

Intelligence Artificielle Connexionniste

Réseaux de Neurones



Julien SEINTURIER
Maître de Conférences

<http://web.seinturier.fr/teaching/ai>
julien.seinturier@univ-tln.fr

Principe

- Reproduire l'intelligence humaine au travers de machines

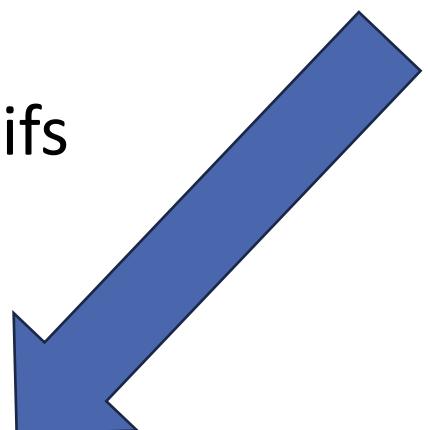
Principe

- Reproduire l'intelligence humaine au travers de machines
- 2 axes complémentaires

Principe

- Reproduire l'intelligence humaine au travers de machines
- 2 axes complémentaires

Reproduire
les processus cognitifs



Approche Symbolique

Principe

- Reproduire l'intelligence humaine au travers de machines
- 2 axes complémentaires

Reproduire
les processus cognitifs



Approche Symbolique

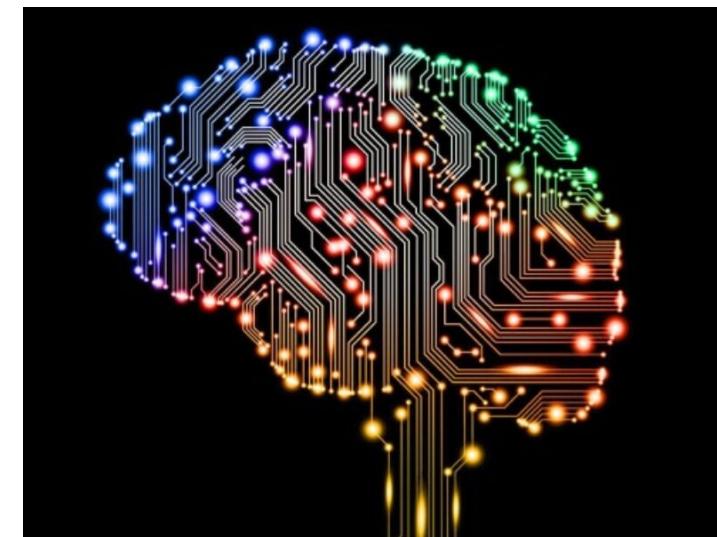
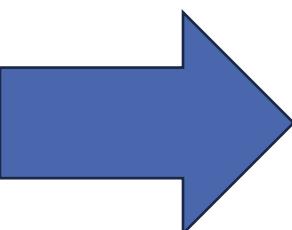
Reproduire
Le fonctionnement du cerveau



Approche Connexionniste

Intelligence artificielle connexionniste

- Basée la reproduction fonctionnelle du cerveau humain
- Construite à partir des neurosciences



Neurone

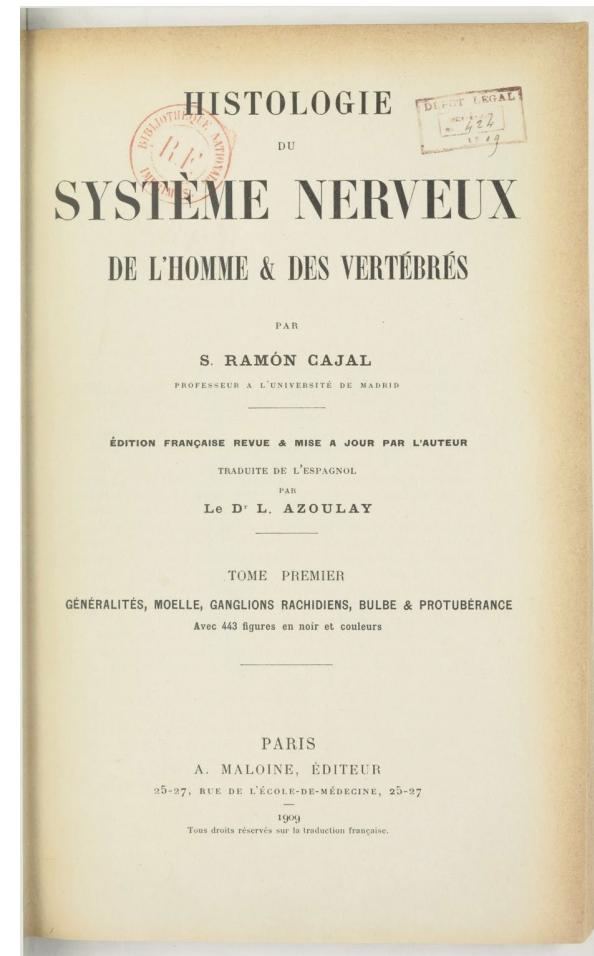
- Décrit en 1894 par Santiago Ramón y Cajal (1852 - 1934)
 - Observé au microscope
 - Définition de dendrites et axones



Observation d'un neurone



Photographie de S. Ramon y Cajal,
Clark University (1899)

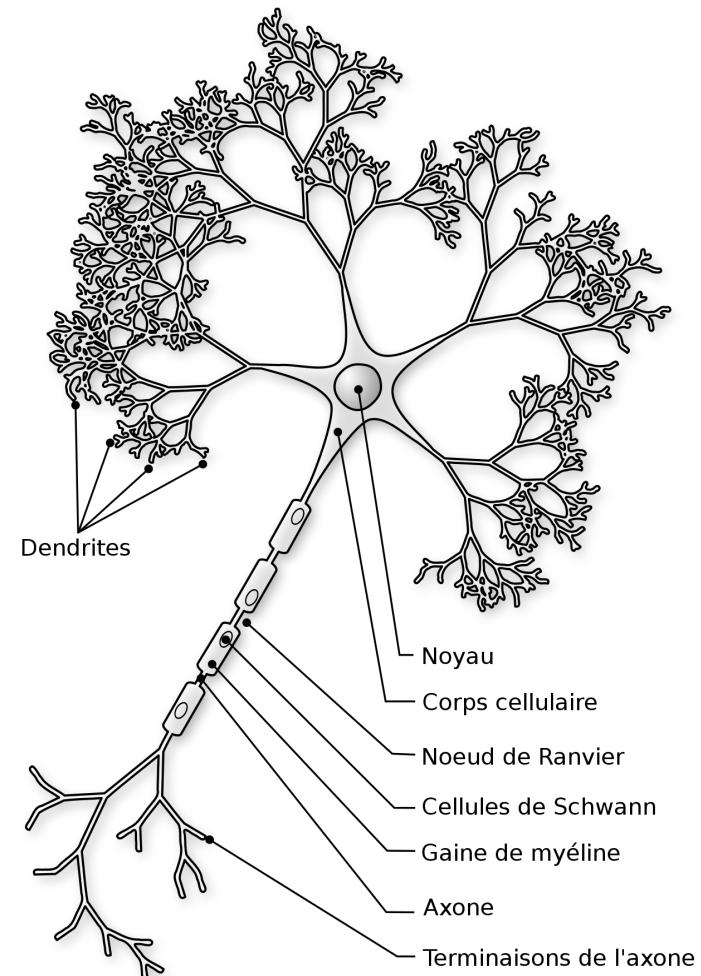
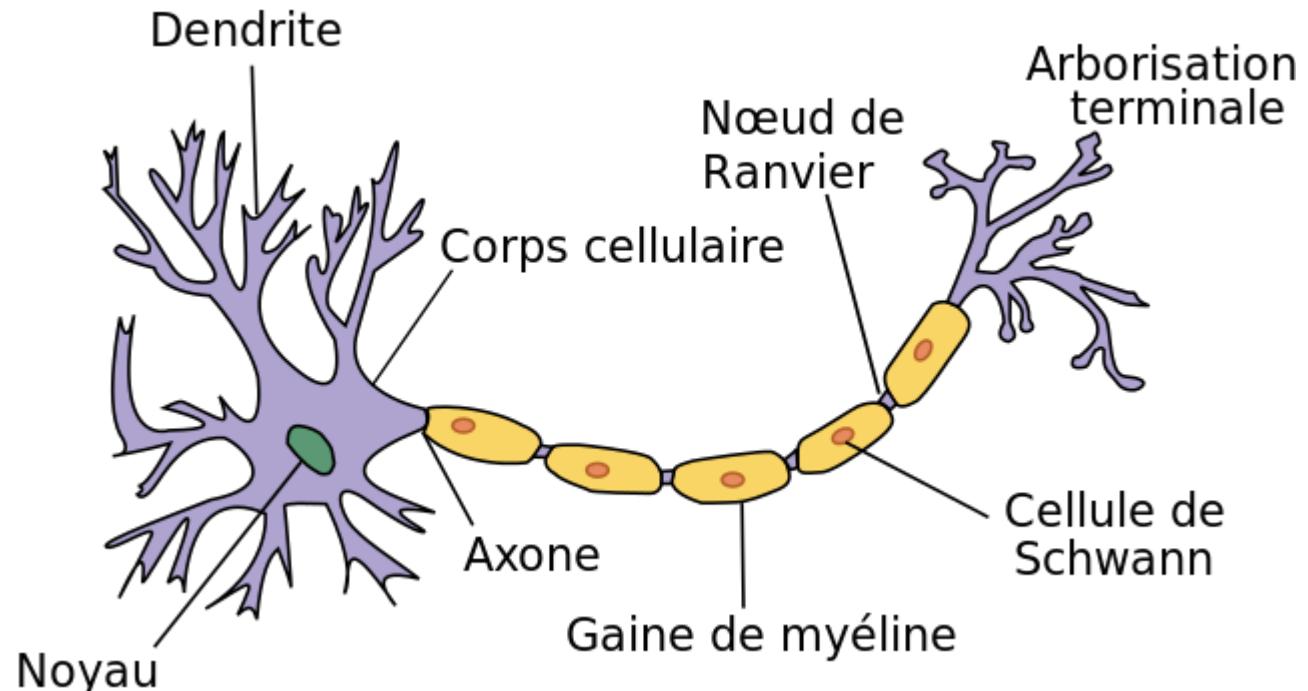


Ouvrage numérisé et traduit (BNF):

<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k62147775/f1.image>

Neurone

■ Description

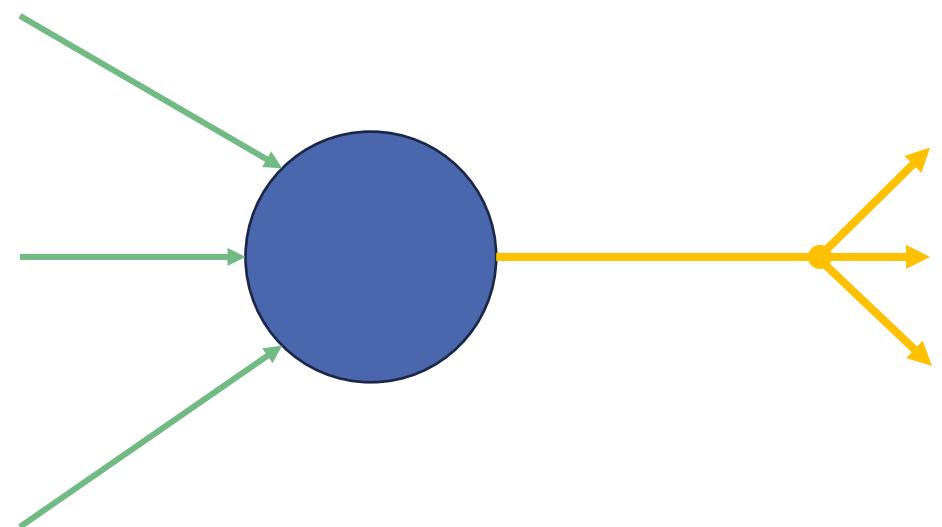


Neurone

- Brique de base du système nerveux central
- Entre 86 et 100 milliards dans un cerveau humain
- Taille d'environ 5 à 120 µm

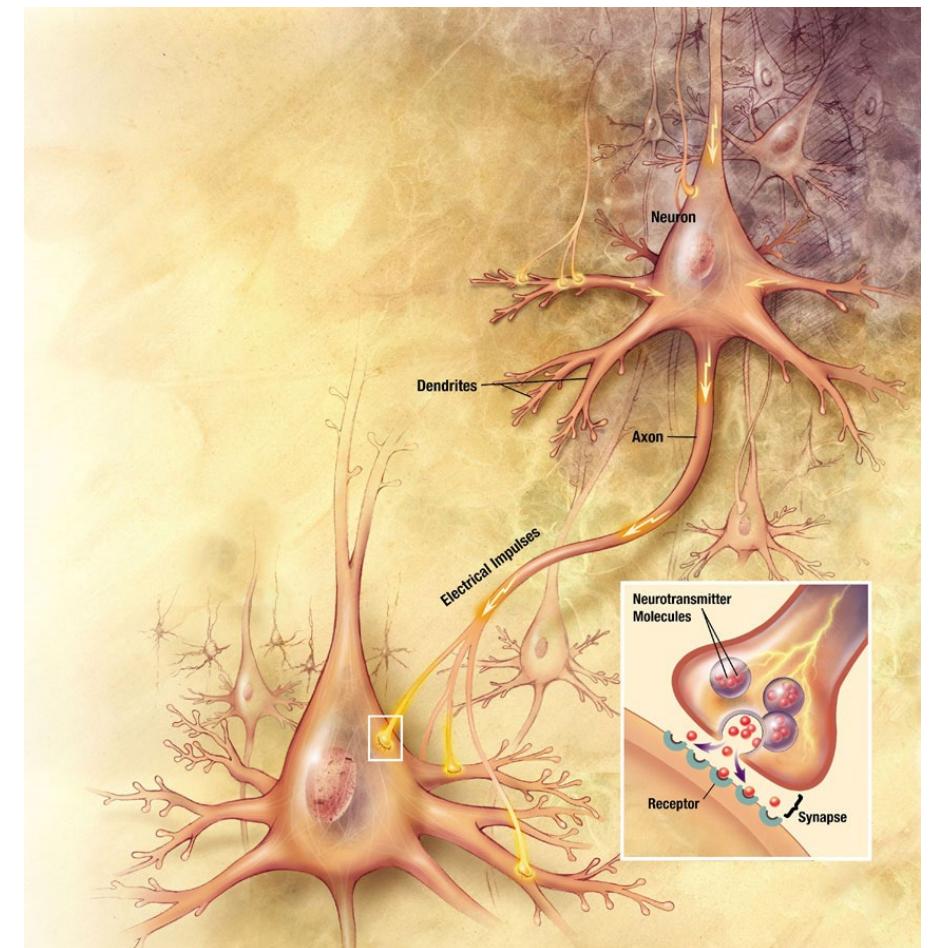
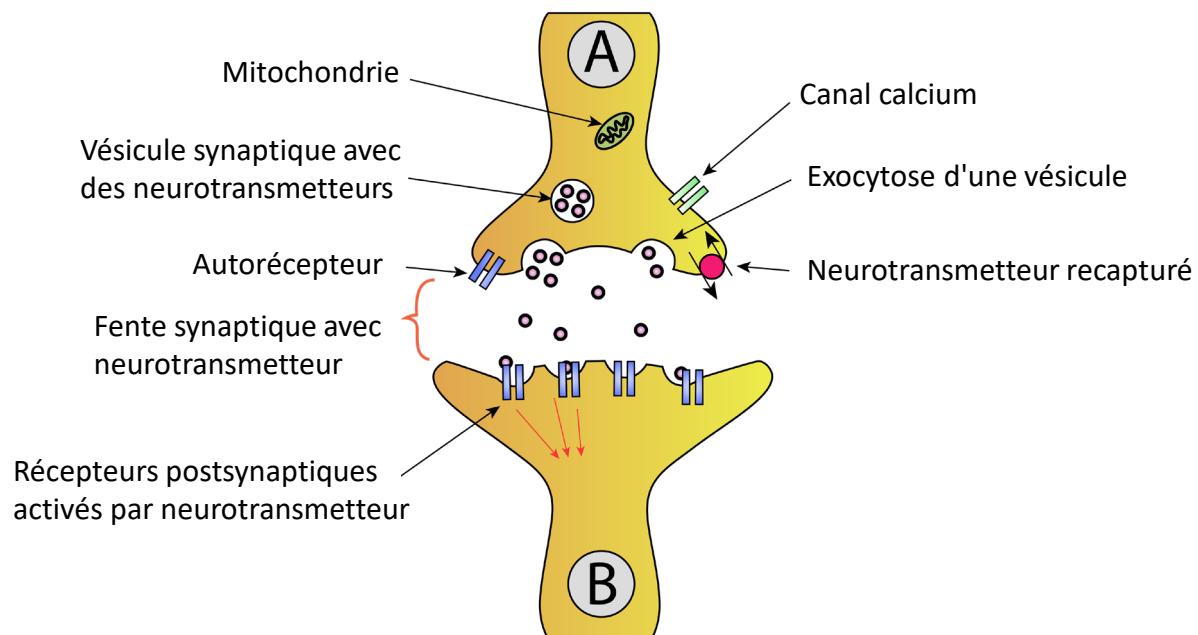
Fonctionnement

- Signaux en entrée via les **dendrites**
- Evaluation par le **corps du neurone**
- Signal en sortie via **l'axone**
- **l'axone** peut avoir plusieurs terminaisons



Synapse

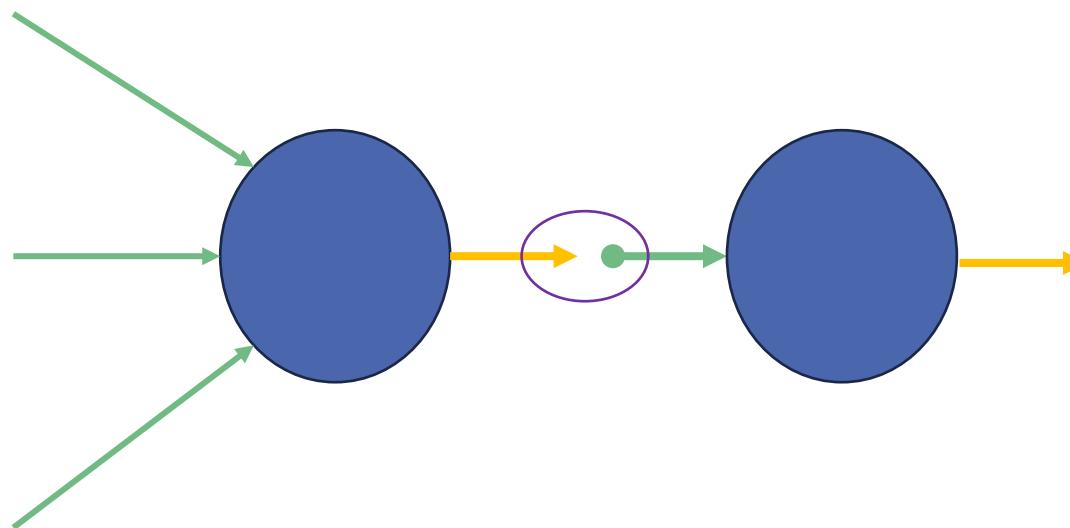
- Décrit en 1897 par Charles Scott Sherrington
 - Relie des neurones entre eux
 - Transmets l'influx nerveux chimiquement



Christy Krames, MA, CMI

Réseaux de neurones

- L'axone d'un neurone peut stimuler la dendrite d'un autre
- L'axone et la dendrite communiquent via des synapses

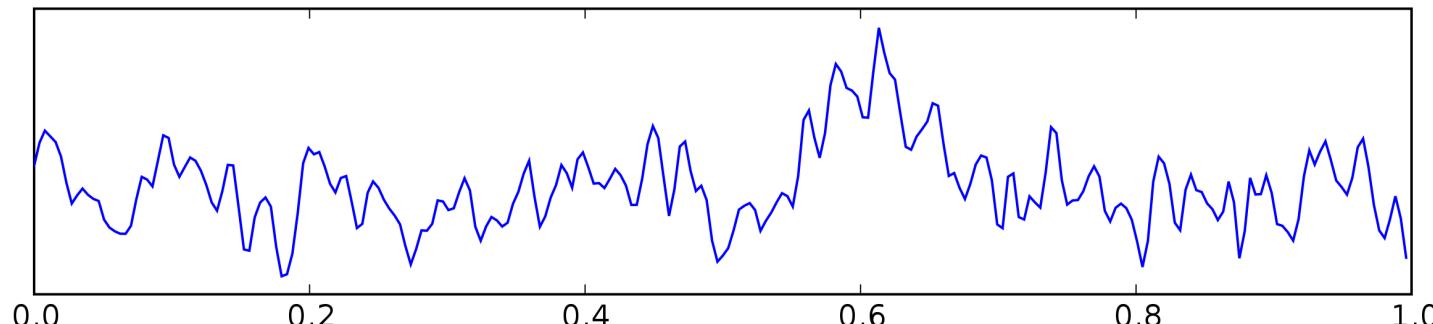


Pour aller plus loin: <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/le-neurone-et-l-influx-nerveux-s1286>

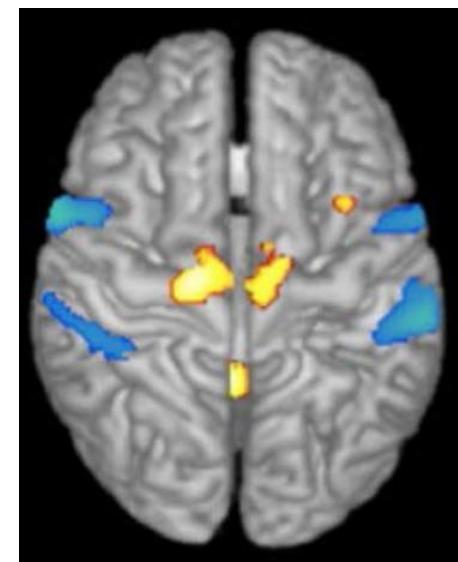
Fonctionnement du cerveau

- Electro Encéphalogramme, EEG (1920)
- IRM Fonctionnel (1992)
- Lien entre fonctionnalités cognitives et parties du cerveau

Le cerveau n'est pas qu'un gros ordinateur



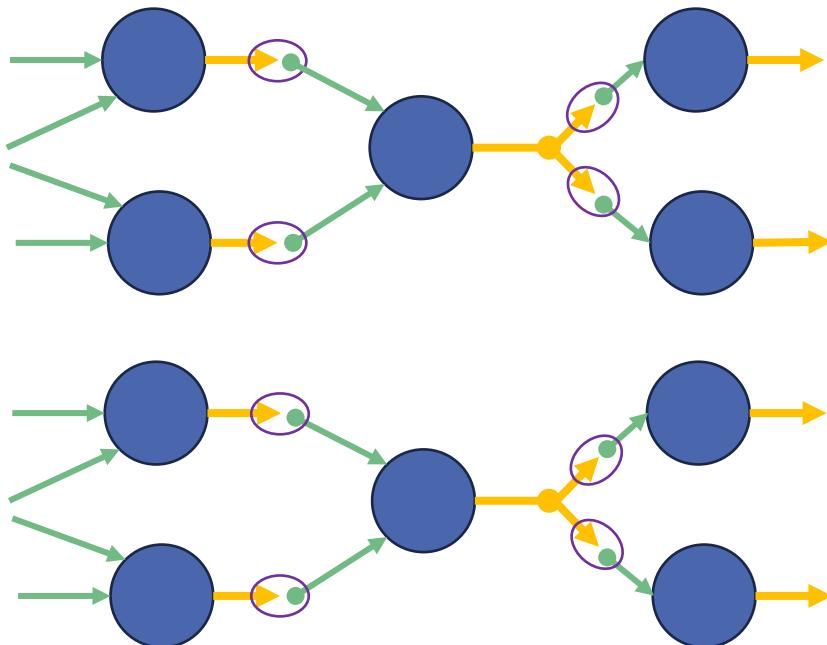
Signal EEG



IRM fonctionnel, (c) Institut du Cerveau, ICM

Réseaux de neurones

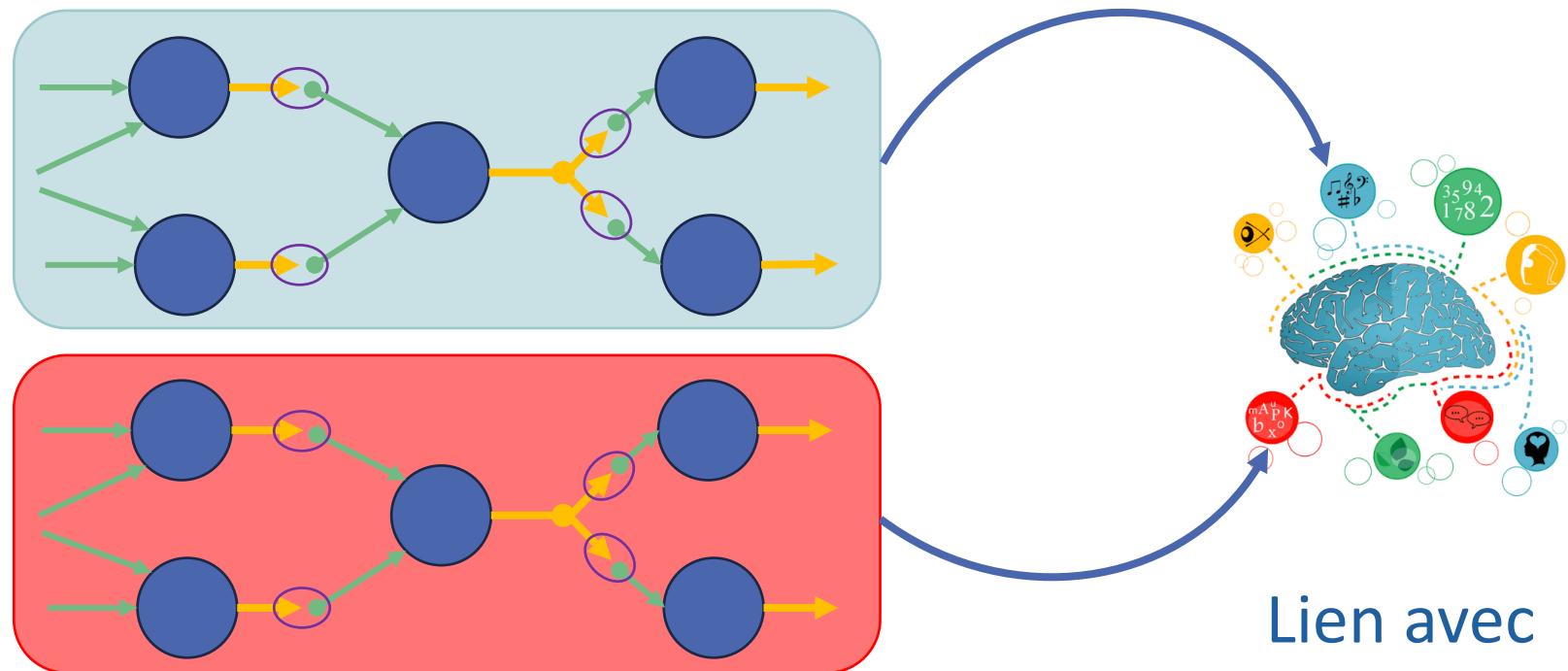
- Le cerveau est un **ensemble** de réseaux de neurones



Pour aller plus loin: <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/le-neurone-et-l-influx-nerveux-s1286>

Réseaux de neurones

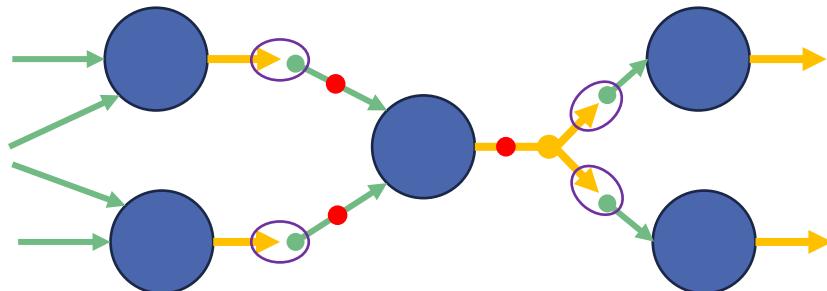
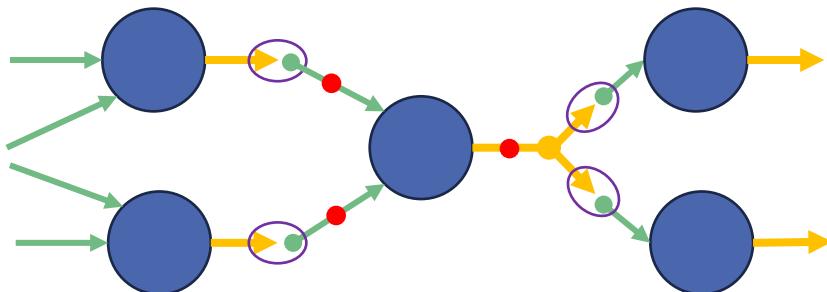
- Le cerveau est un **ensemble** de réseaux de neurones



Pour aller plus loin: <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/le-neurone-et-l-influx-nerveux-s1286>

Réseaux de neurones

- Le cerveau est un **ensemble** de réseaux de neurones



Quel est le vecteur de communication ?

Potentiel d'action

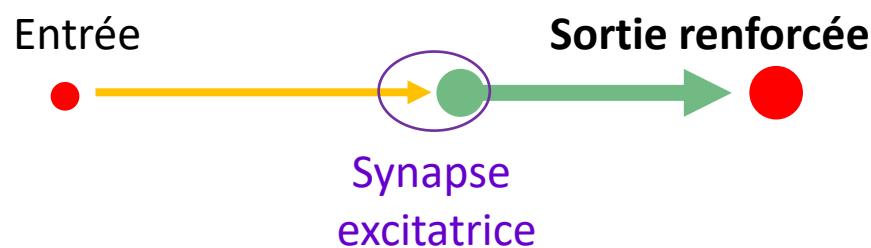
- Caractérise le signal transporté d'un neurone à l'autre via une synapse

Potentiel d'action

- Caractérise le signal transporté d'un neurone à l'autre via une synapse
- Deux types de synapses

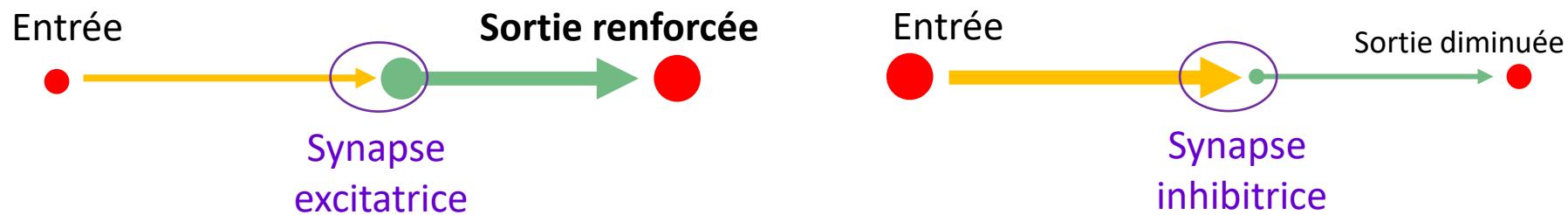
Potentiel d'action

- Caractérise le signal transporté d'un neurone à l'autre via une synapse
- Deux types de synapses
 - **Excitatrices:** Favorise le Potentiel d'action



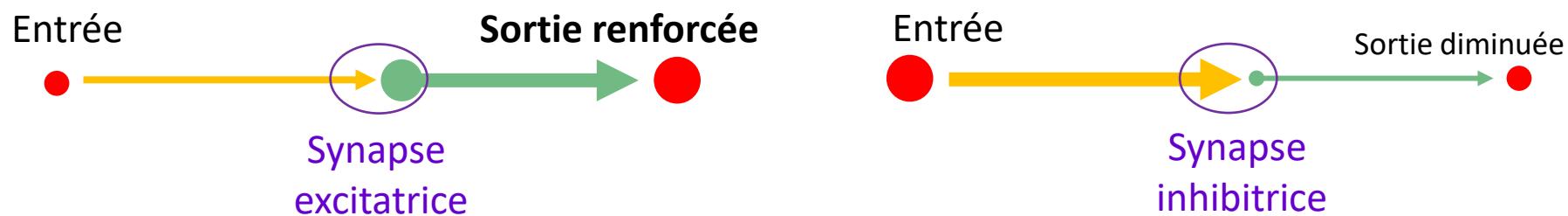
Potentiel d'action

- Caractérise le signal transporté d'un neurone à l'autre via une synapse
- Deux types de synapses
 - **Excitatrices:** Favorise le Potentiel d'action
 - **Inhibitrices:** Empêche le Potentiel d'action



Potentiel d'action

- Caractérise le signal transporté d'un neurone à l'autre via une synapse
- Deux types de synapses
 - **Excitatrices:** Favorise le Potentiel d'action
 - **Inhibitrices:** Empêche le Potentiel d'action
- Agissent comme des filtres

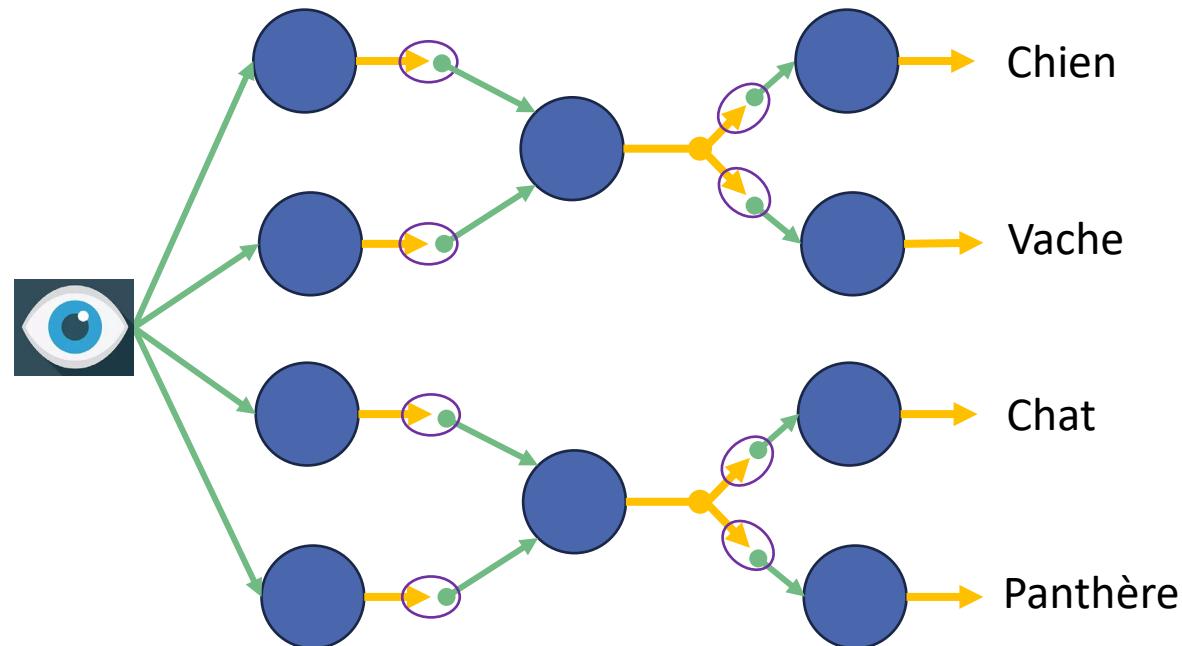


Fonctionnement du cerveau

- **Potentiel d'action**: signal transitant dans les composants du cerveau
- **Neurone**: laisse passer ou bloque un **Potentiel d'action**
- **Synapse**
 - Excitatrice: Amplifie le **Potentiel d'action**
 - Inhibitrice: Diminue le **Potentiel d'action**

Réseaux de neurones

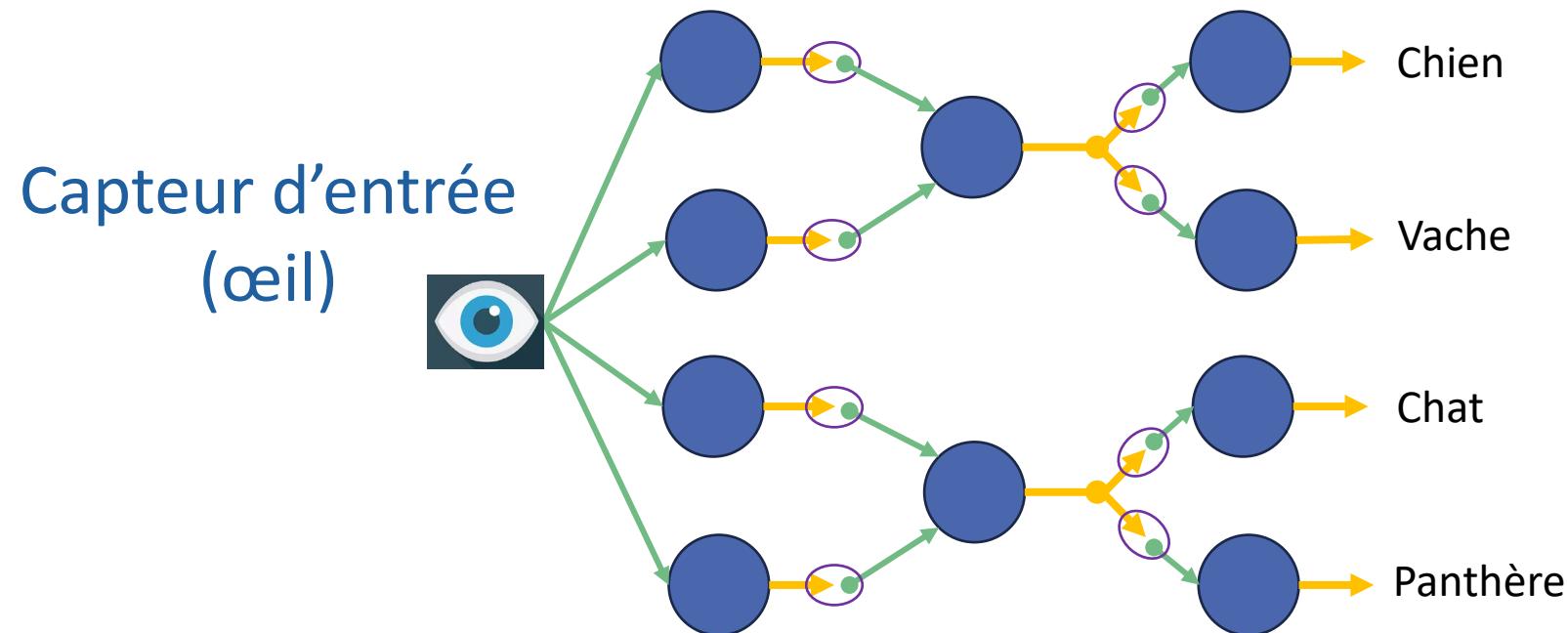
■ Fonctionnement



Réseau de neurone de l'identification visuelle

Réseaux de neurones

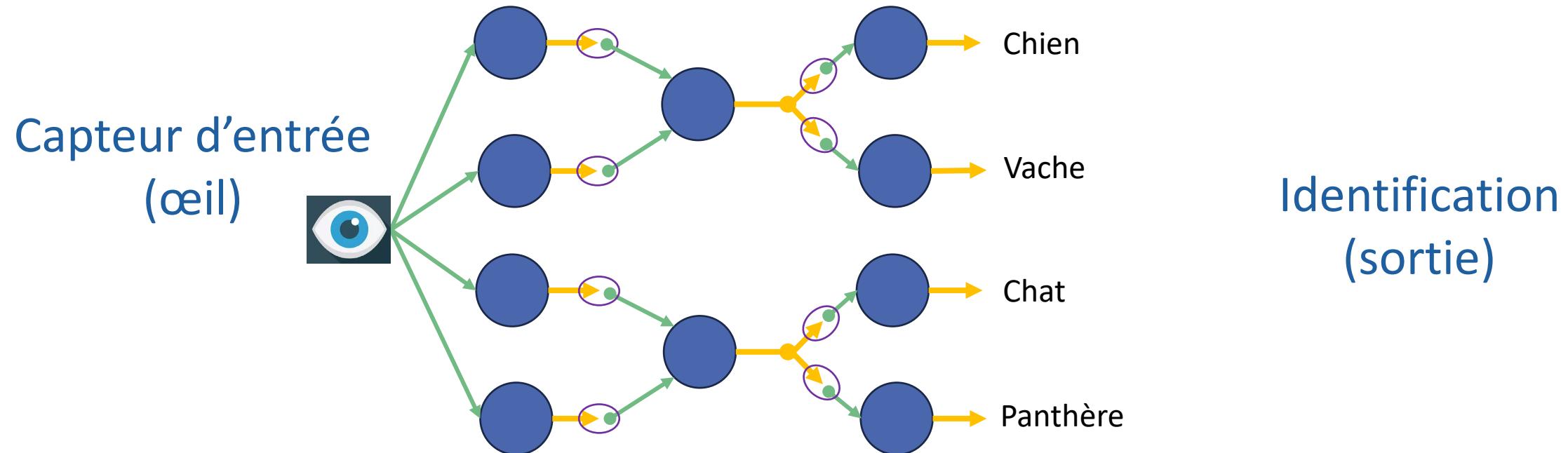
■ Fonctionnement



Réseau de neurone de l'identification visuelle

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



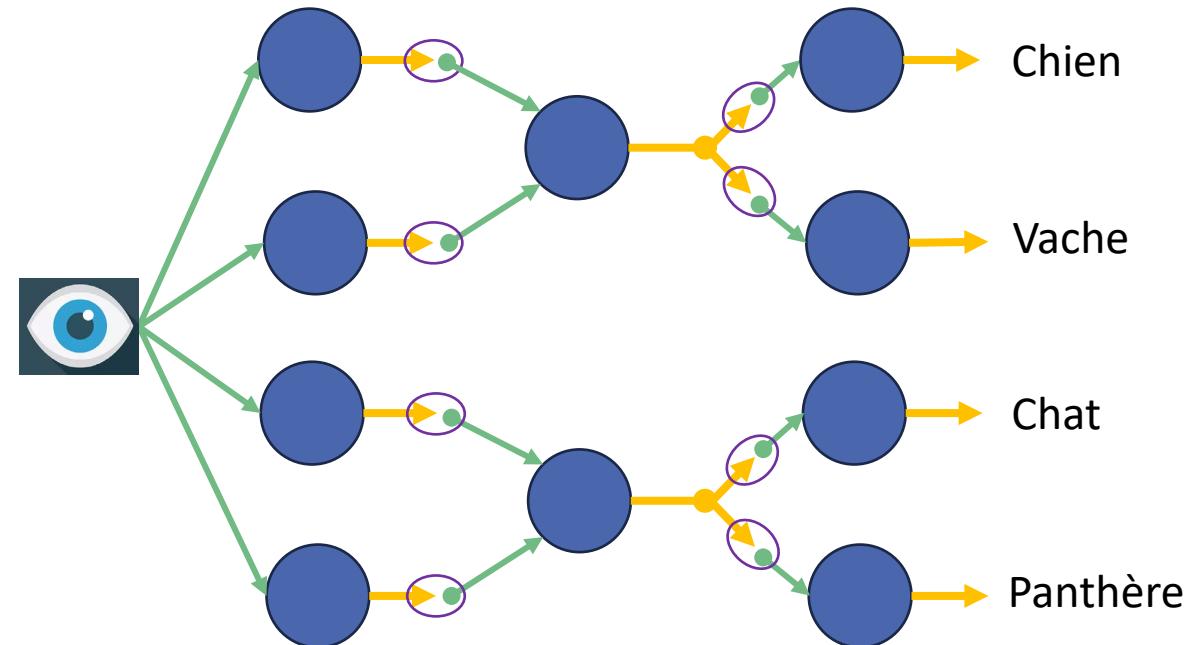
Réseau de neurone de l'identification visuelle

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Stimulus

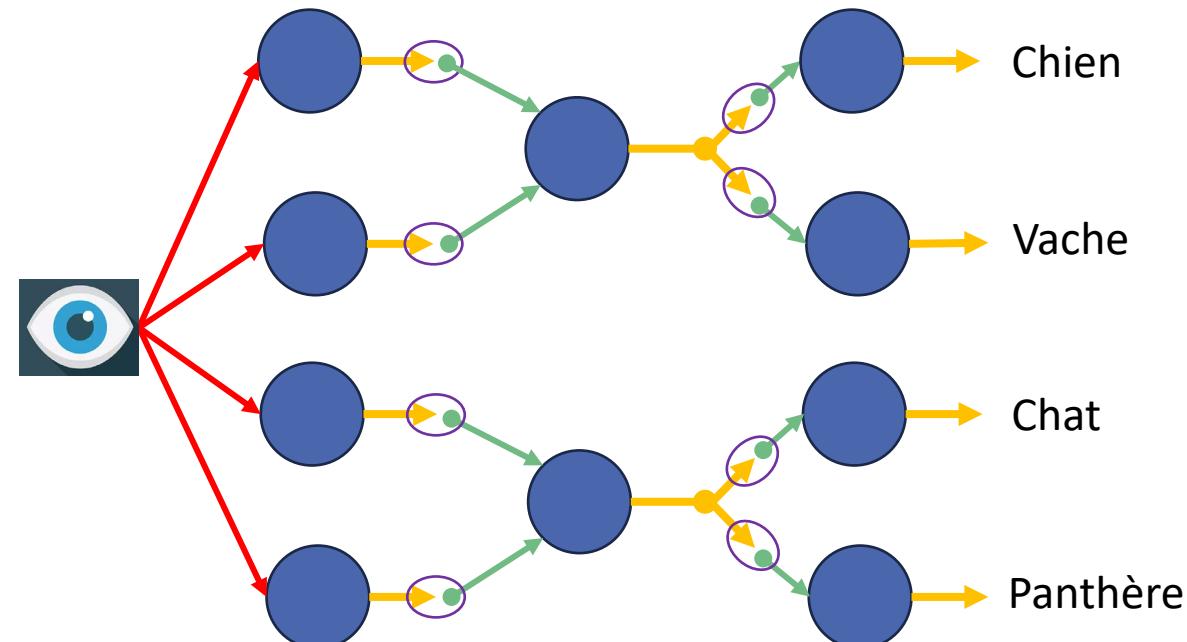


Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Stimulus



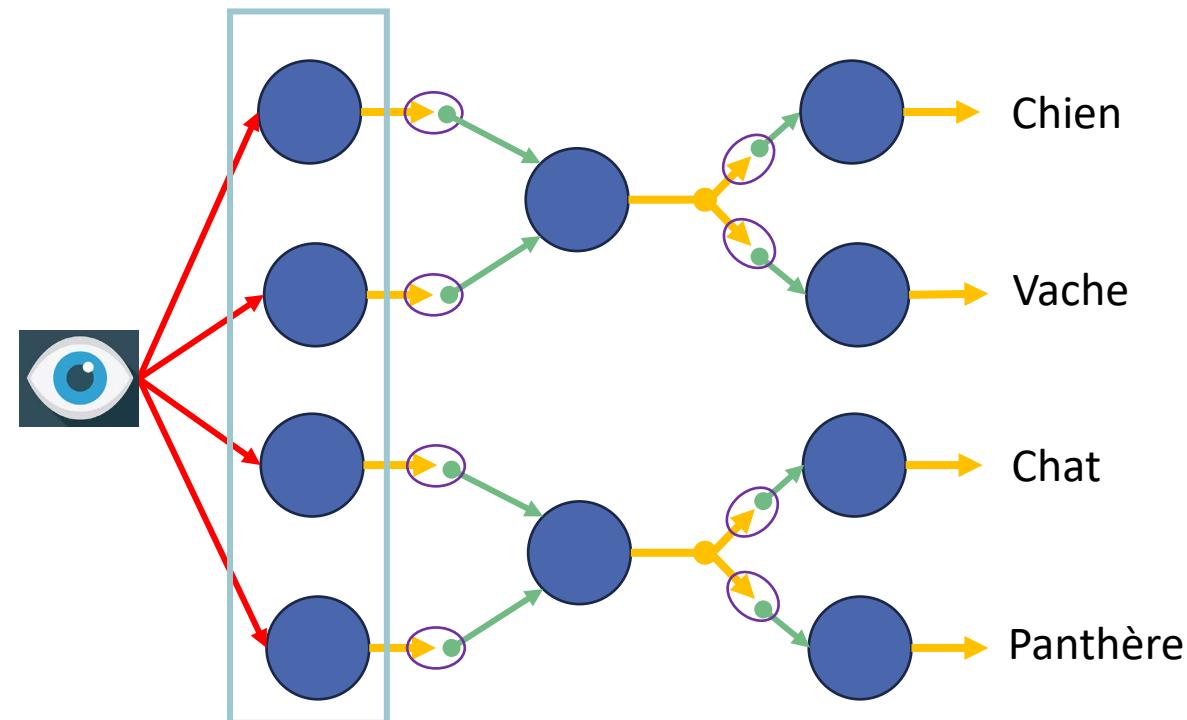
Propagation du potentiel d'action

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Stimulus



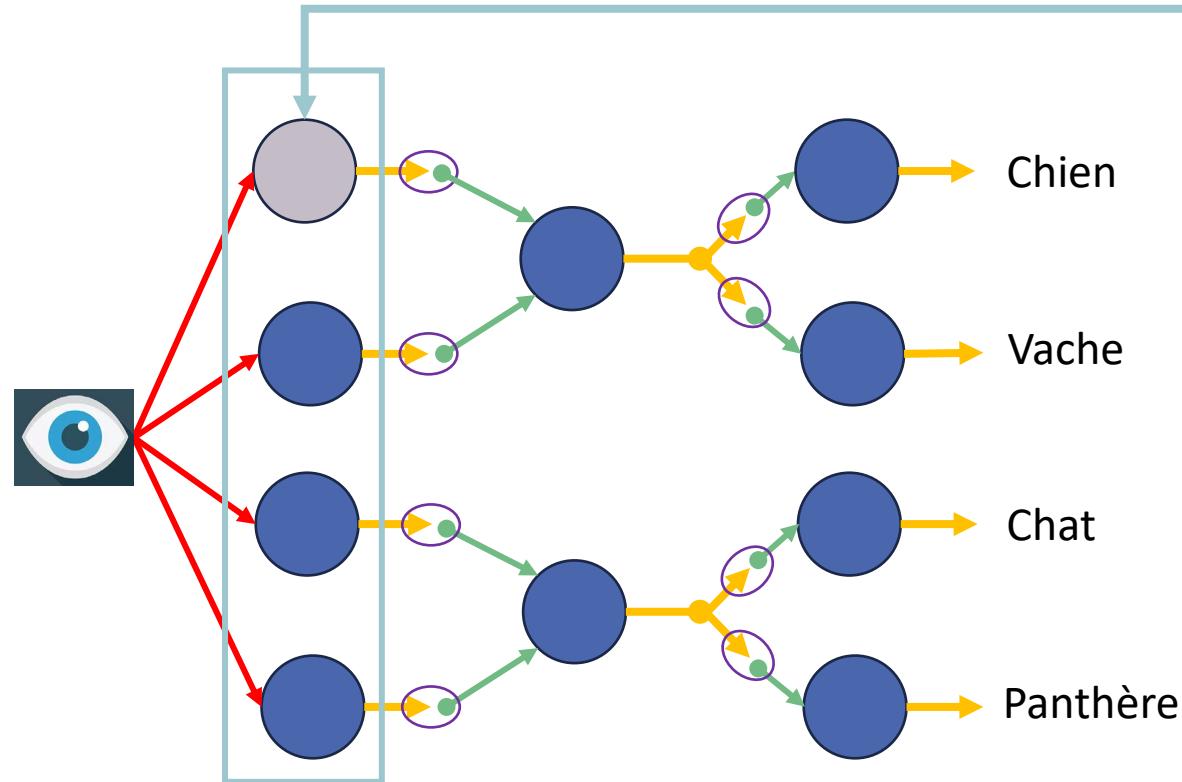
Passage de la première couche

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Stimulus



Passage de la première couche

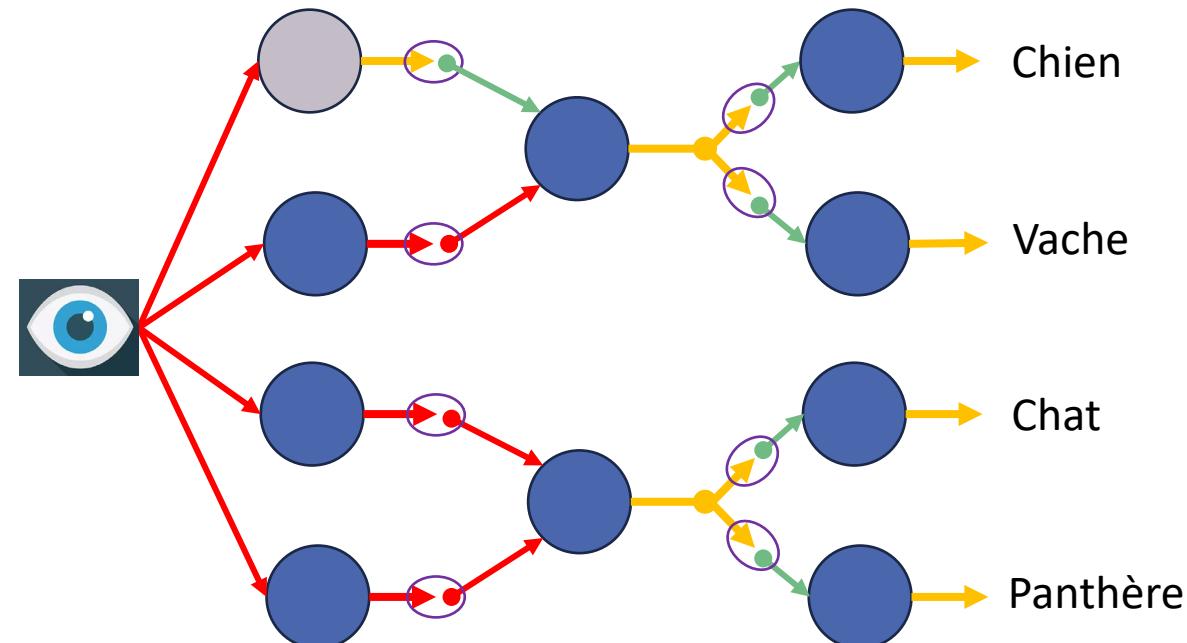
Neurone non activé
(PA trop faible)

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Stimulus



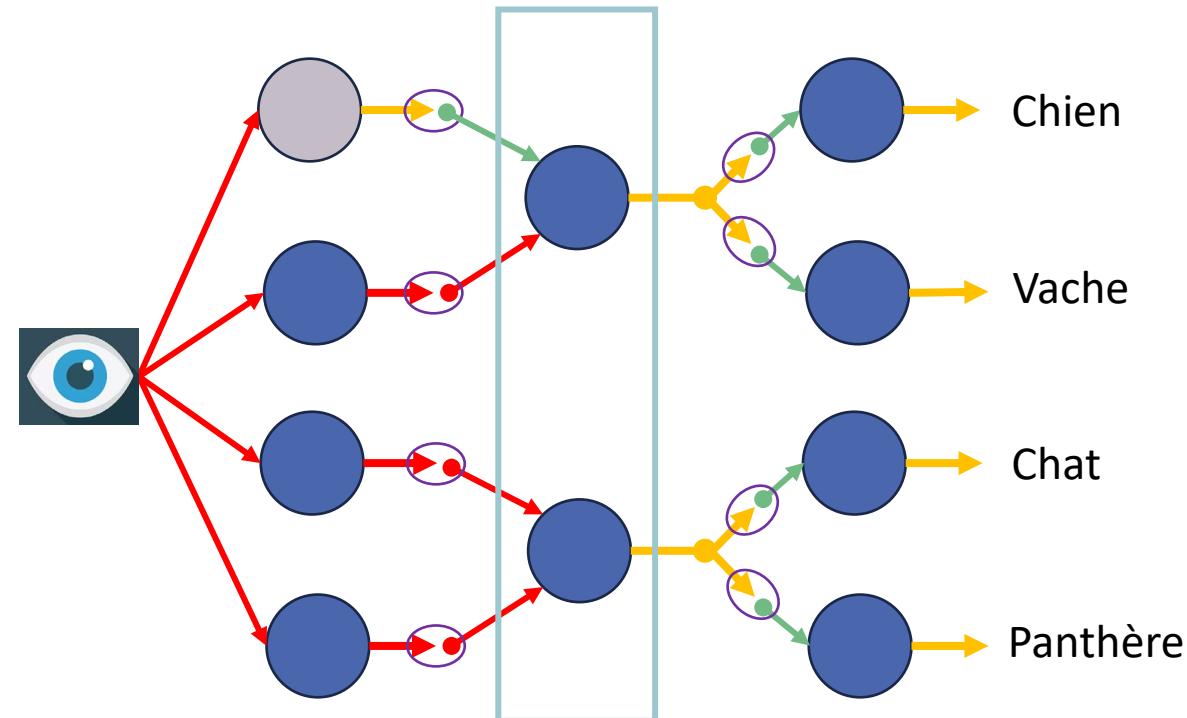
Transmission du PA à la couche suivante

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Stimulus



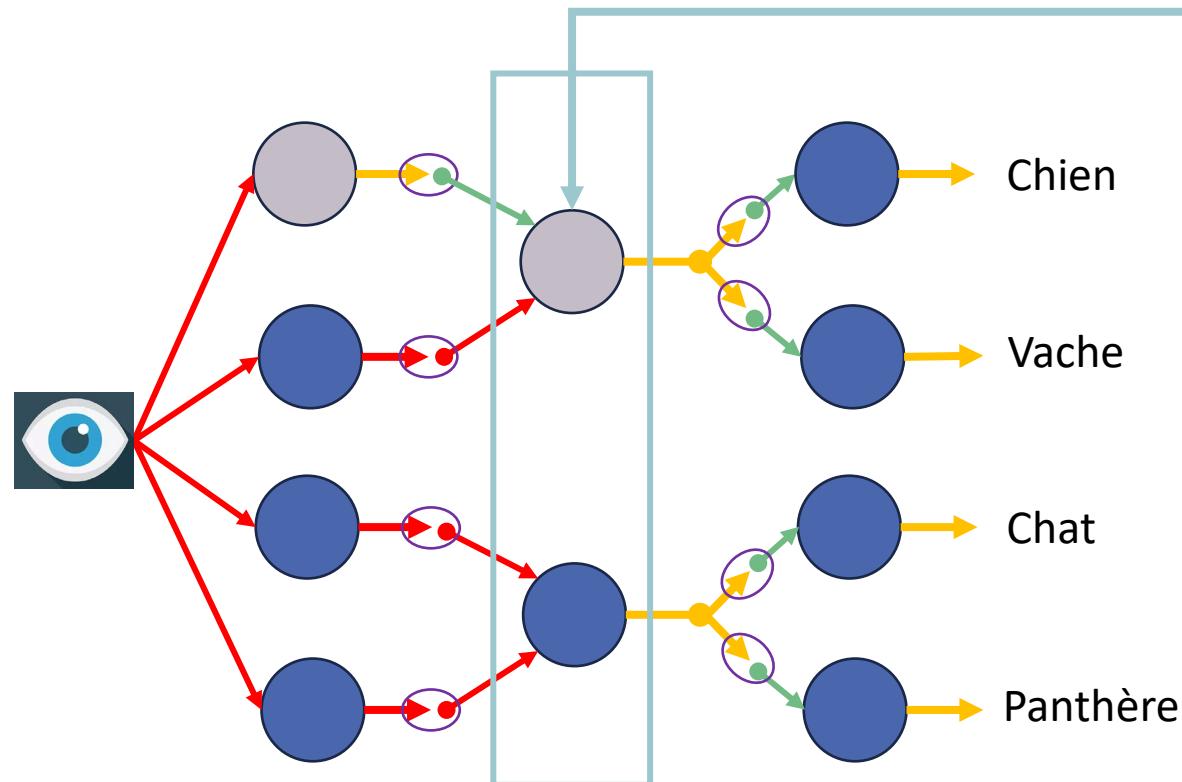
Passage de la deuxième couche

Réseaux de neurones

Fonctionnement



Stimulus



Neurone non activé (PA trop faible)

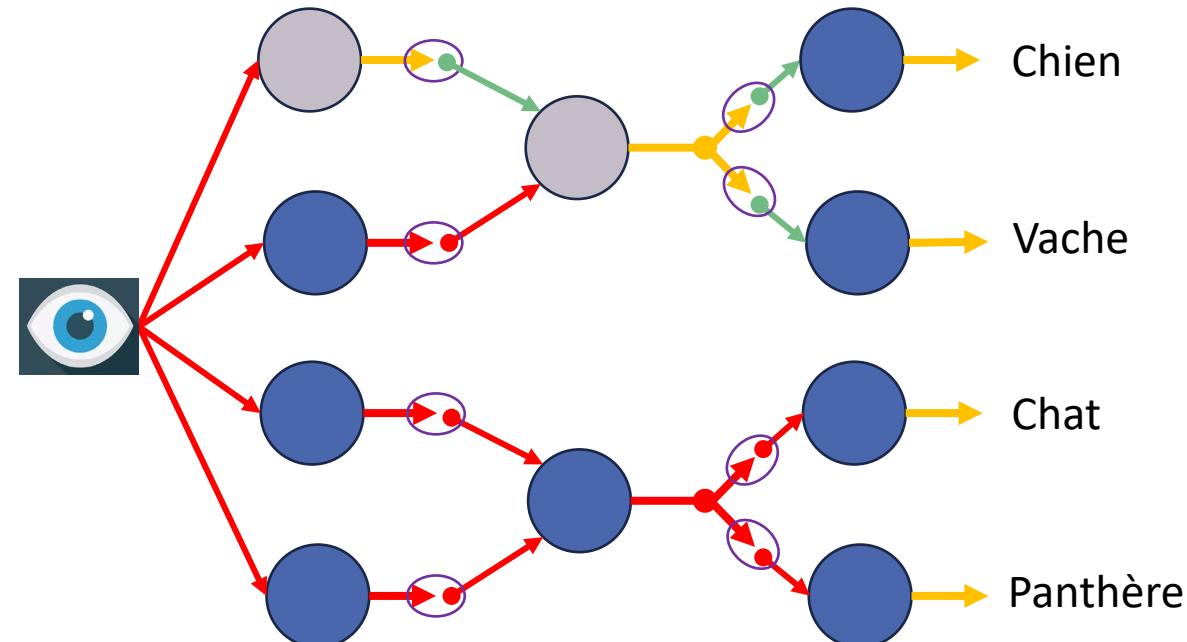
Passage de la deuxième couche

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Stimulus



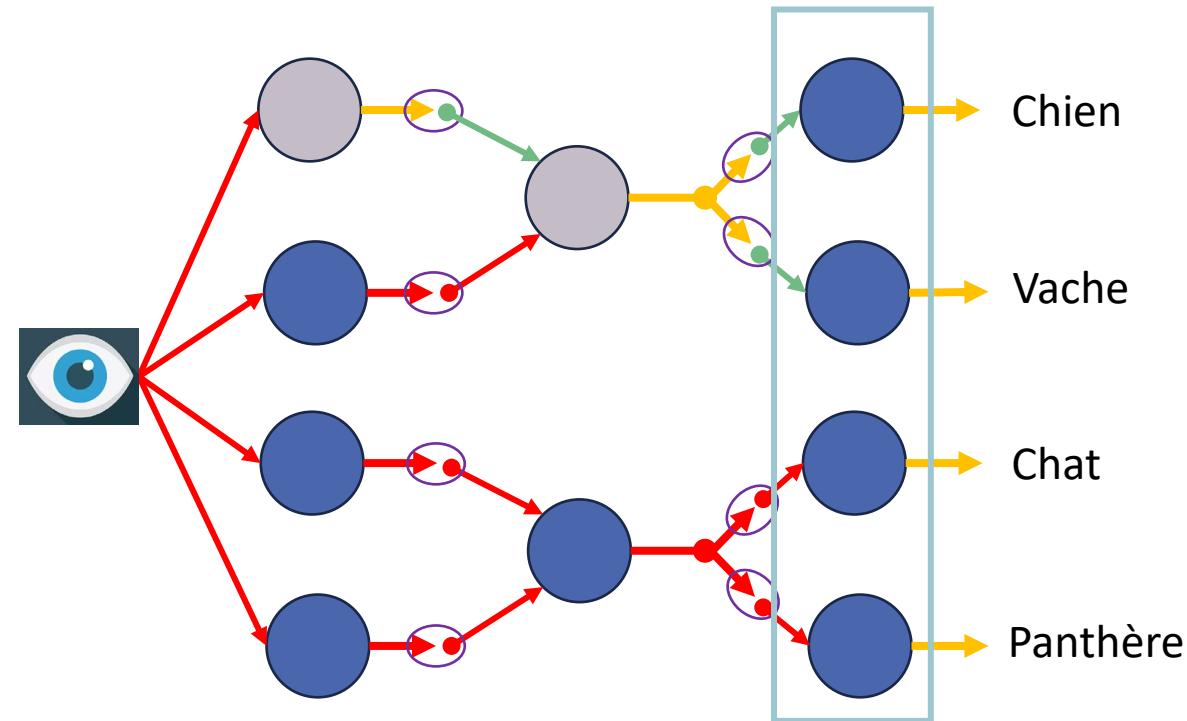
Transmission du PA à la couche suivante

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



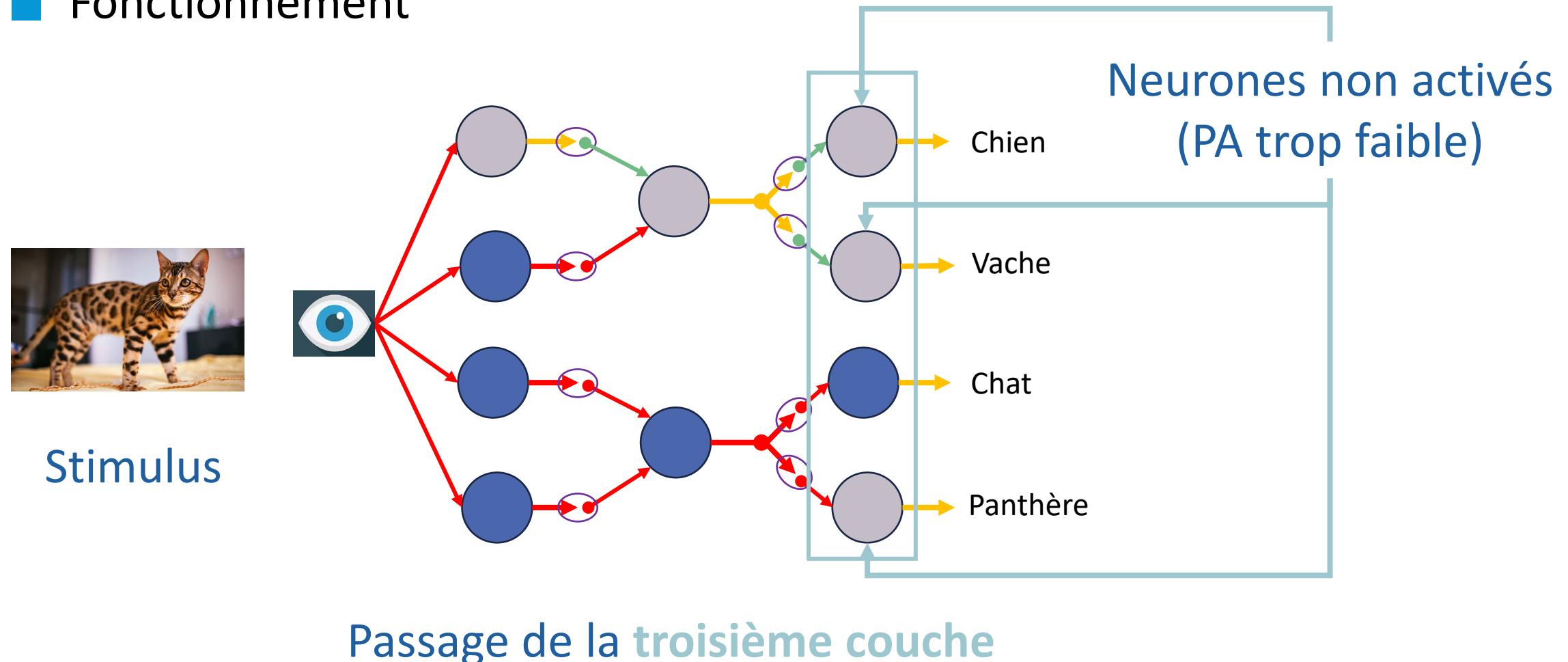
Stimulus



Passage de la troisième couche

Réseaux de neurones

Fonctionnement

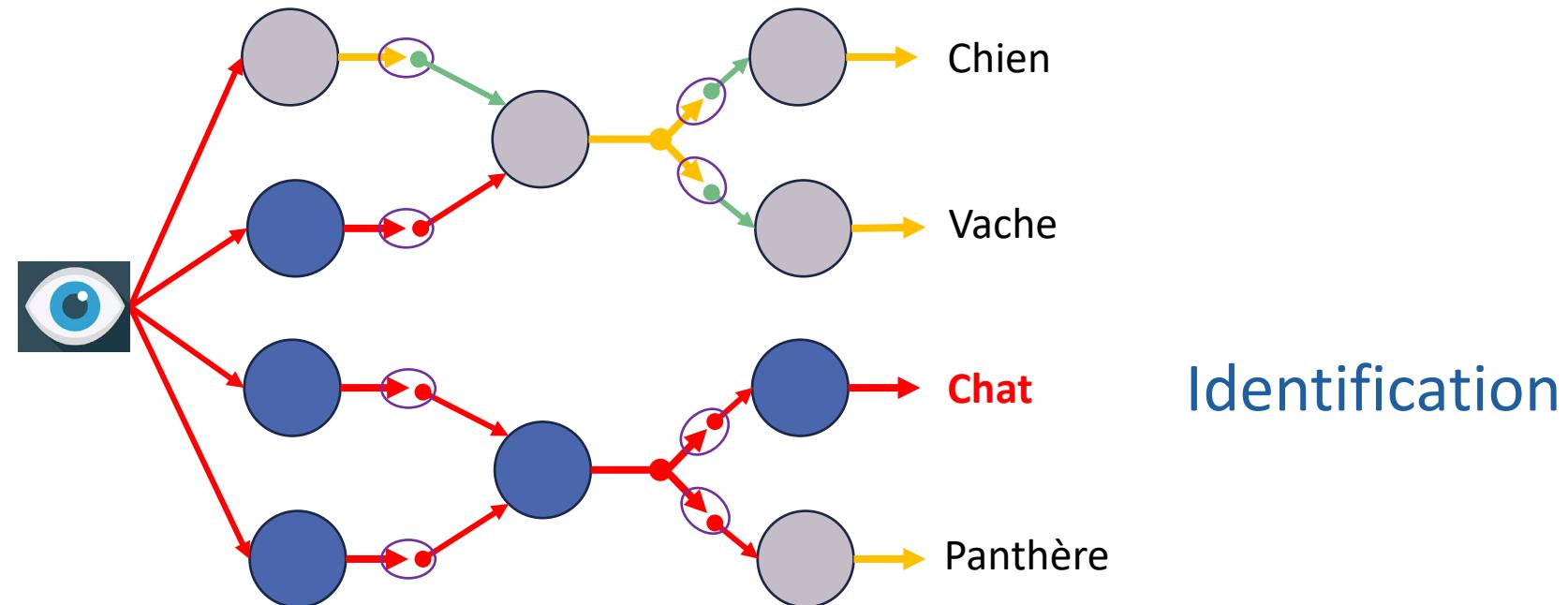


Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



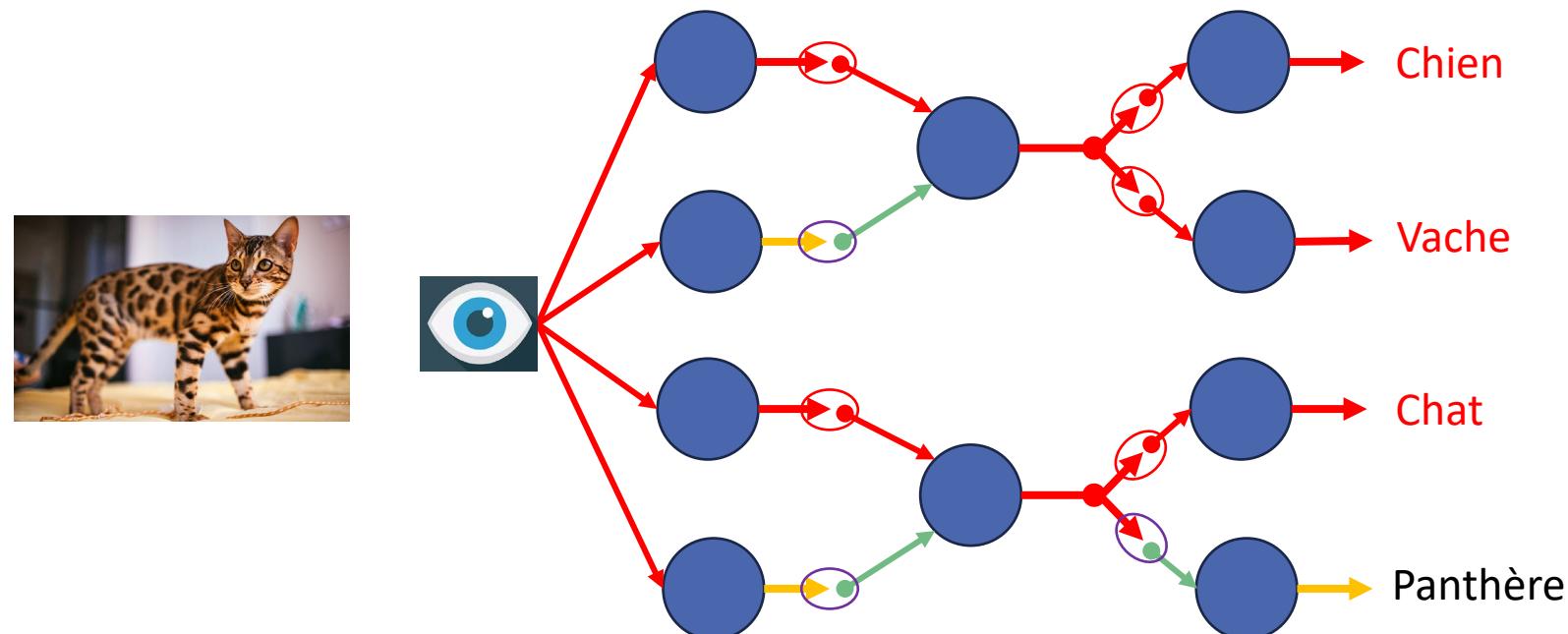
Stimulus



Identification

Réseaux de neurones

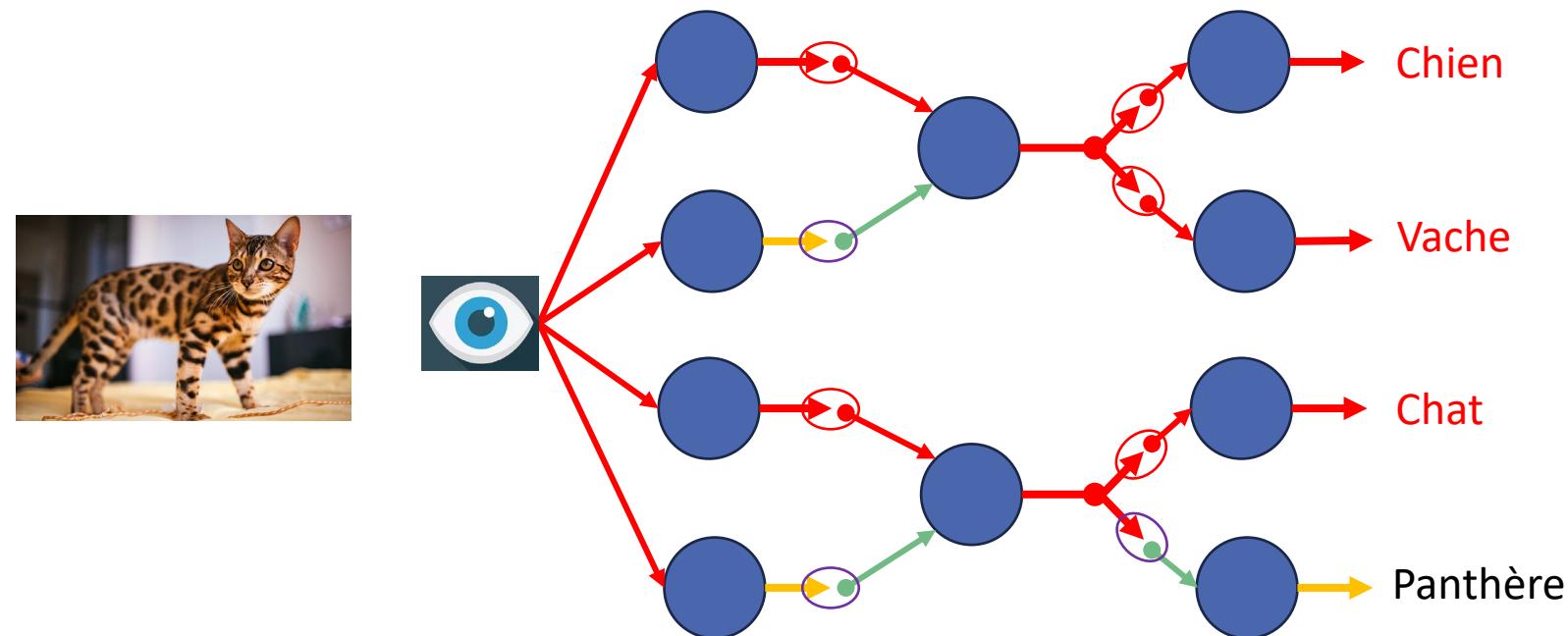
■ Apprentissage



Fabriquer un chemin pour le potentiel d'action qui mène à la sortie voulue

Réseaux de neurones

■ Apprentissage

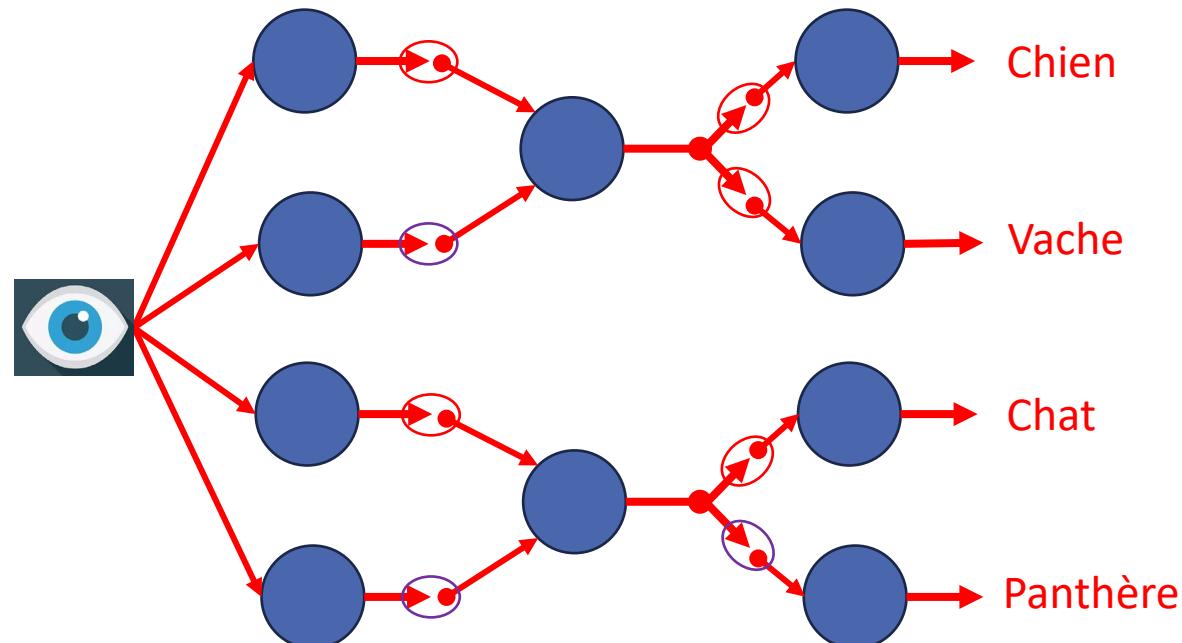


Fixe: Organisations des neurones

Variable: Capacité des synapses

Réseaux de neurones

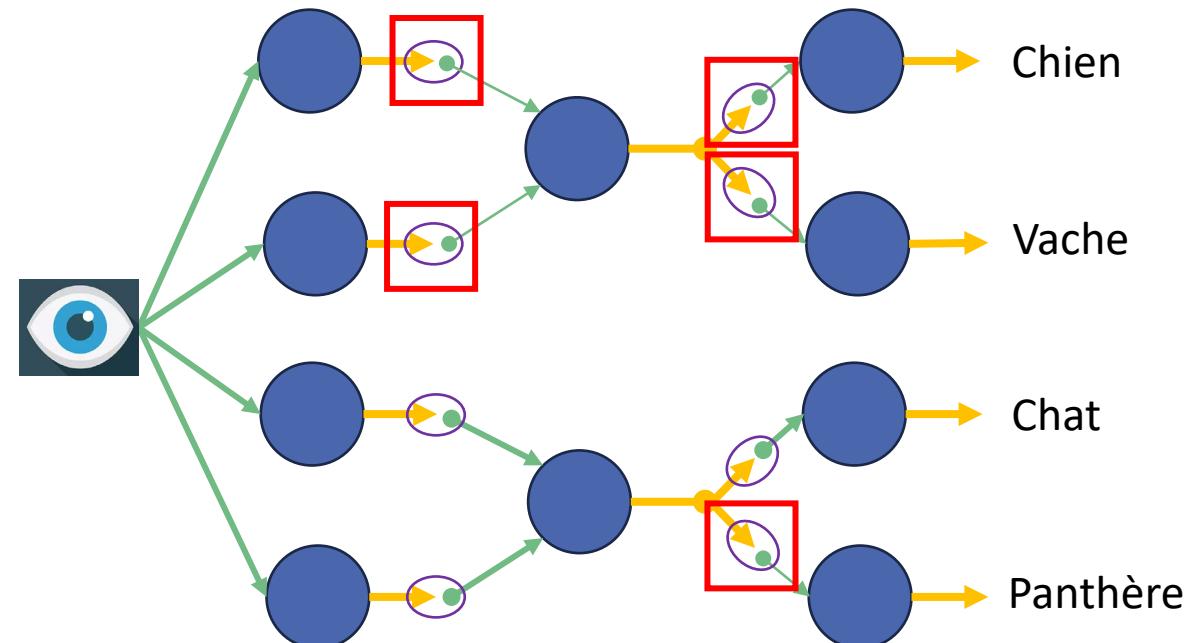
■ Apprentissage



On ne sait pas distinguer de quel animal il s'agit

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

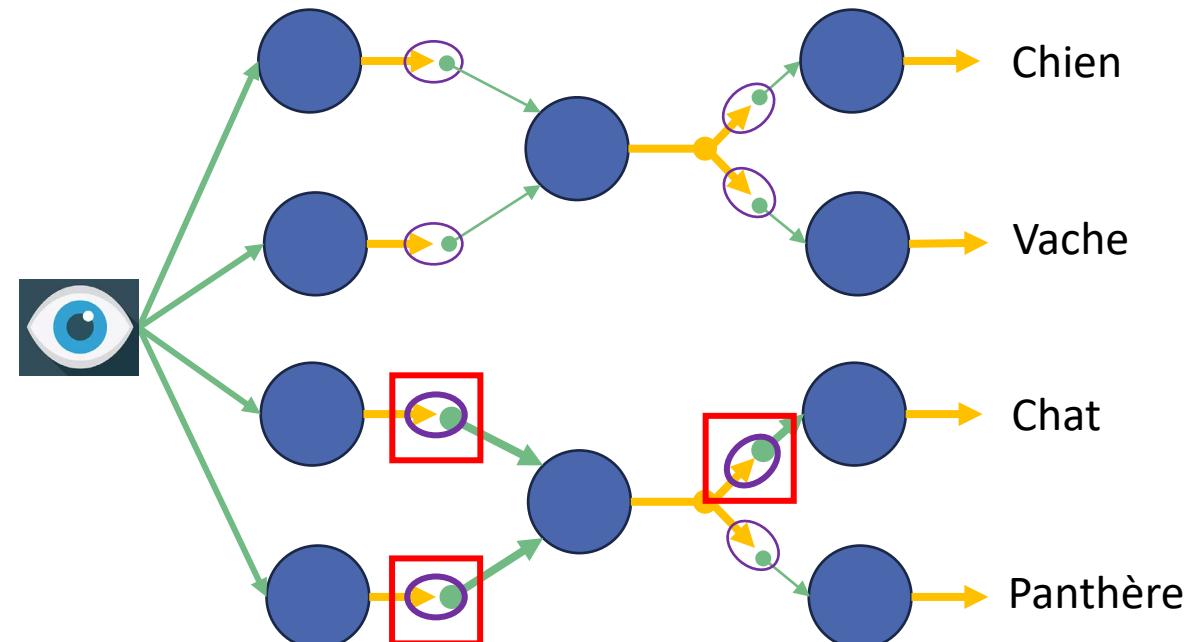


Correction

Inhibition des synapses
menant à une mauvaise
réponse

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

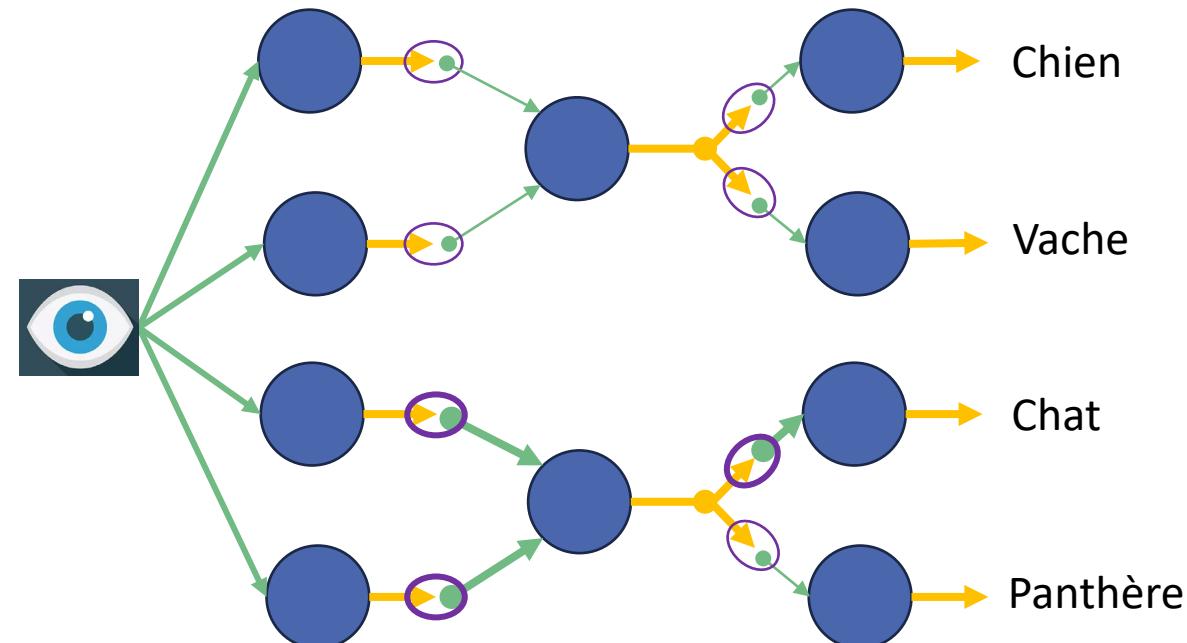


Correction

Excitation des synapses
menant à une bonne
réponse

Réseaux de neurones

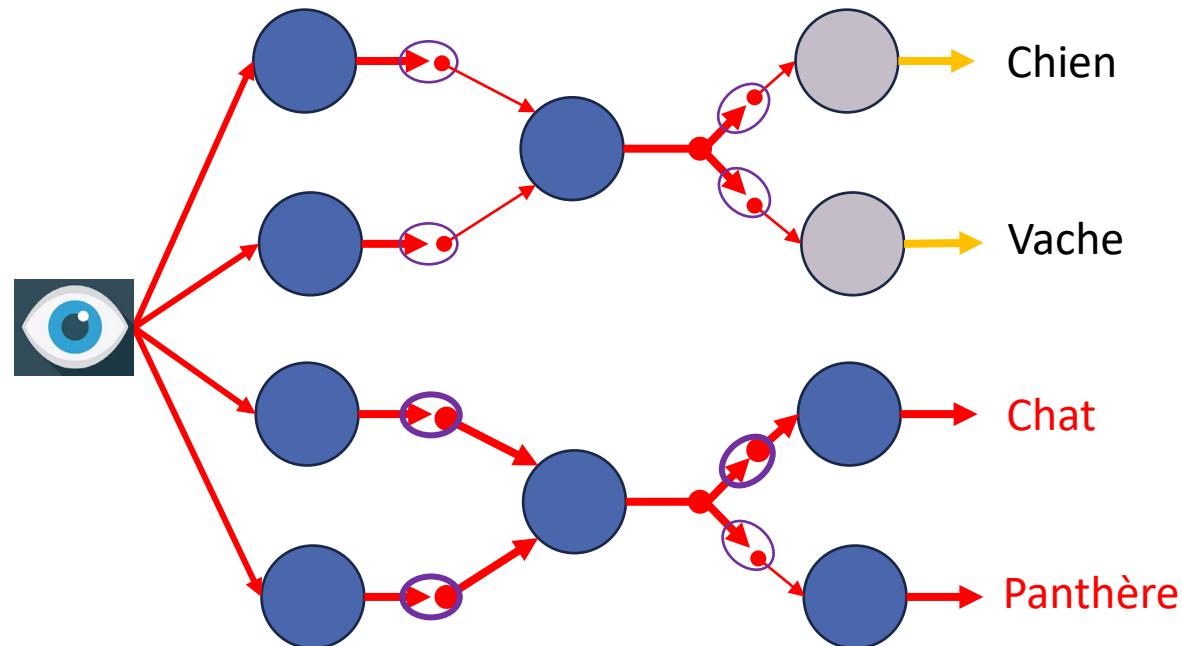
■ Fonctionnement



Interrogation

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

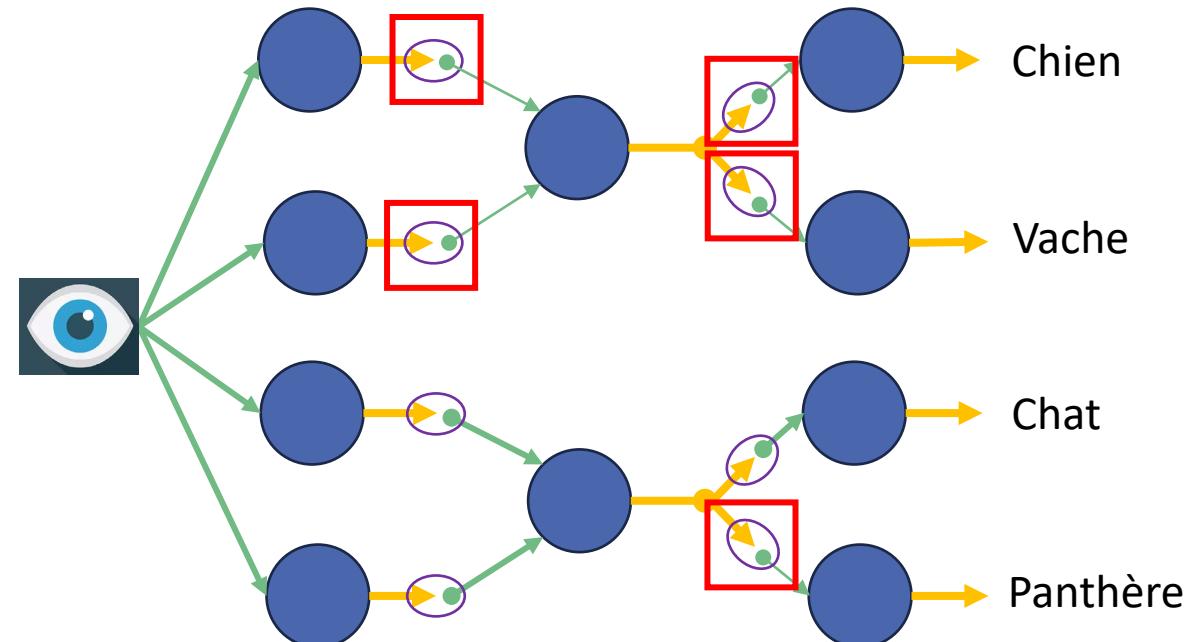


Interrogation

Certains neurones ne s'activent plus à cause de l'inhibition du PA

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

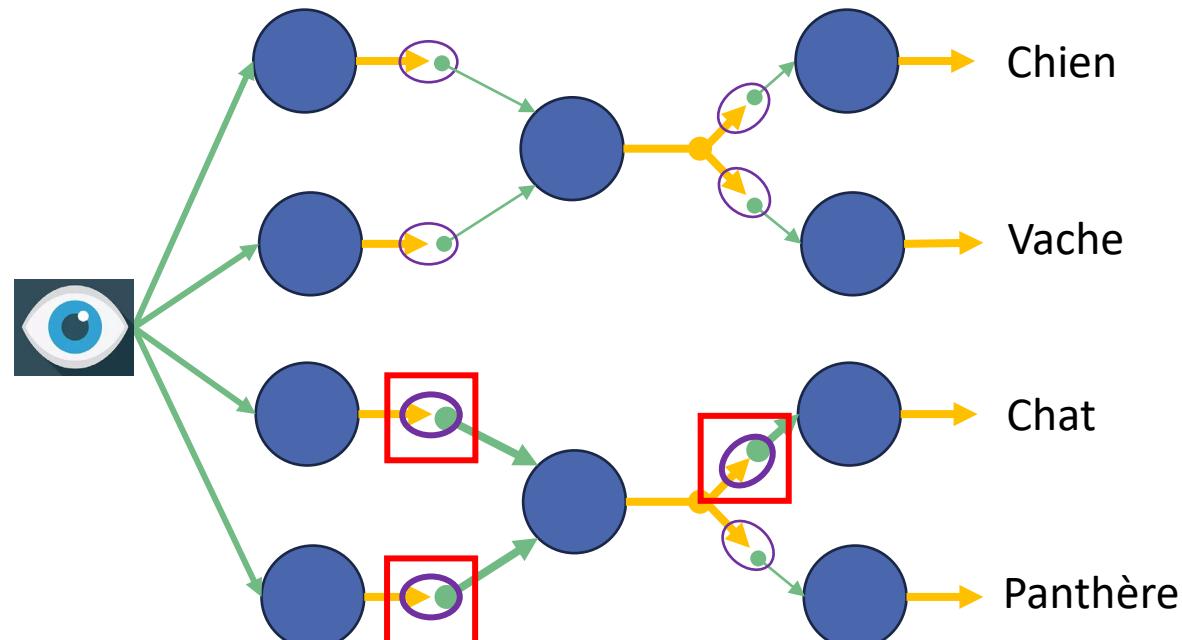


Correction

Inhibition des synapses
menant à une mauvaise
réponse

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

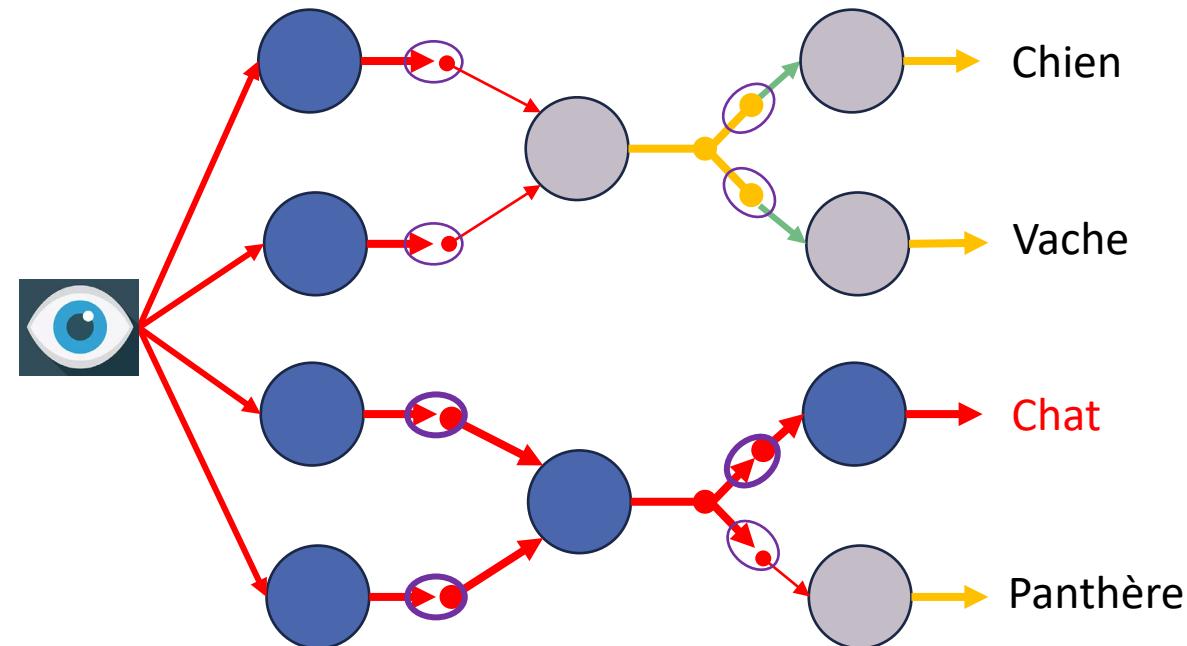


Correction

Excitation des synapses
menant à une bonne
réponse

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

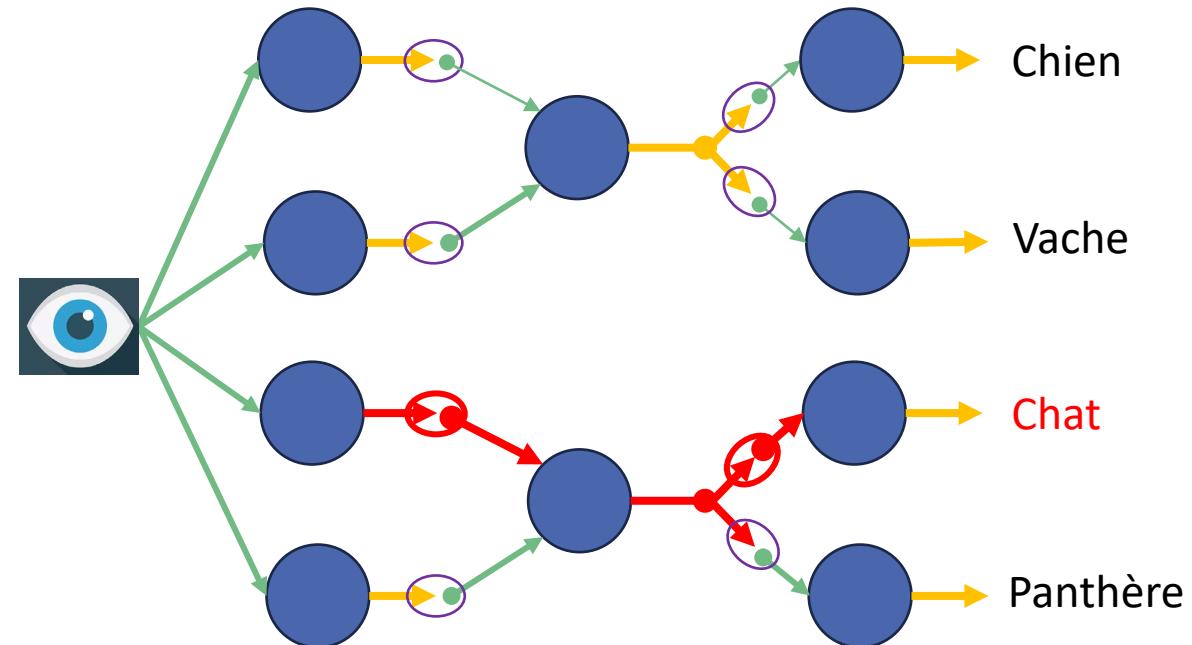


Interrogation

Certains neurones ne s'activent plus à cause de l'inhibition du PA

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Validation



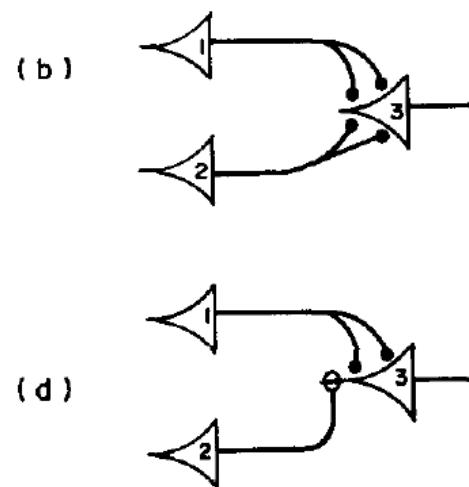
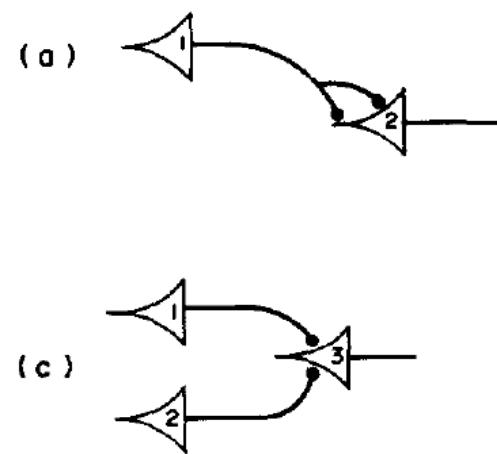
Neurone M-P

■ Travaux de Warren McCulloch et Walter Pitts en 1943

■ *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity,*

Bulletin of Mathematical Biophysics 5, 115–133 (1943)

<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02478259>



- (a) $N_2(t) \cdot \equiv . N_1(t-1);$
- (b) $N_3(t) \cdot \equiv . N_1(t-1) \vee N_2(t-1);$
- (c) $N_3(t) \cdot \equiv . N_1(t-1) \cdot N_2(t-1);$
- (d) $N_3(t) \cdot \equiv N_1(t-1) \cdot \sim N_2(t-1);$

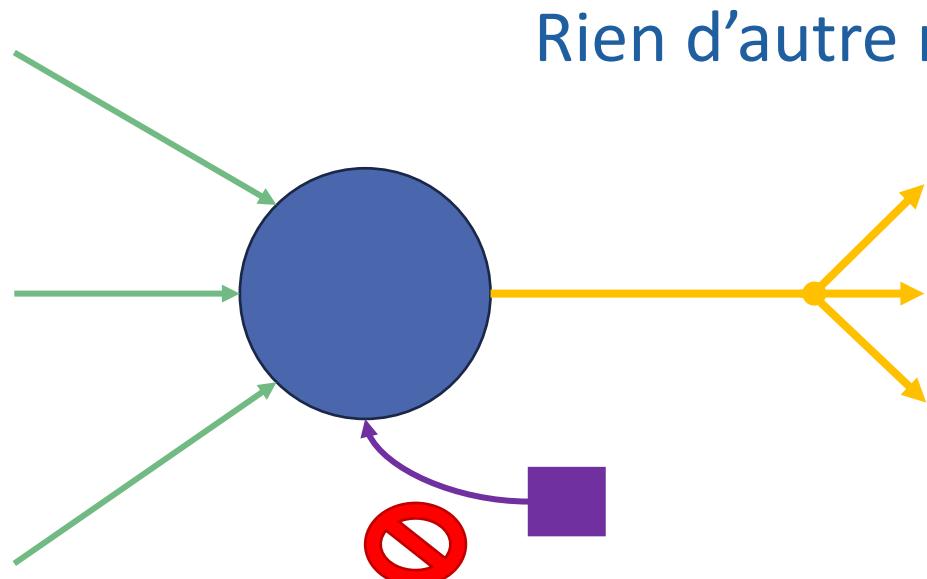
5 postulats

- L'activité d'un neurone est de type « **tout ou rien** »

Un neurone bloque ou laisse passer le signal tel quel

5 postulats

- L'activité d'un neurone est de type « tout ou rien »
- L'activation d'un neurone dépend **uniquement de la valeur des signaux entrant** à un instant t



Rien d'autre ne peut influer sur l'activation d'un neurone

5 postulats

- L'activité d'un neurone est de type « tout ou rien »
- L'activation d'un neurone dépend uniquement de la valeur des signaux entrant à un instant t
- La structure d'un réseau de neurone **ne varie pas dans le temps**

La structure est fixe (pas de nouveaux neurones / nouvelles synapses) et pas de disparition

5 postulats

- L'activité d'un neurone est de type « tout ou rien »
- L'activation d'un neurone dépend uniquement de la valeur des signaux entrant à un instant t
- La structure d'un réseau de neurone ne varie pas dans le temps
- Le délai de réponse d'un neurone est fonction de la vitesse synaptique

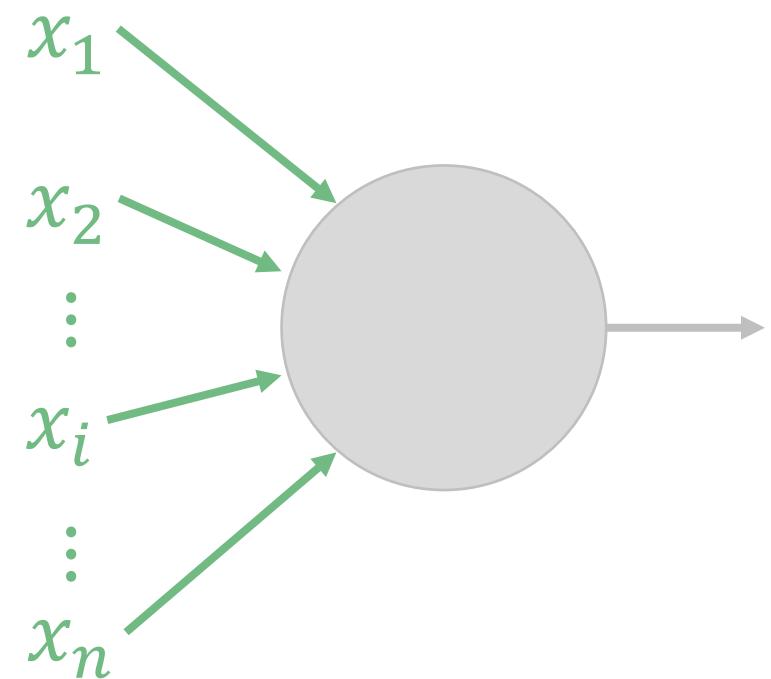
Tout neurone calcule en temps fixe

5 postulats

- L'activité d'un neurone est de type « tout ou rien »
- L'activation d'un neurone dépend uniquement de la valeur des signaux entrant à un instant t
- La structure d'un réseau de neurone ne varie pas dans le temps
- Le délai de réponse d'un neurone est fonction de la vitesse synaptique
- L'inhibition d'une synapse (dendrite) d'entrée neutralise le neurone

Formalisation

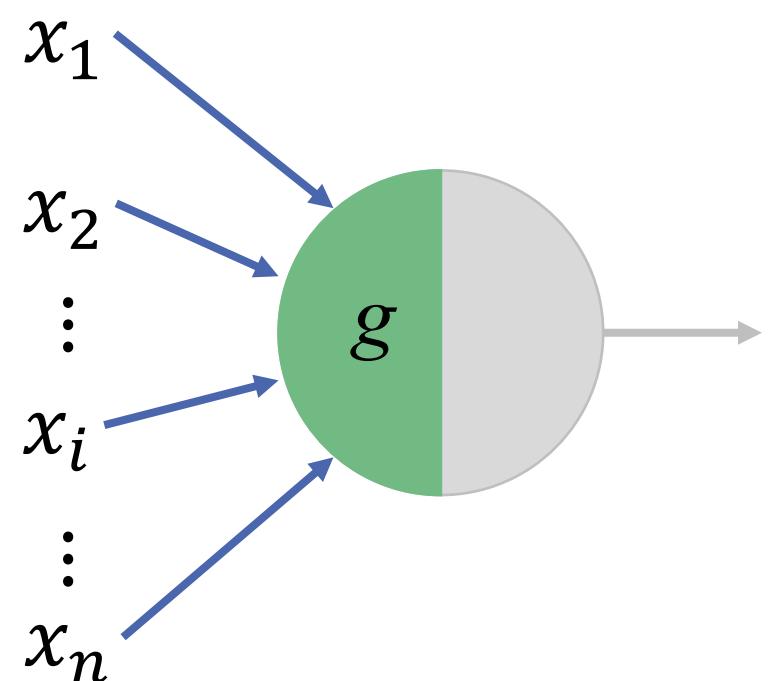
- Vecteur d'entrée $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n), x_i \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq n$



Formalisation

- Vecteur d'entrée $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$, $x_i \in \{0,1\}$, $1 \leq i \leq n$
- Fonction d'agrégation

$$g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i$$



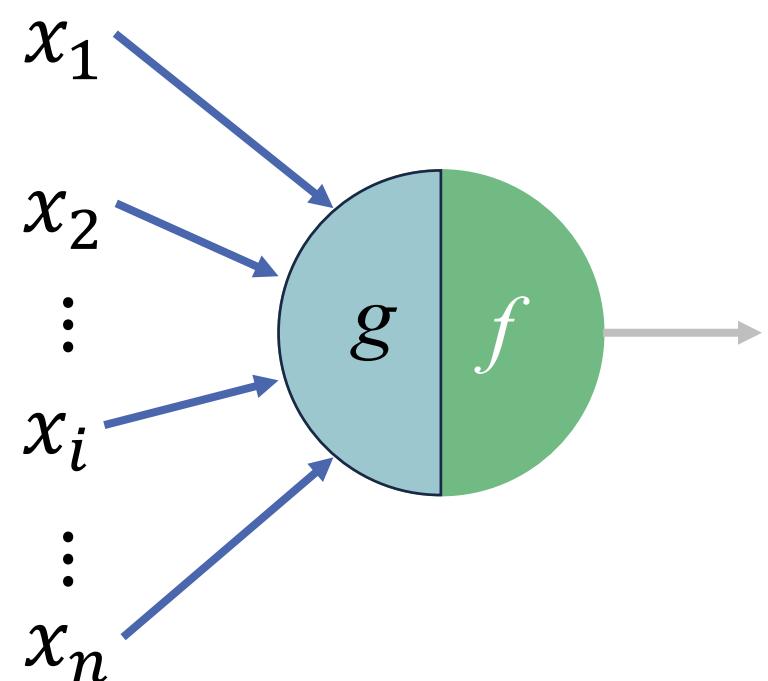
Formalisation

- Vecteur d'entrée $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$, $x_i \in \{0,1\}$, $1 \leq i \leq n$
- Fonction d'agrégation

$$g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i$$

- Fonction d'activation

$$f(g(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } g(x) \geq \theta \\ 0 & \text{si } g(x) < \theta \end{cases} \quad \theta \in \mathbb{N}$$



Formalisation

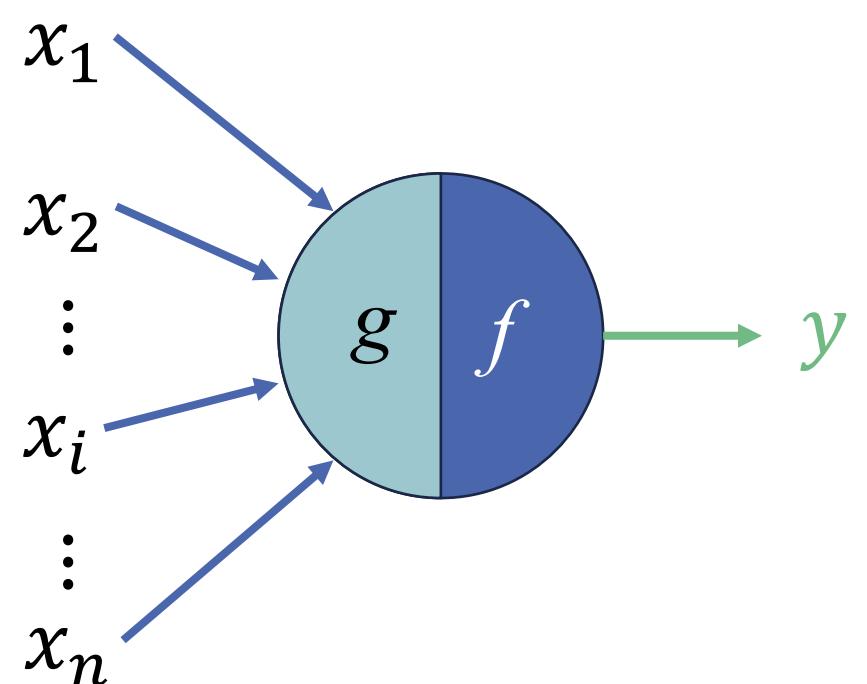
- Vecteur d'entrée $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n), x_i \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq n$
- Fonction d'agrégation

$$g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i$$

- Fonction d'activation

$$f(g(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } g(x) \geq \theta \\ 0 & \text{si } g(x) < \theta \end{cases}, \theta \in \mathbb{N}$$

- Valeur de sortie $y = f(g(x)), y \in \{0,1\}$



Formalisation

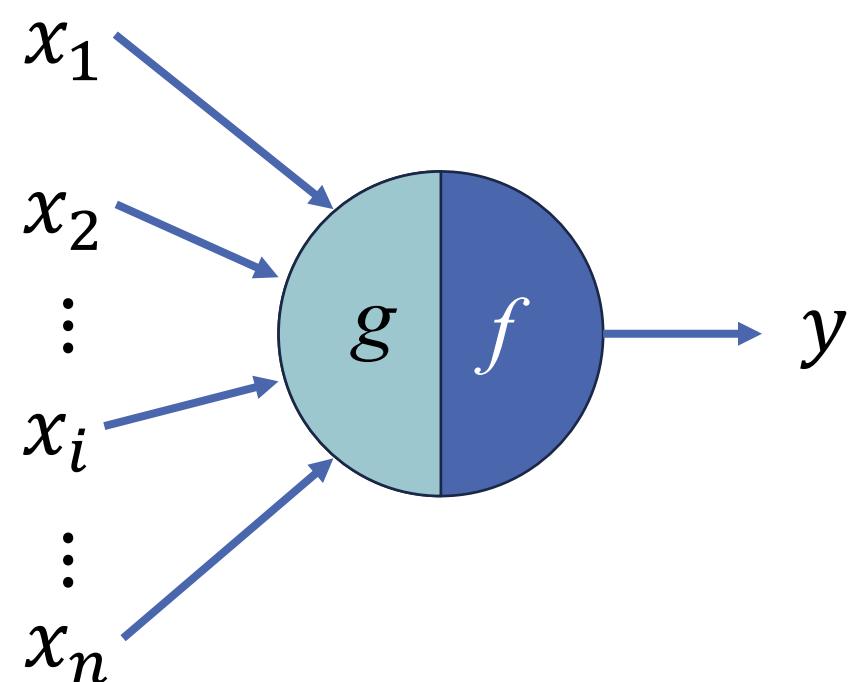
- Vecteur d'entrée $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n), x_i \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq n$
- Fonction d'agrégation

$$g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i$$

- Fonction d'activation

$$f(g(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } g(x) \geq \theta \\ 0 & \text{si } g(x) < \theta \end{cases}, \theta \in \mathbb{N}$$

- Valeur de sortie $y = f(g(x)), y \in \{0,1\}$



<https://towardsdatascience.com/mcculloch-pitts-model-5fdf65ac5dd1>

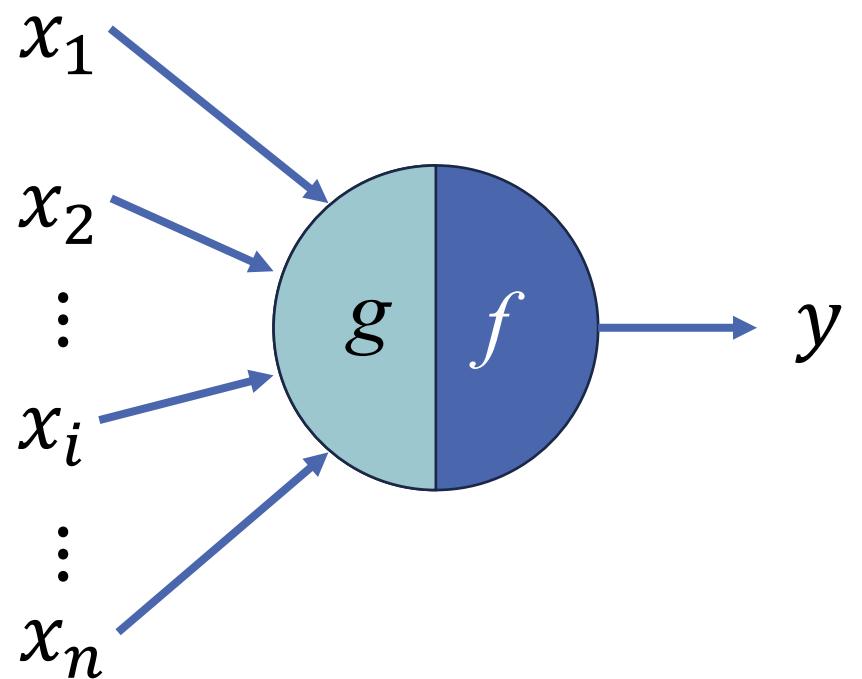
Notation

■ Fonction d'agrégation

$$g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i$$

■ Fonction d'activation

$$f(g(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } g(x) \geq \theta \\ 0 & \text{si } g(x) < \theta \end{cases}, \theta \in \mathbb{N}$$



Notation

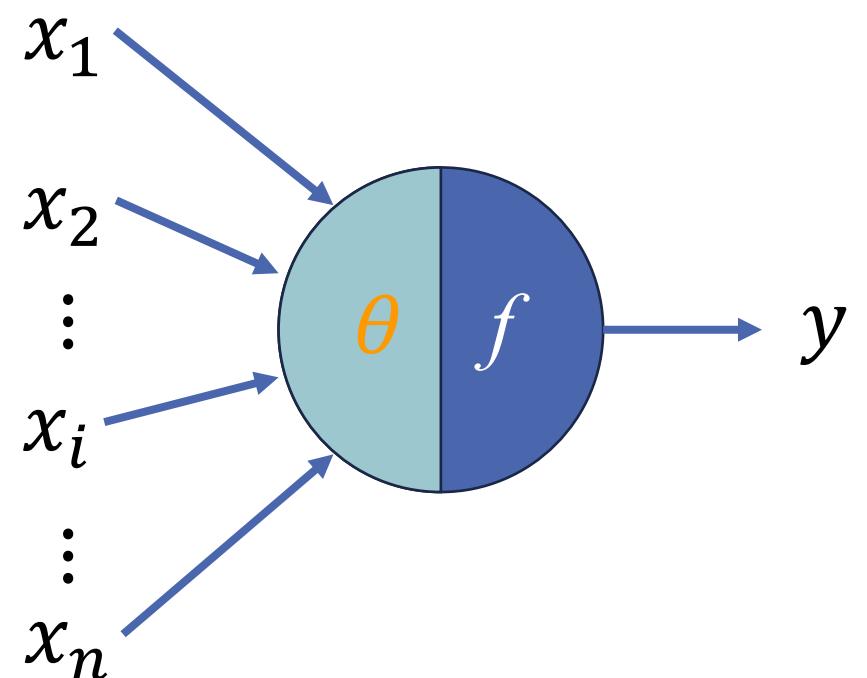
■ Fonction d'agrégation

$$g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i$$

■ Fonction d'activation

$$f(g(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } g(x) \geq \theta \\ 0 & \text{si } g(x) < \theta \end{cases}, \theta \in \mathbb{N}$$

■ La fonction g étant fixe, on utilise la valeur de θ dans la représentation



Notation

■ Fonction d'agrégation

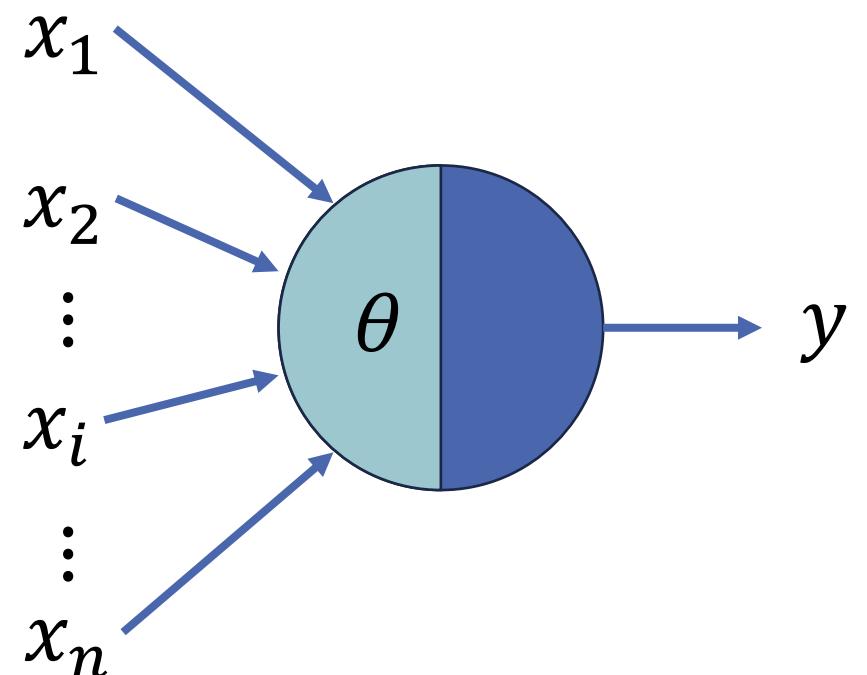
$$g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i$$

■ Fonction d'activation

$$f(g(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } g(x) \geq \theta \\ 0 & \text{si } g(x) < \theta \end{cases}, \theta \in \mathbb{N}$$

■ La fonction g étant fixe, on utilise la valeur de θ dans la représentation

■ La fonction f étant fixe, on l'ignore dans la représentation



Calculs

■ Et logique

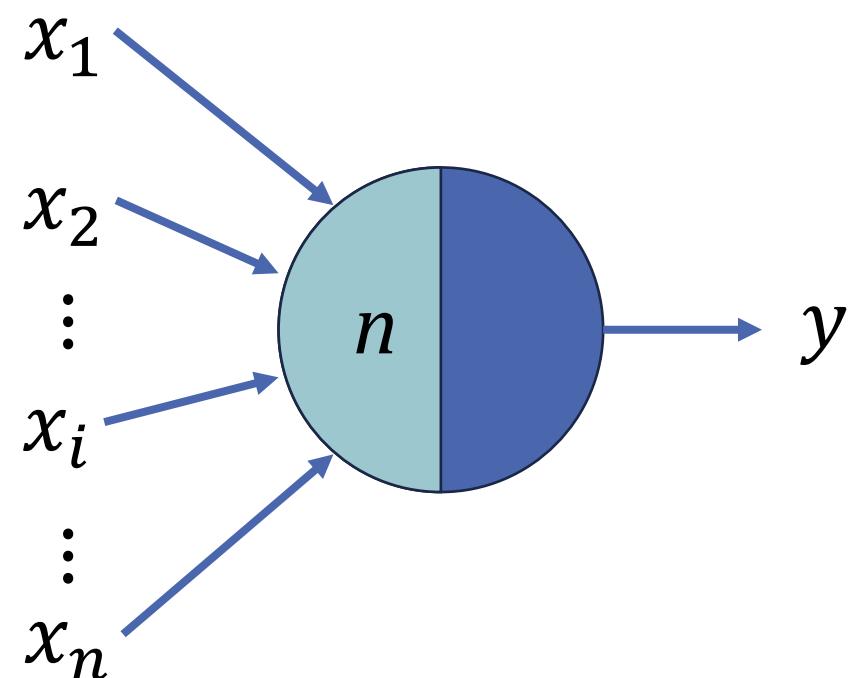
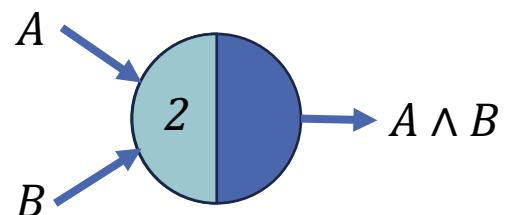
■ Pour n entrées

■ $\theta = n$

$$y = f(g(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i=1}^n x_i \geq n \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

■ $y = 1$ si et seulement si tous les x_i ont pour valeur 1

■ Cas binaire



Calculs

■ Ou logique

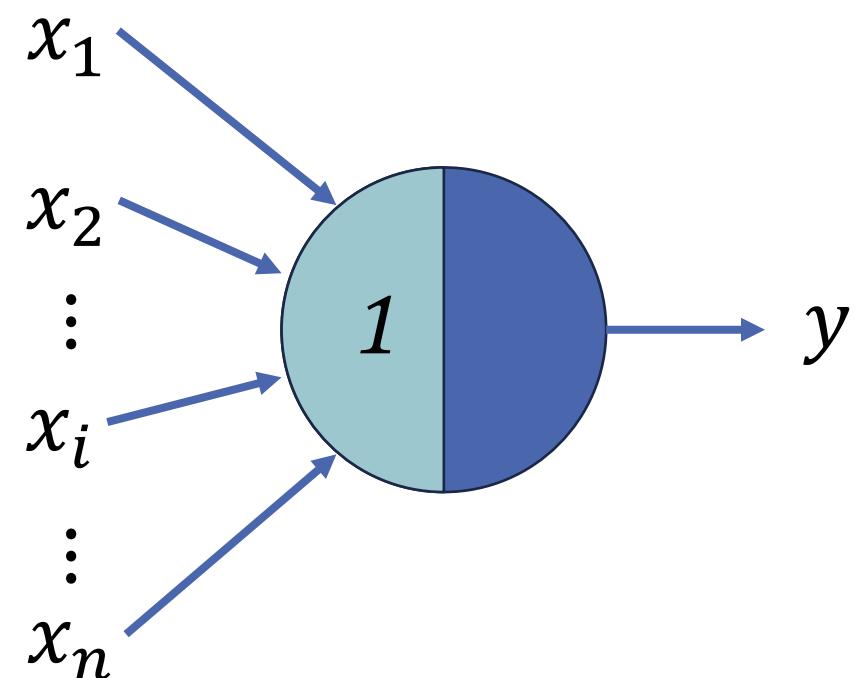
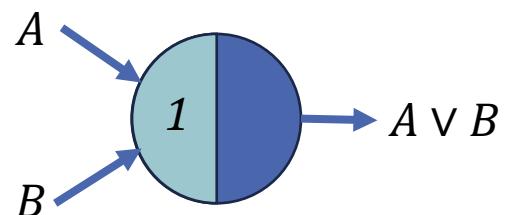
■ Pour n entrées

■ $\theta = 1$

$$y = f(g(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i=1}^n x_i \geq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

■ $y = 1$ si et seulement si
au moins un x_i a pour valeur 1

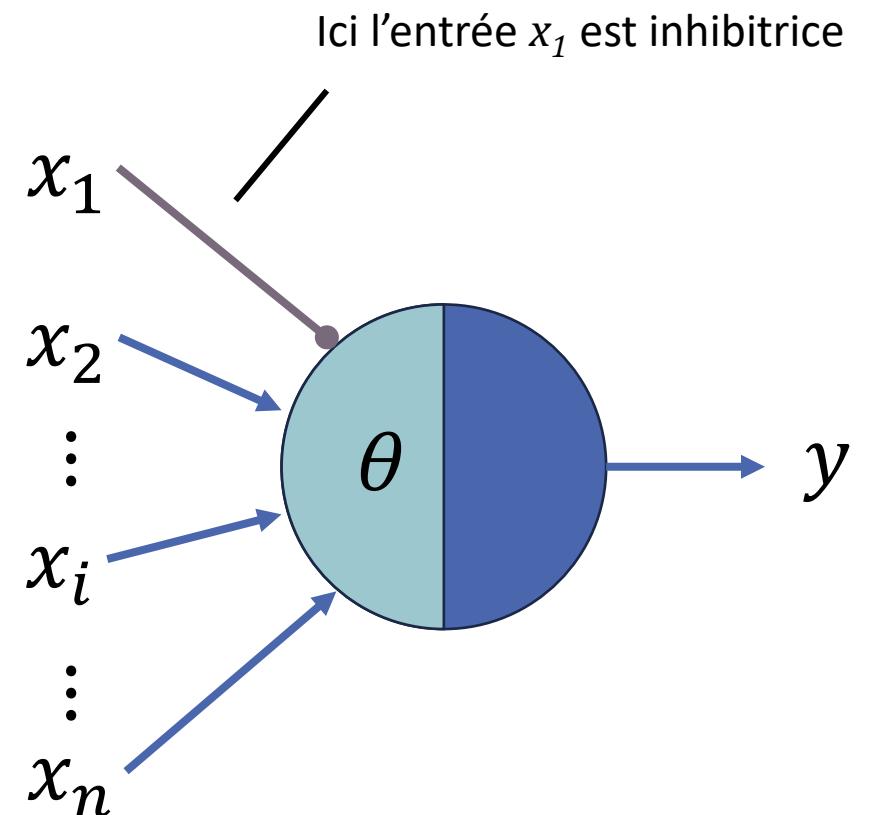
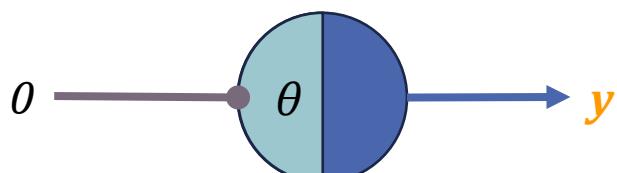
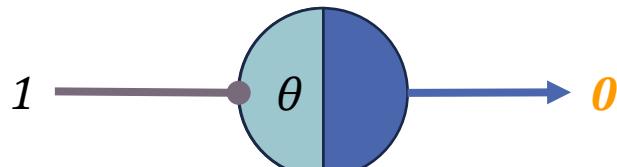
■ Cas binaire



Calculs

■ Négation

- Impossible à représenter en l'état
- Nouveau type d'entrée: Inhibitrice
- Représentation: 
- Propriétés:



Calculs

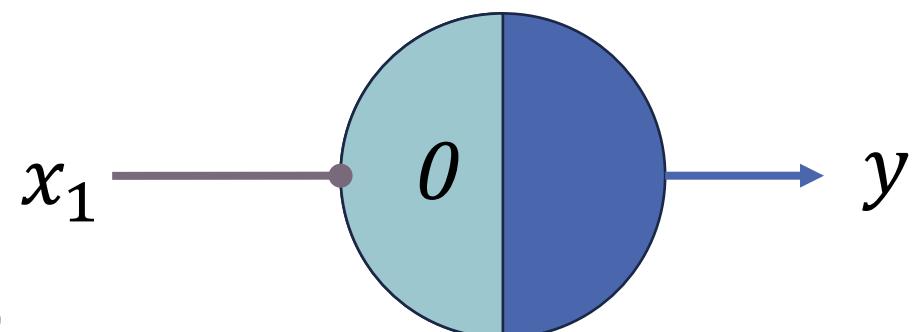
■ Non logique

- Pour 1 entrée

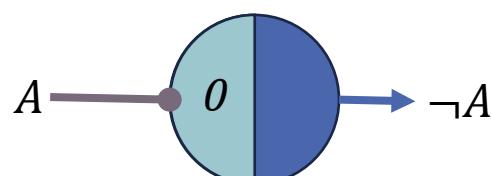
- $\theta = 0$

- $y = f(g(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i=1}^n x_i \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

- $y = 1$ si et seulement si x_i a pour valeur 0



■ Cas unaire



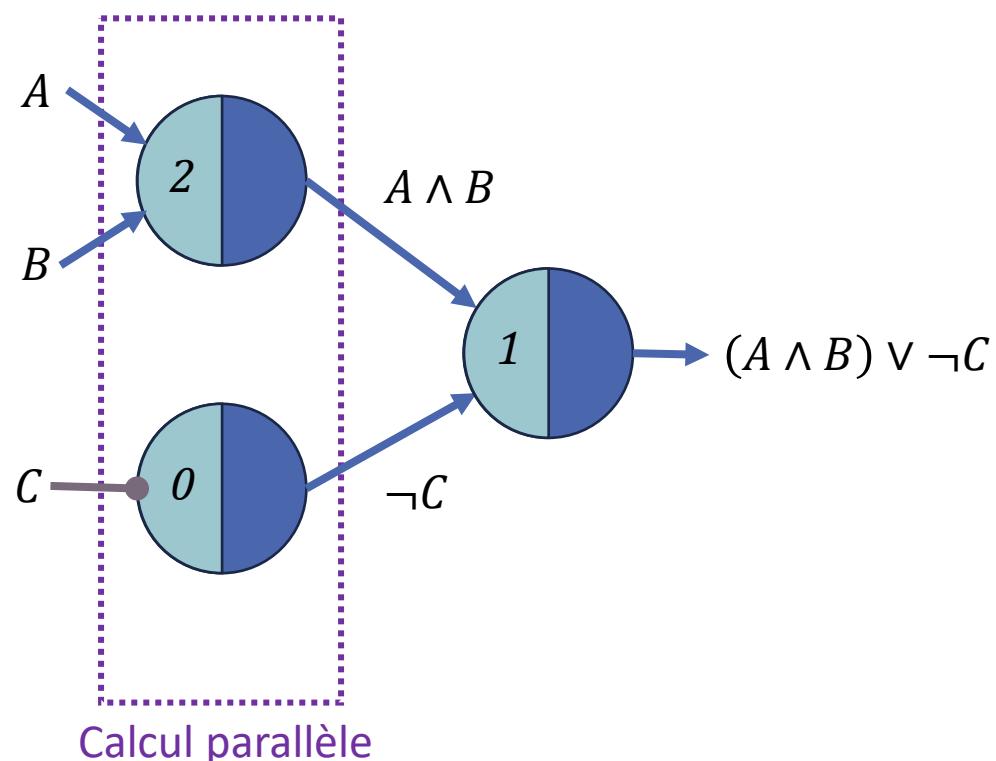
Propriétés d'un réseau de neurones M-P

- Opérateurs logiques
 - Et
 - Ou
 - Non

Suffisant pour représenter une formule propositionnelle
- Toute formule logique peut être représentée par un réseau M-P
- Il est possible de représenter une machine de Turing avec un réseau M-P
- Calcul parallélisable

Exemple de réseau de neurones M-P

- Formule: $(A \wedge B) \vee \neg C$

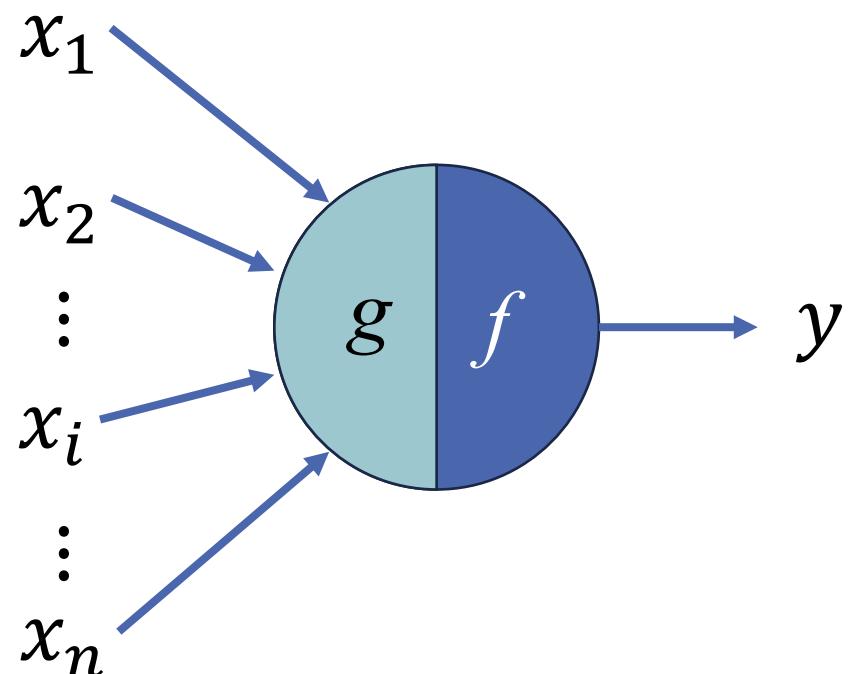


Limitations d'un réseau de neurones M-P

- Représentation de formules propositionnelles uniquement
- Valeurs booléennes
- Modifier la formule = modifier la structure
- Pas de méthode d'apprentissage

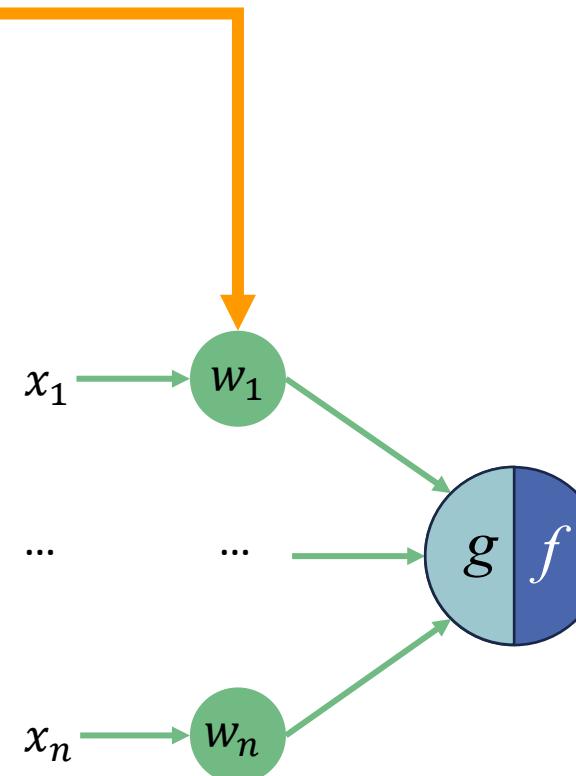
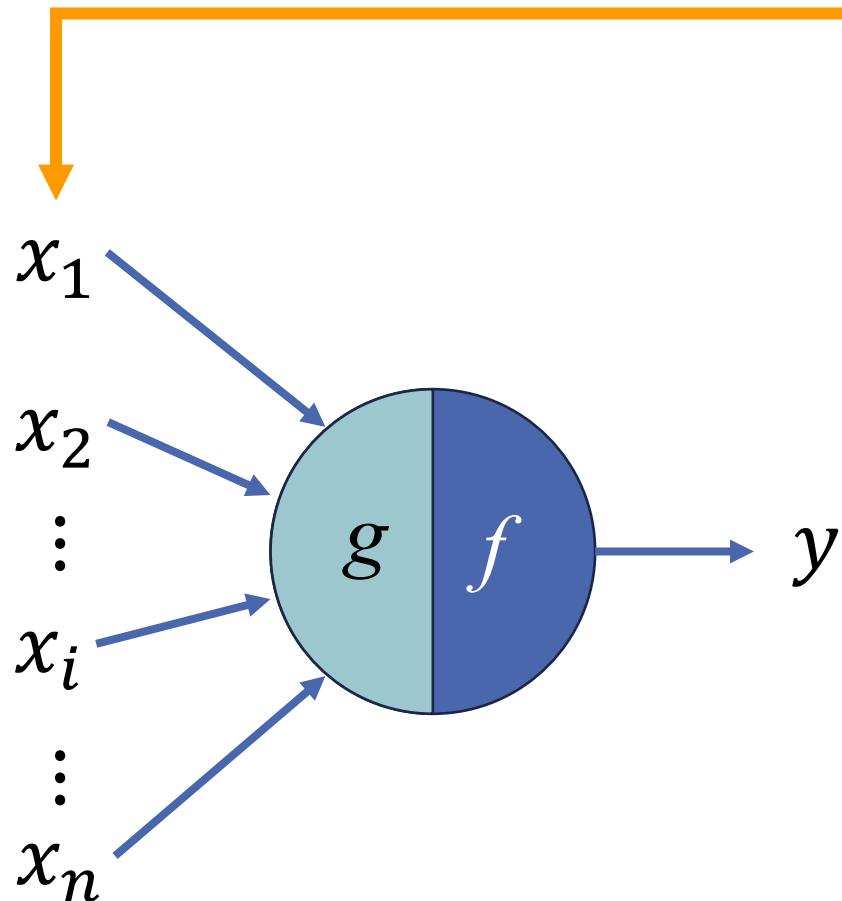
Neurone formel

- Extension du neurone M-P
 - Plus proche du neurone biologique
 - Plus expressif



Neurone M-P vers Neurone Formel

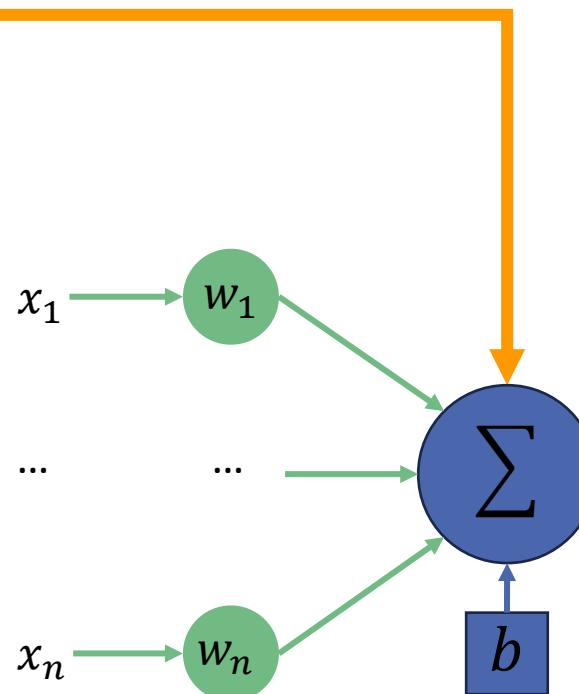
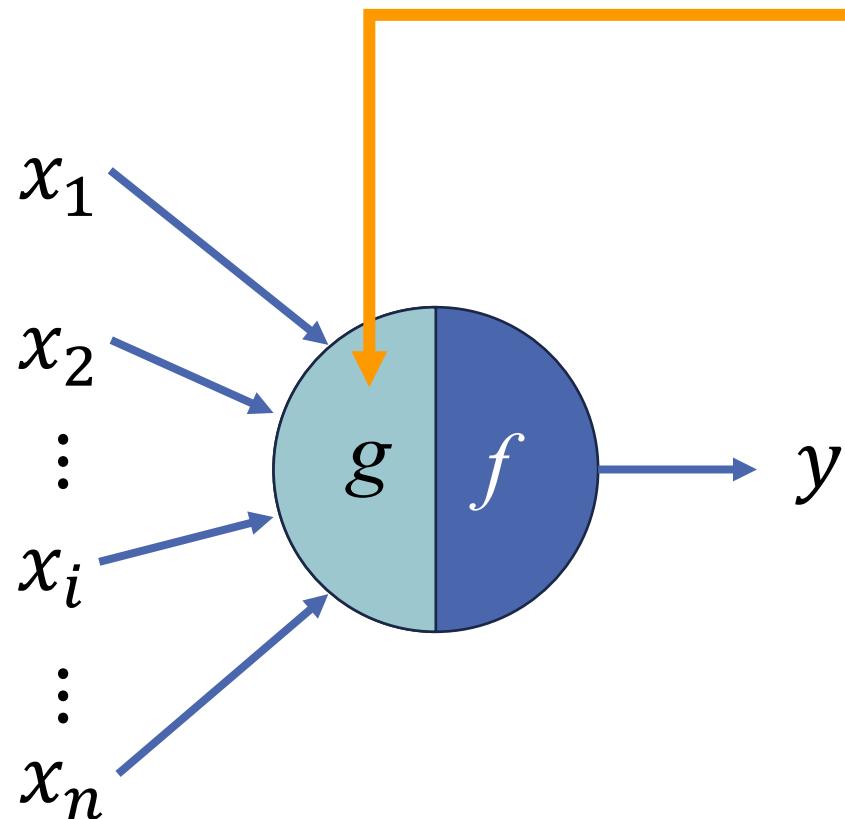
- Ajouts de poids, notés w_i , représentant les poids synaptiques



Neurone M-P vers Neurone Formel

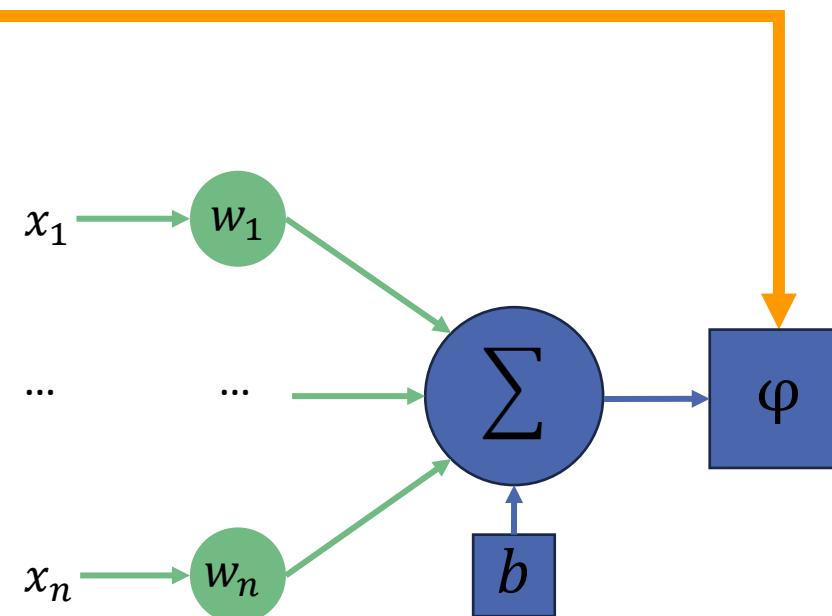
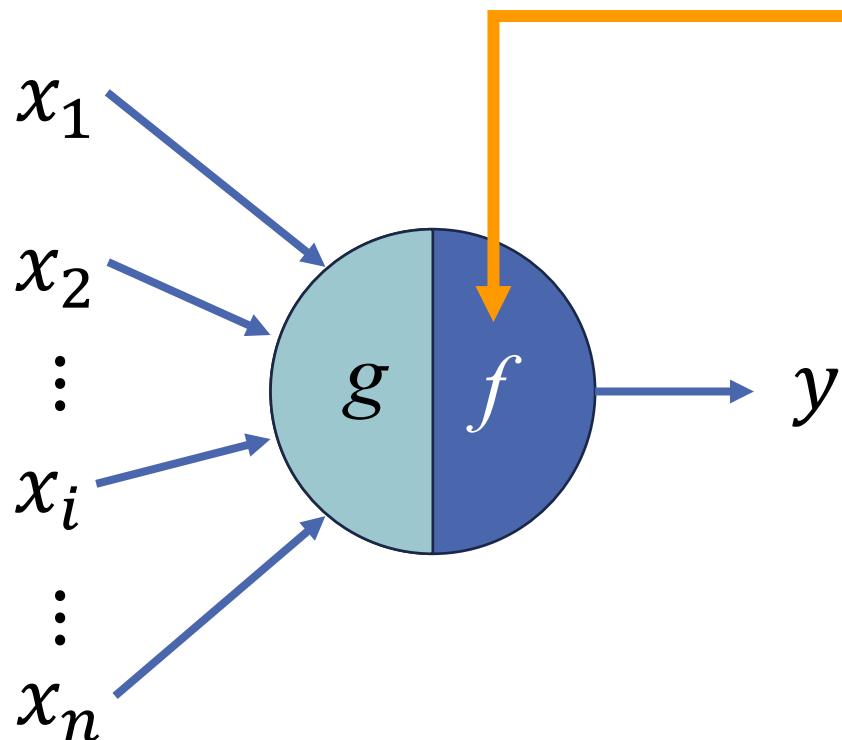
- La fonction d'agrégation g est remplacée par la fonction \sum
- b est le biais du neurone (ou valeur de seuil)

$$\sum_{i=1}^n x_i w_i + b$$



Neurone M-P vers Neurone Formel

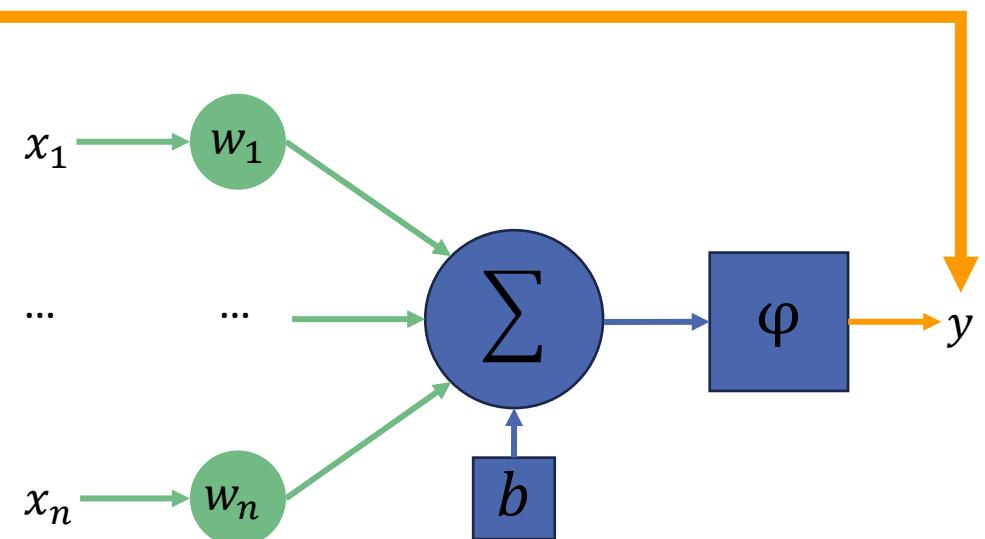
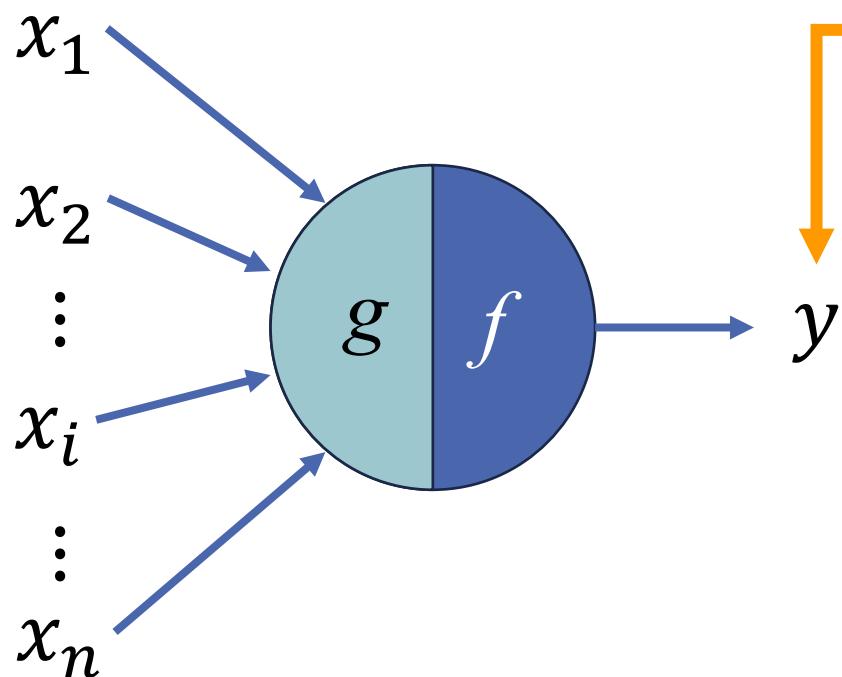
- La fonction d'activation f n'est plus fixe
 - f est remplacée par une fonction quelconque φ



Neurone M-P vers Neurone Formel

- La valeur y en sortie de neurone est définie par:

$$y = \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + b \right)$$



Neurone formel

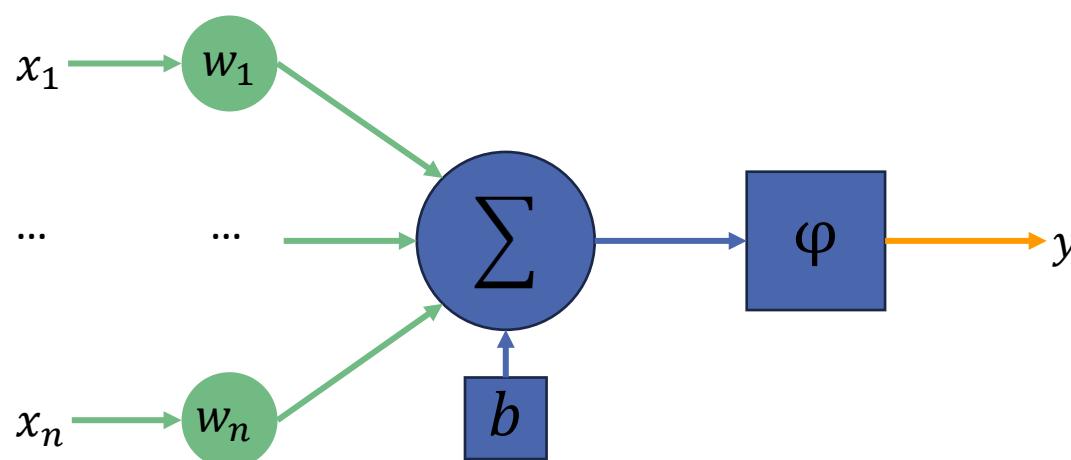
- Fonction à n variable, notée f telle que:

$$y = f(x_1, \dots, x_n) = \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + b \right)$$

Fonction d'activation

Fonction d'agrégation

Biais



Neurone formel

- Représenter un neurone M-P
 - Tous les poids synaptiques w_i sont égaux à 1
 - Le biais b a pour valeur - θ
 - La fonction d'activation φ est telle que:

$$\varphi(x_1, \dots, x_n) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i=1}^n x_i w_i + b \geq 0 \\ 0 & \text{si } \sum_{i=1}^n x_i w_i + b < 0 \end{cases}$$

- Les neurones M-P sont un sous-ensemble des neurones formels

Neurone formel

■ Intégration du biais:

$$y = \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + b \right)$$

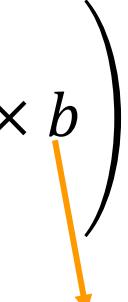
Neurone formel

■ Intégration du biais:

$$y = \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + b \right)$$
$$= \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + 1 \times b \right)$$

Neurone formel

■ Intégration du biais:

$$\begin{aligned} y &= \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + b \right) \\ &= \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + 1 \times b \right) \\ &= \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + x_0 \times w_0 \right), \text{avec } x_0 = 1 \text{ et } w_0 = b \end{aligned}$$


Neurone formel

■ Intégration du biais:

$$\begin{aligned} y &= \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + b \right) \\ &= \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + 1 \times b \right) \\ &= \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + x_0 \times w_0 \right), \text{avec } x_0 = 1 \text{ et } w_0 = b \\ &= \varphi \left(\sum_{i=0}^n x_i w_i \right), \text{avec } x_0 = 1 \text{ et } w_0 = b \end{aligned}$$


Neurone formel

■ Intégration du biais:

$$y = \varphi \left(\sum_{i=1}^m x_i w_i + b \right)$$

$$= \varphi \left(\sum_{i=1}^m x_i w_i + 1 \times b \right)$$

$$= \varphi \left(\sum_{i=1}^m x_i w_i + x_0 \times w_0 \right), \text{avec } x_0 = 1 \text{ et } w_0 = b$$

$$= \varphi \left(\sum_{i=0}^m x_i w_i \right), \text{avec } x_0 = 1 \text{ et } w_0 = b$$

