)
- Devlin et al. (2018) - "BERT : Pre-training of Deep Bidirectional Transformers"
- Radford et al. (2019) - "Language Models are Unsupervised Multitask Learners" (GPT-2)

14.2 Ressources

- The Illustrated Transformer : <https://jalammar.github.io/illustrated-transformer/>
- HuggingFace Transformers : <https://huggingface.co/docs/transformers/>
- Sequence Models (Coursera) : Andrew Ng
- Annotated Transformer : <https://nlp.seas.harvard.edu/annotated-transformer/>

14.3 Prochaines Étapes

Chapitre suivant recommandé : **Chapitre 09 - Reinforcement Learning**

Le reinforcement learning permet d'entraîner des agents à prendre des décisions séquentielles pour maximiser une récompense.

Références

1. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). "Long short-term memory". *Neural computation*, 9(8), 1735-1780.
2. Cho, K., et al. (2014). "Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation". *EMNLP*.
3. Bahdanau, D., Cho, K., & Bengio, Y. (2014). "Neural machine translation by jointly learning to align and translate". *arXiv :1409.0473*.
4. Vaswani, A., et al. (2017). "Attention is all you need". *NIPS*.
5. Devlin, J., et al. (2018). "BERT : Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding". *arXiv :1810.04805*.
6. Radford, A., et al. (2019). "Language models are unsupervised multitask learners". *OpenAI blog*.