



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

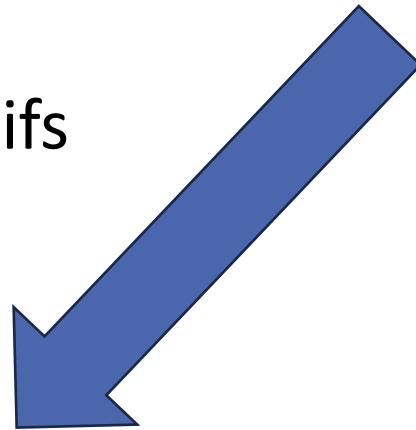
Principe

- 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

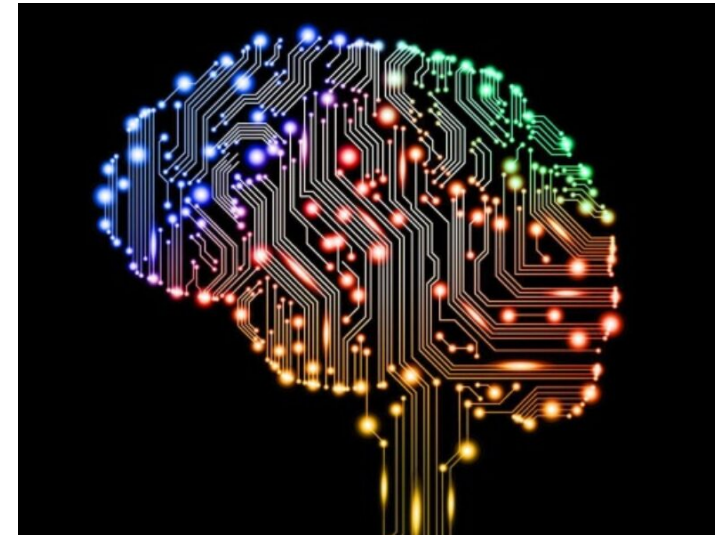
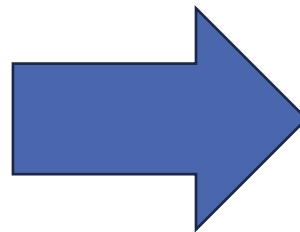
Reproduire
Le fonctionnement du cerveau



Approche Connexionniste

Intelligence artificielle connexionniste

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



Neurone

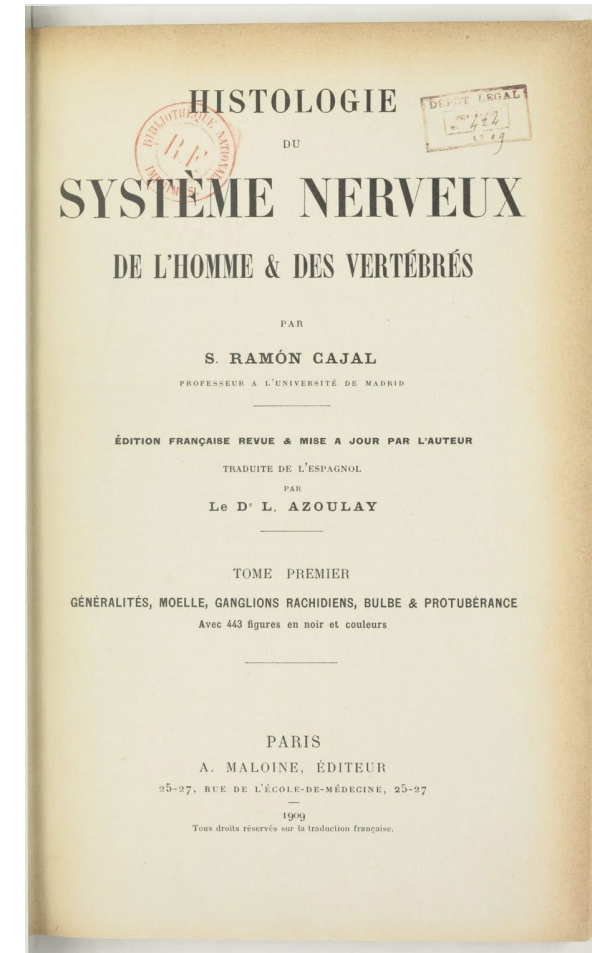
- Décrit en 1894 par Santiago Ramón y Cajal (1852 - 1934)
 - Observé au microscope
 - Définition de dendrites et axones



Observation d'un neurone



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



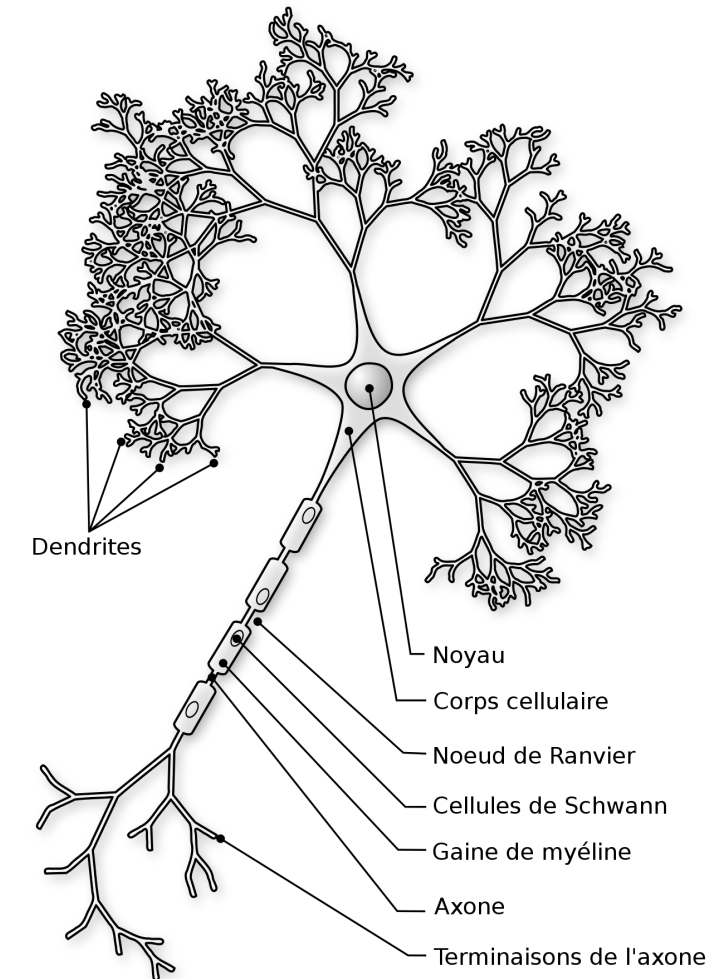
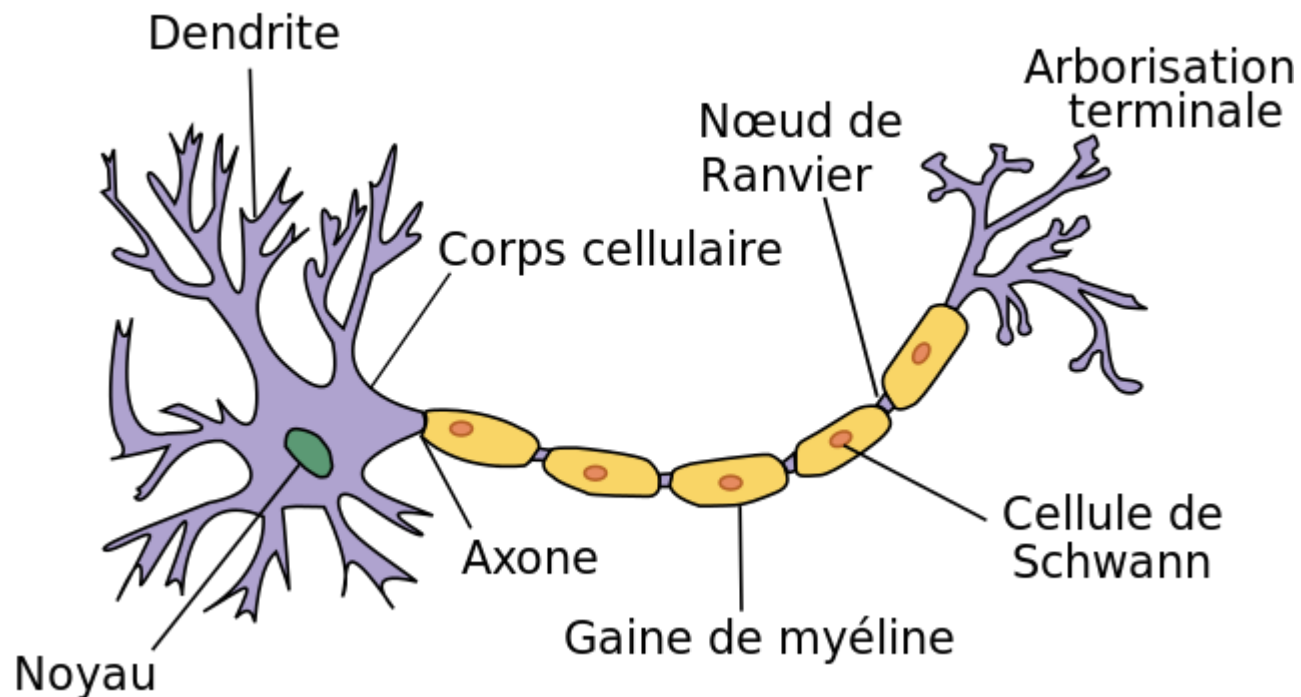
Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Ouvrage numérisé et traduit (BNF):

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

Neurone

Description

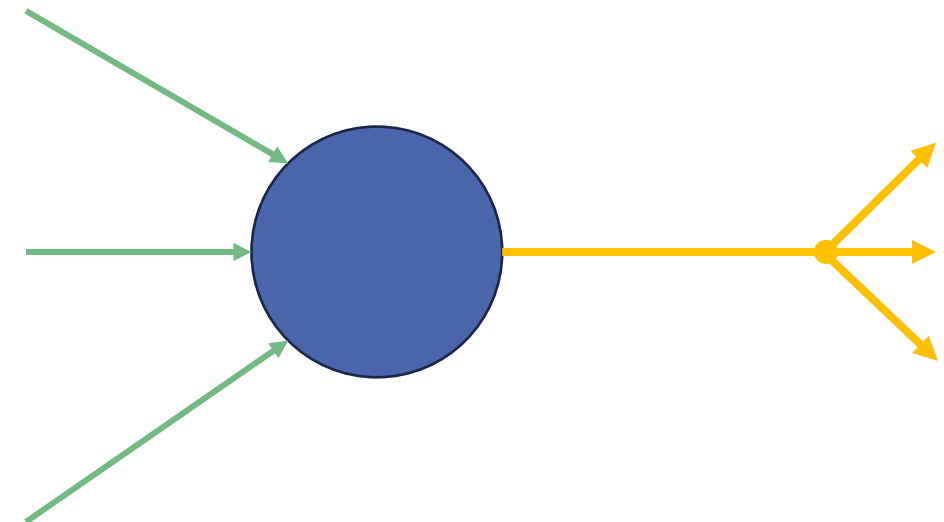


Neurone

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

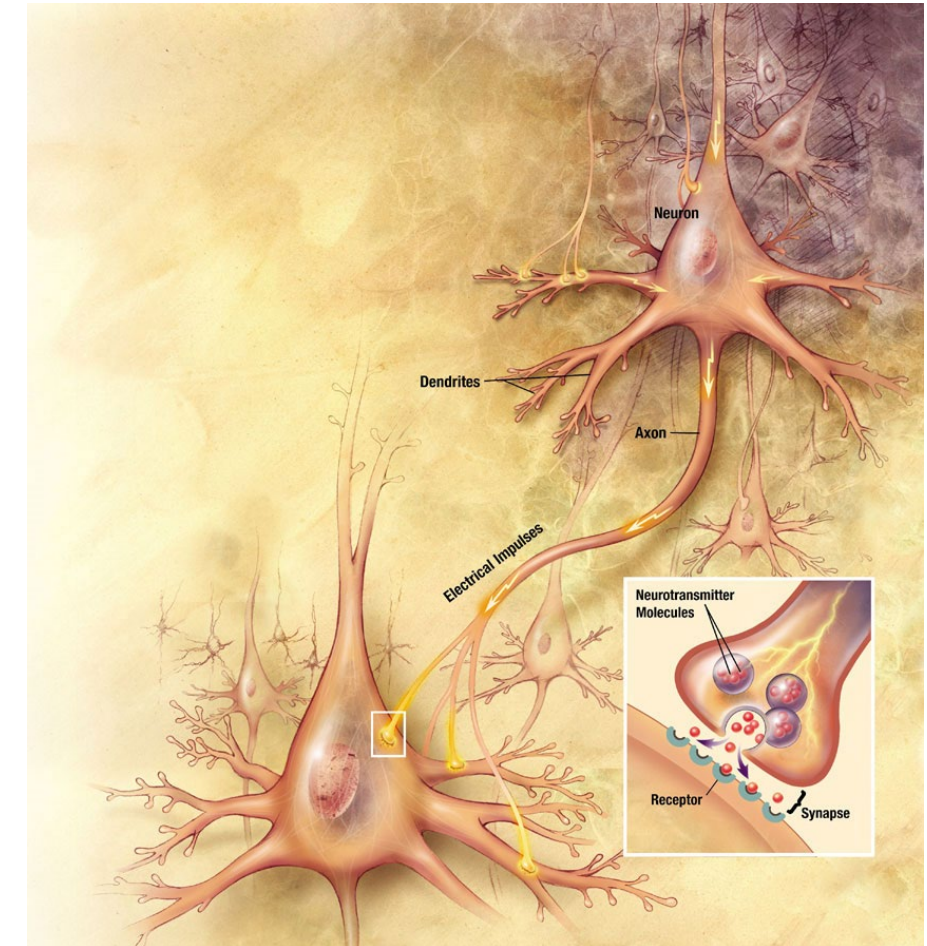
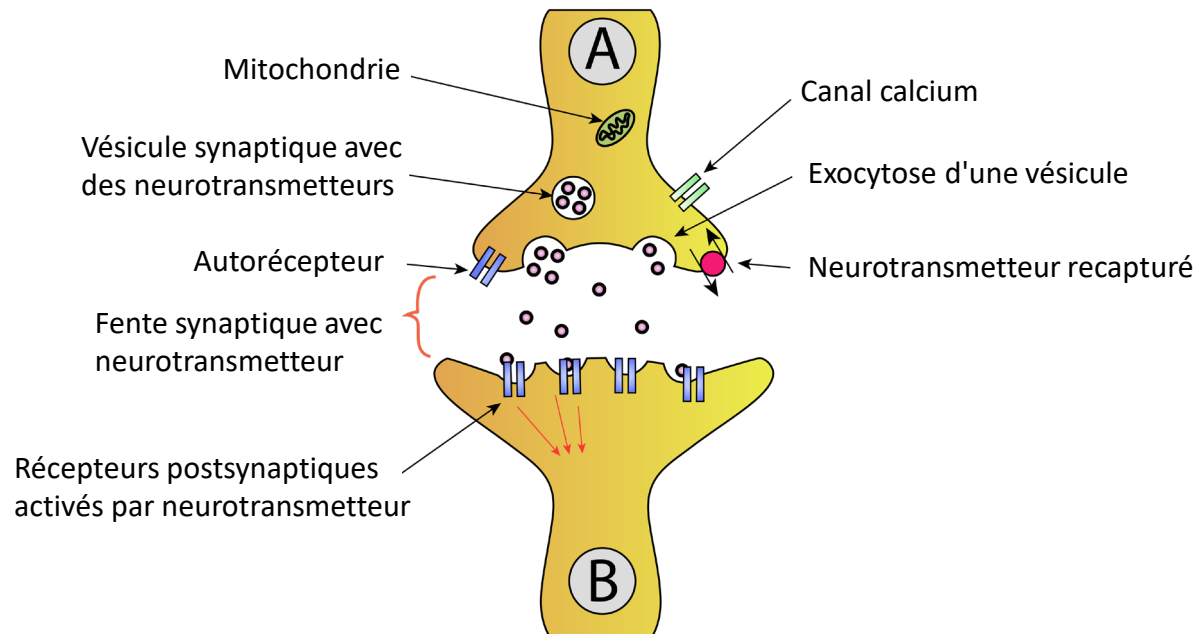
Fonctionnement

- 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

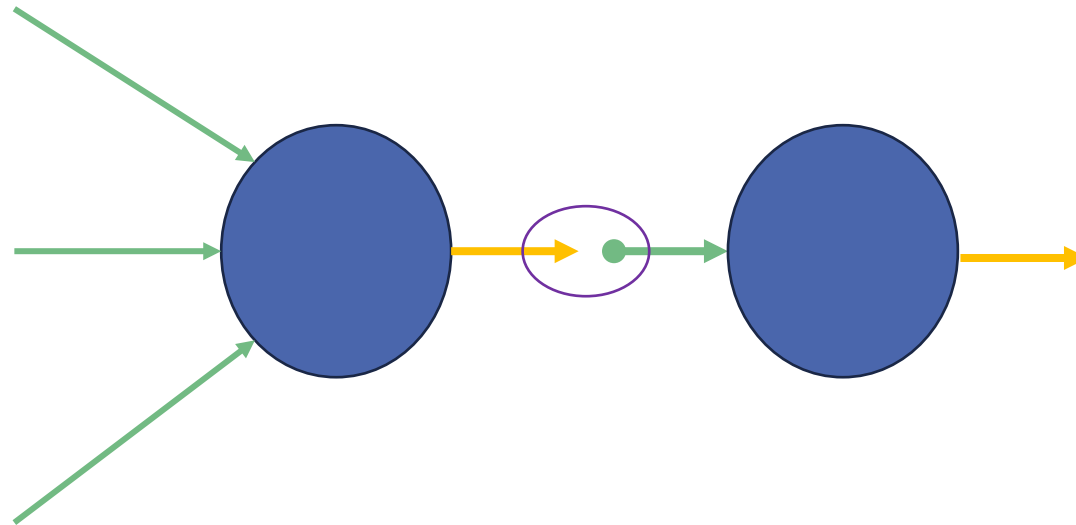
- Décrit en 1897 par Charles Scott Sherrington
- Relie des neurones entre eux
- Transmet l'influx nerveux chimiquement



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**

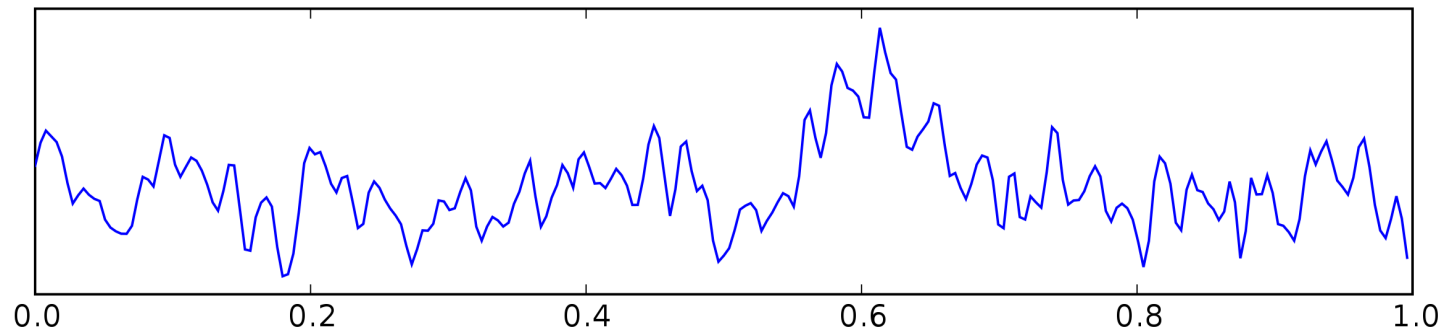


Pour aller plus loin: <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/le-neurone-et-l-influx-nerveux-s1286>

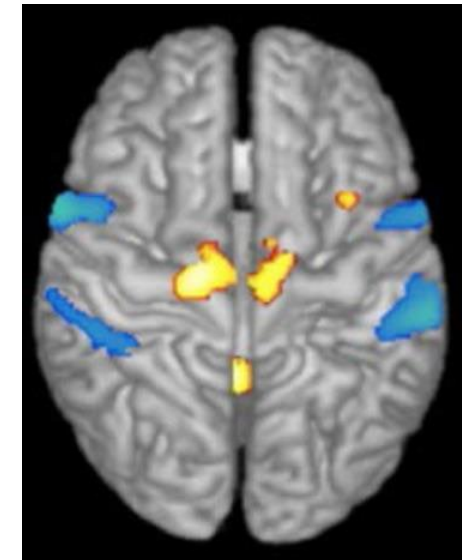
Fonctionnement du cerveau

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

Le cerveau n'est pas qu'un gros ordinateur



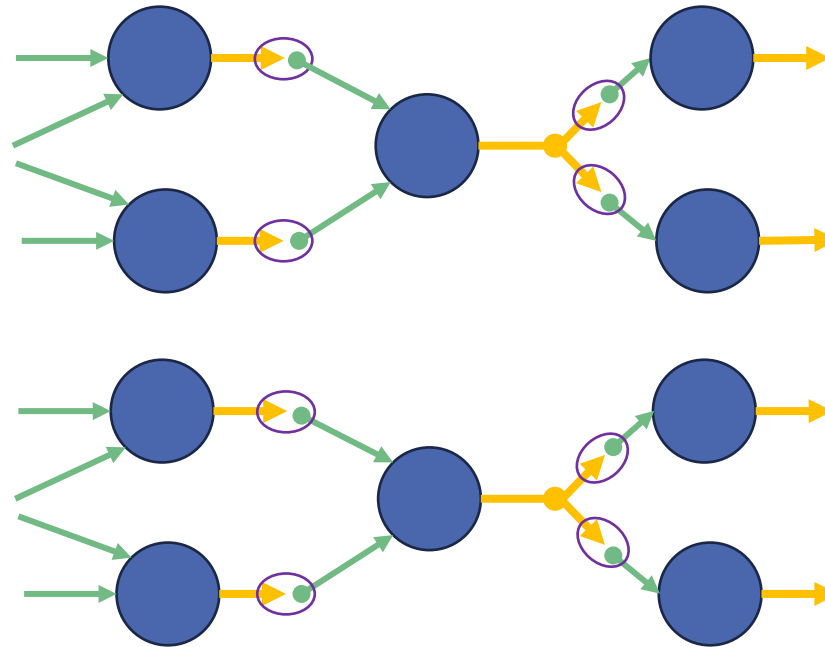
Signal EEG



IRM fonctionnel, (c) Institut du Cerveau, ICM

Réseaux de neurones

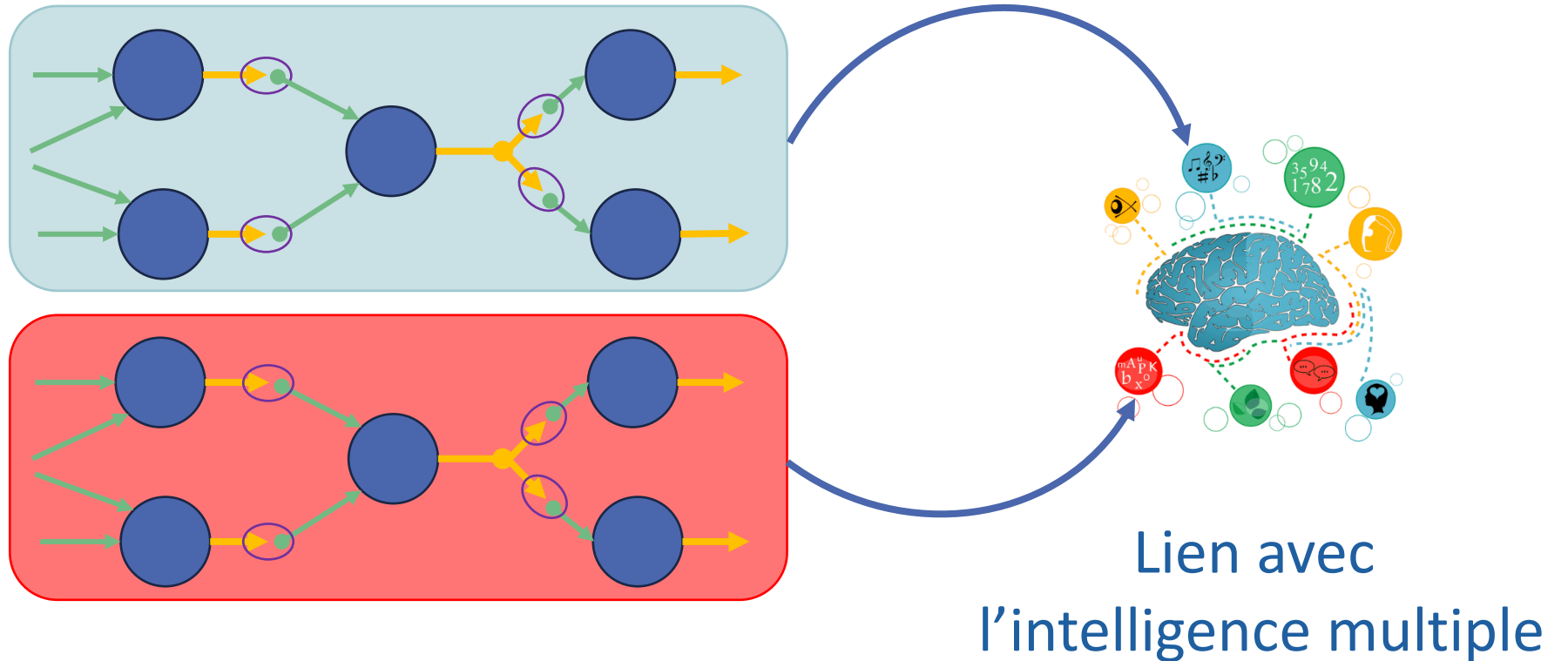
- Le cerveau est un **ensemble de réseaux de neurones**



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

Réseaux de neurones

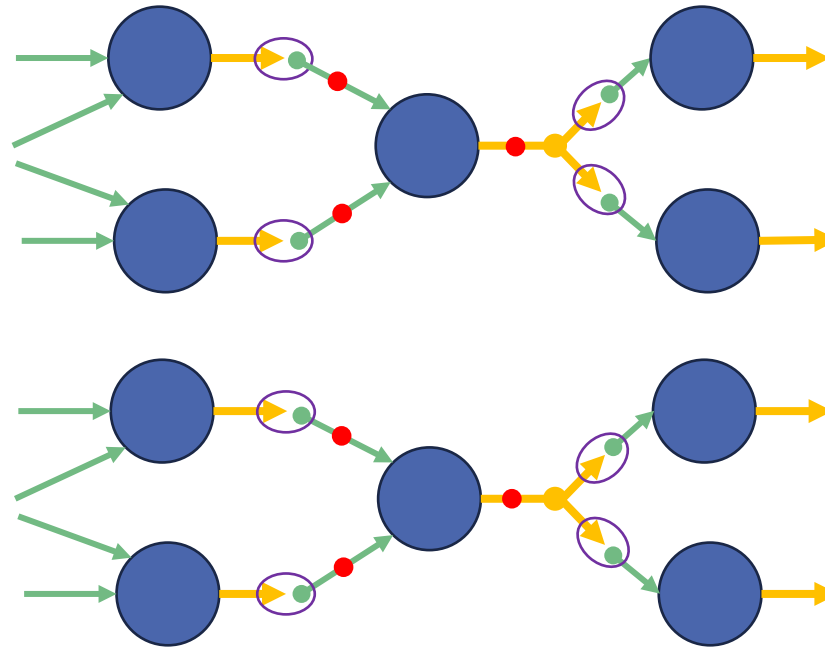
- Le cerveau est un **ensemble de réseaux de neurones**



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 ?

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

Potentiel d'action

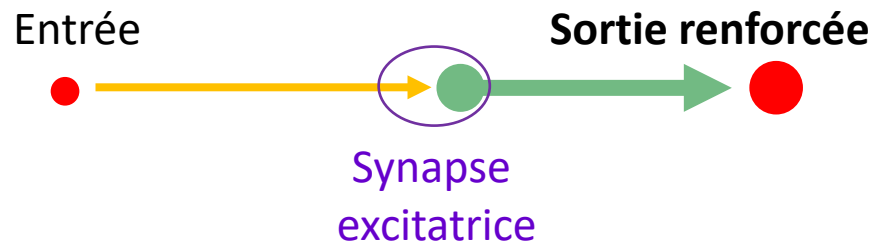
- Caractérise le signal transporté d'un neurone à l'autre via une synapse

Potentiel d'action

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

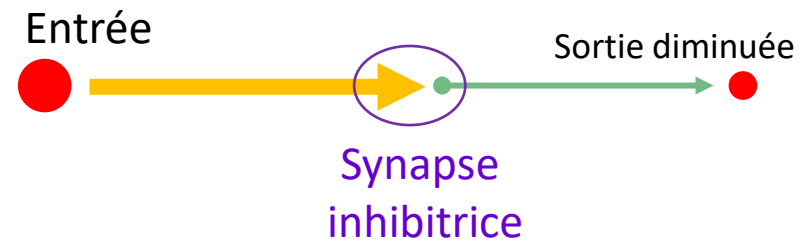
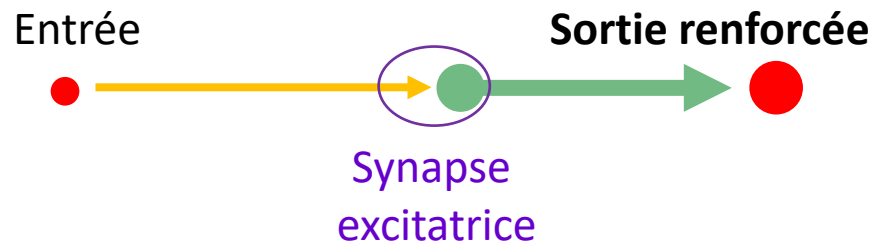
Potentiel d'action

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



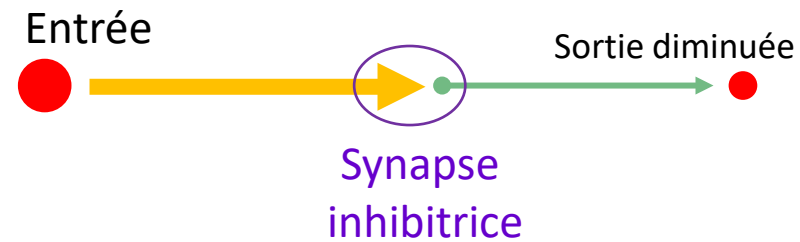
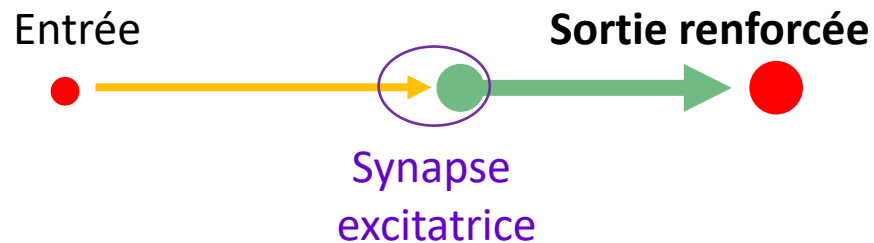
Potentiel d'action

- 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

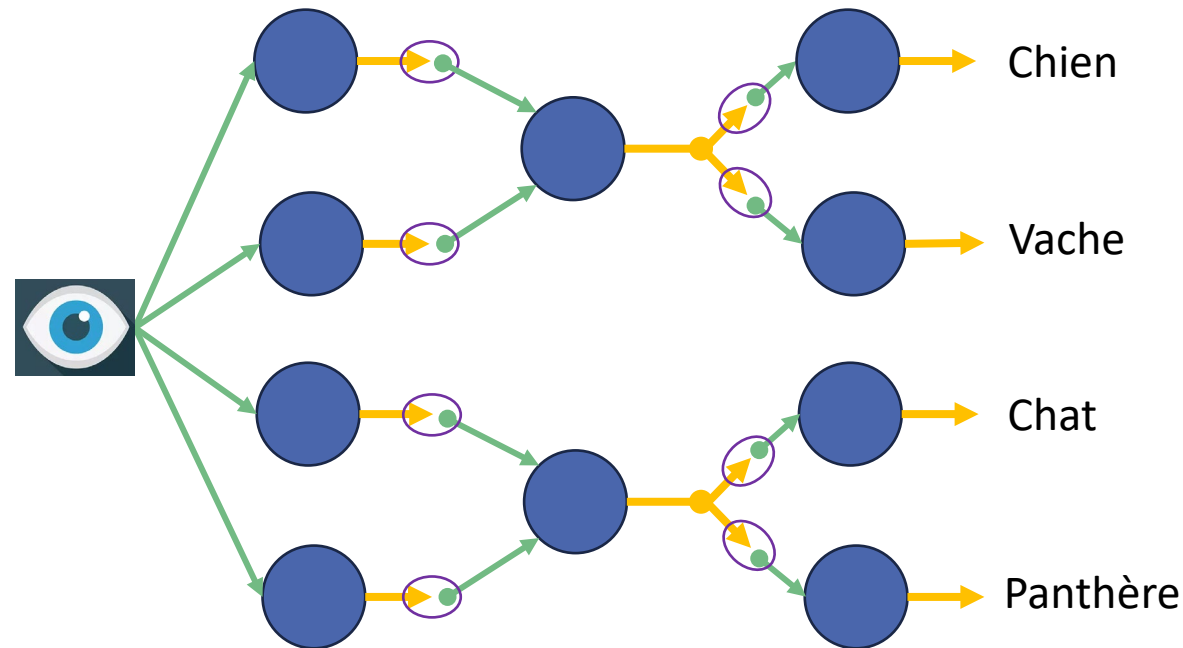


Fonctionnement du cerveau

- **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

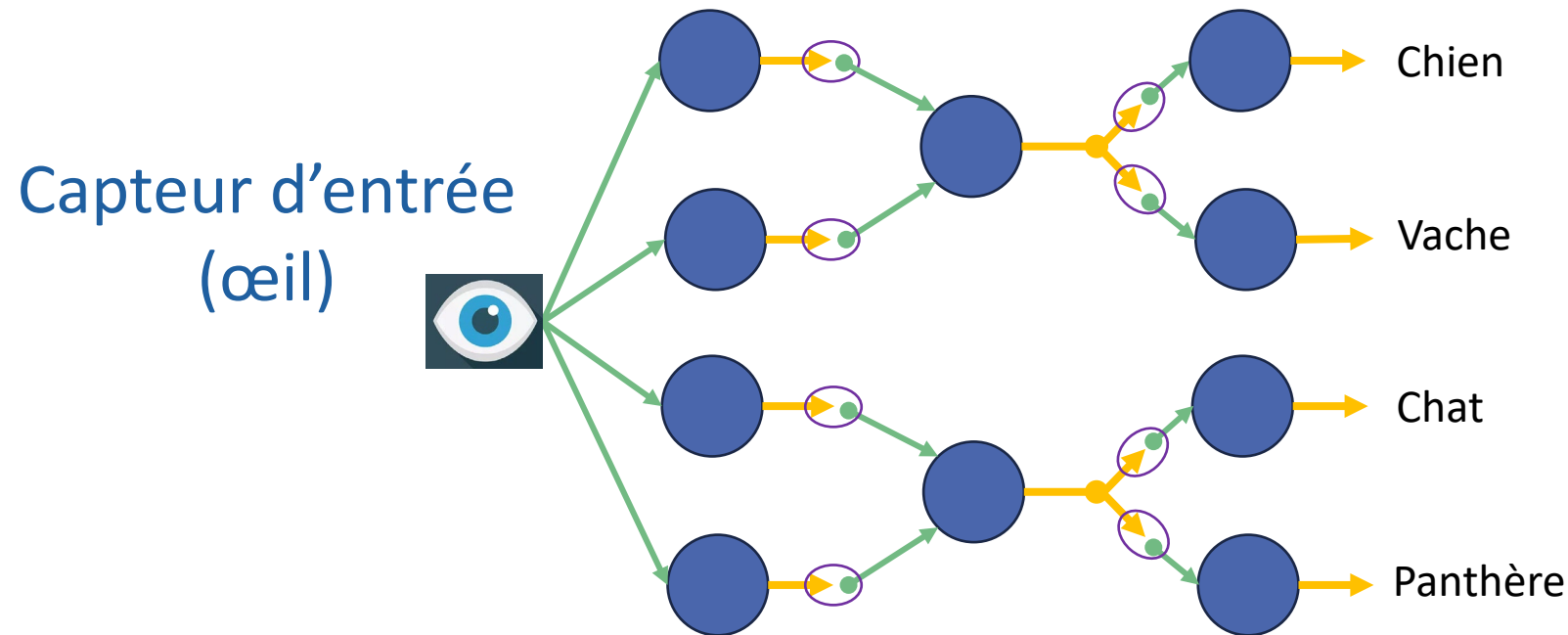
■ Fonctionnement



Réseau de neurone de l'identification visuelle

Réseaux de neurones

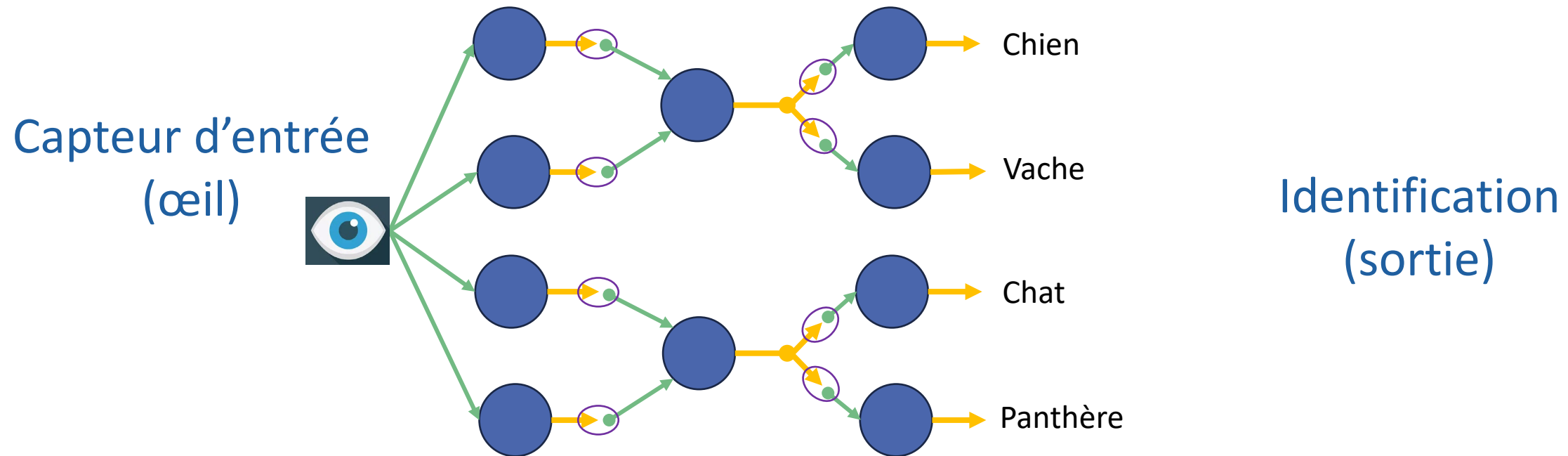
■ Fonctionnement



Réseau de neurone de l'identification visuelle

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



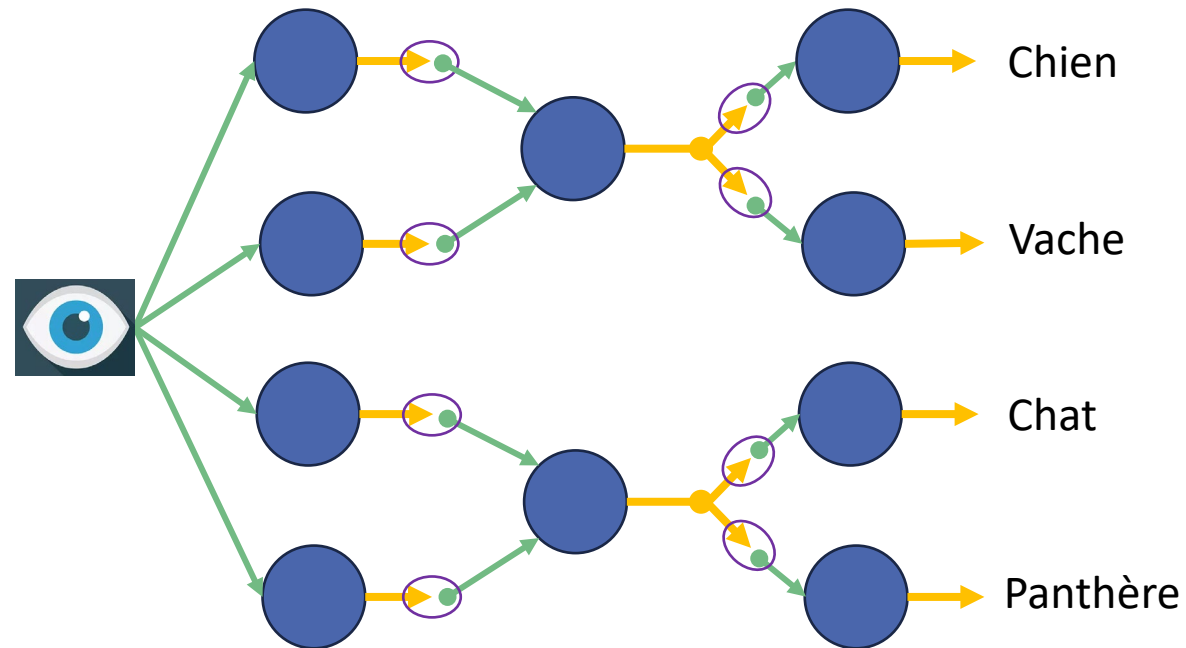
Réseau de neurone de l'identification visuelle

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Stimulus

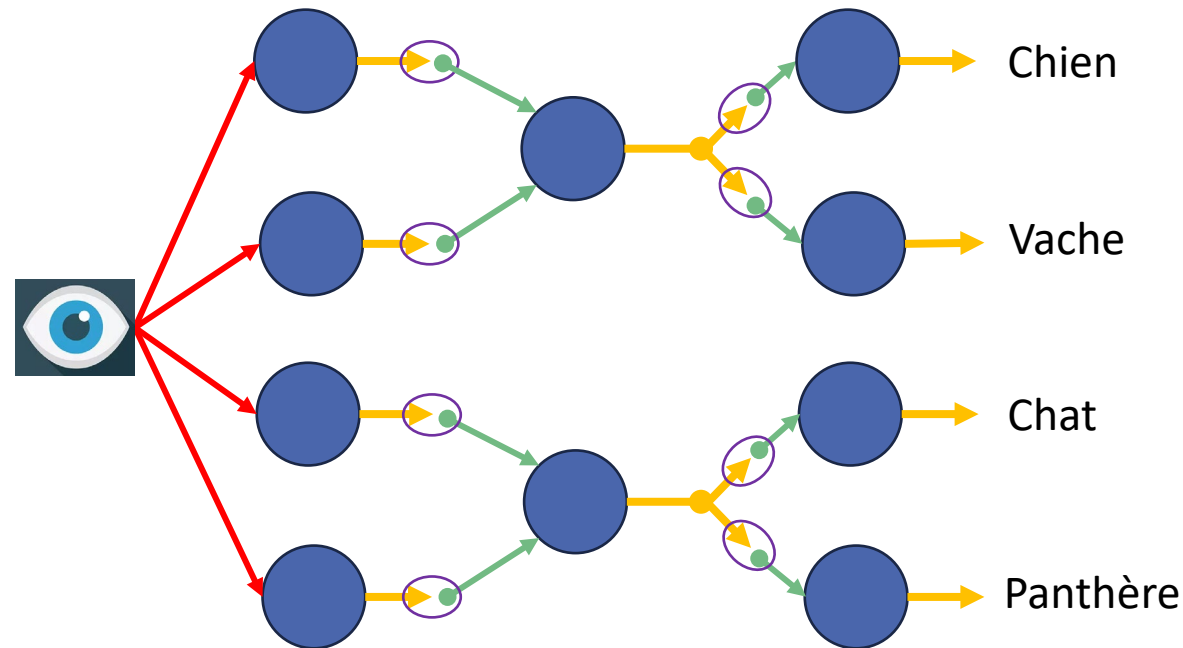


Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



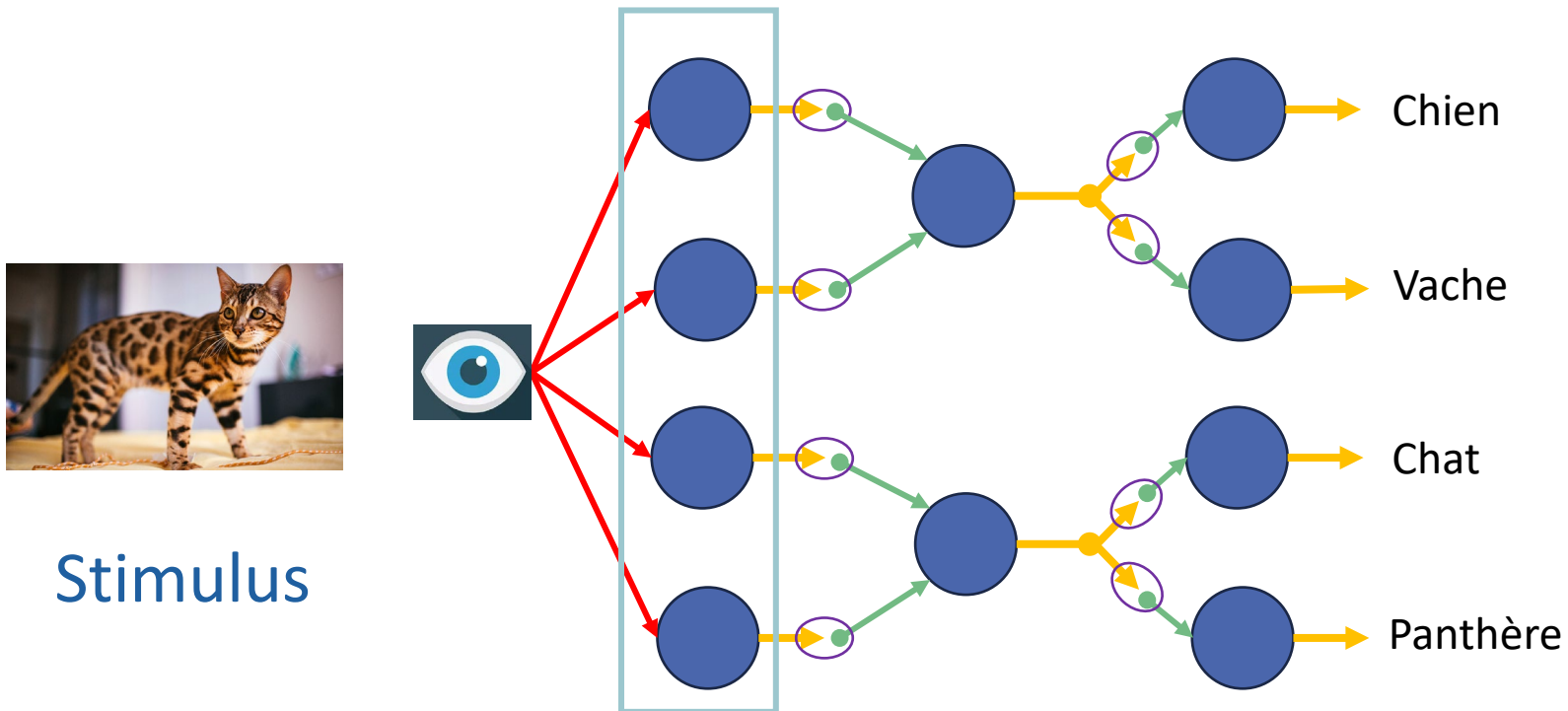
Stimulus



Propagation du potentiel d'action

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Passage de la première couche

■ Fonctionnement

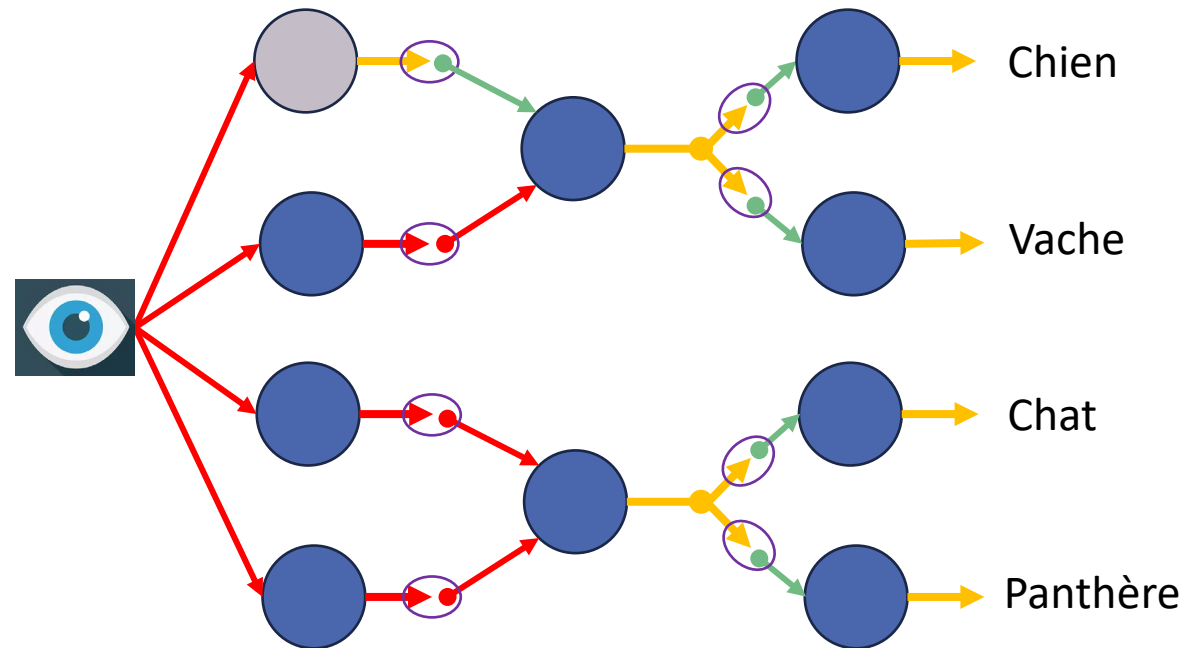


Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



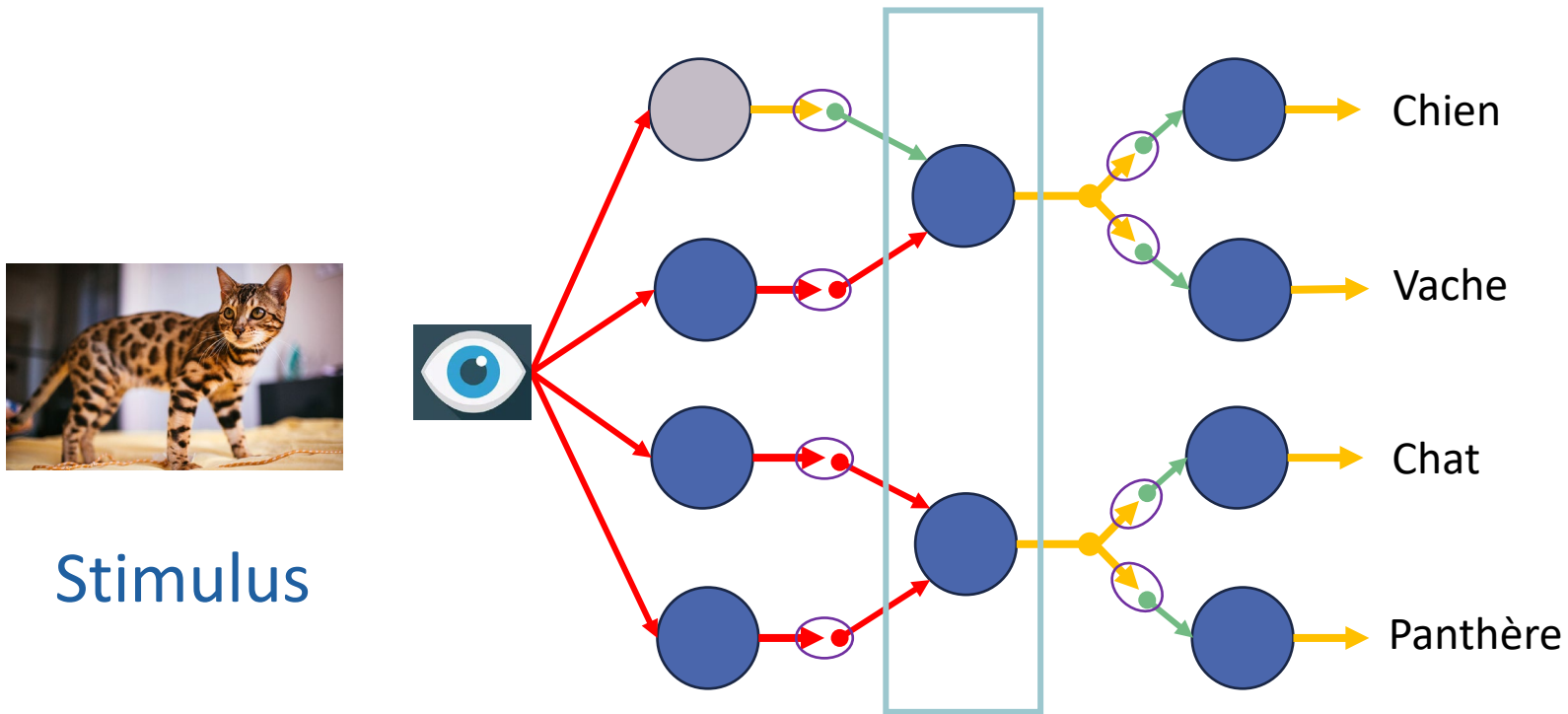
Stimulus



Transmission du PA à la couche suivante

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



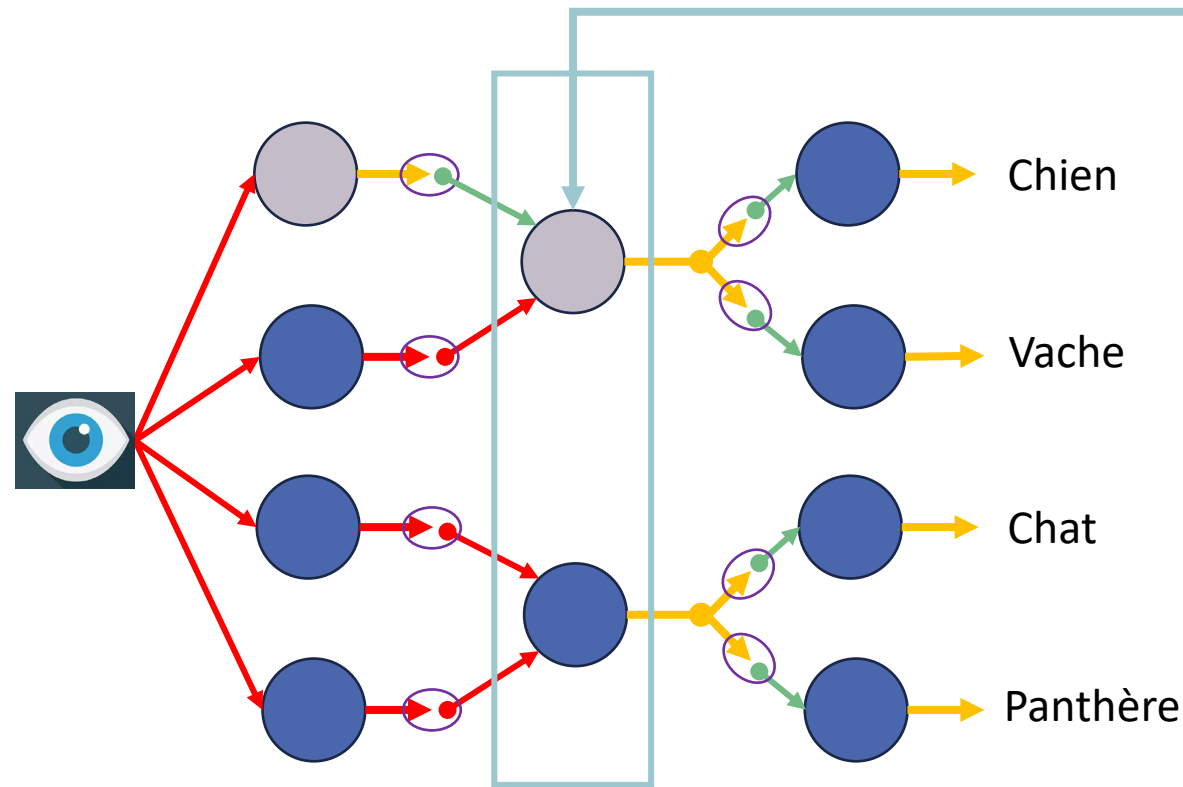
Passage de la deuxième couche

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Stimulus



Neurone non activé
(PA trop faible)

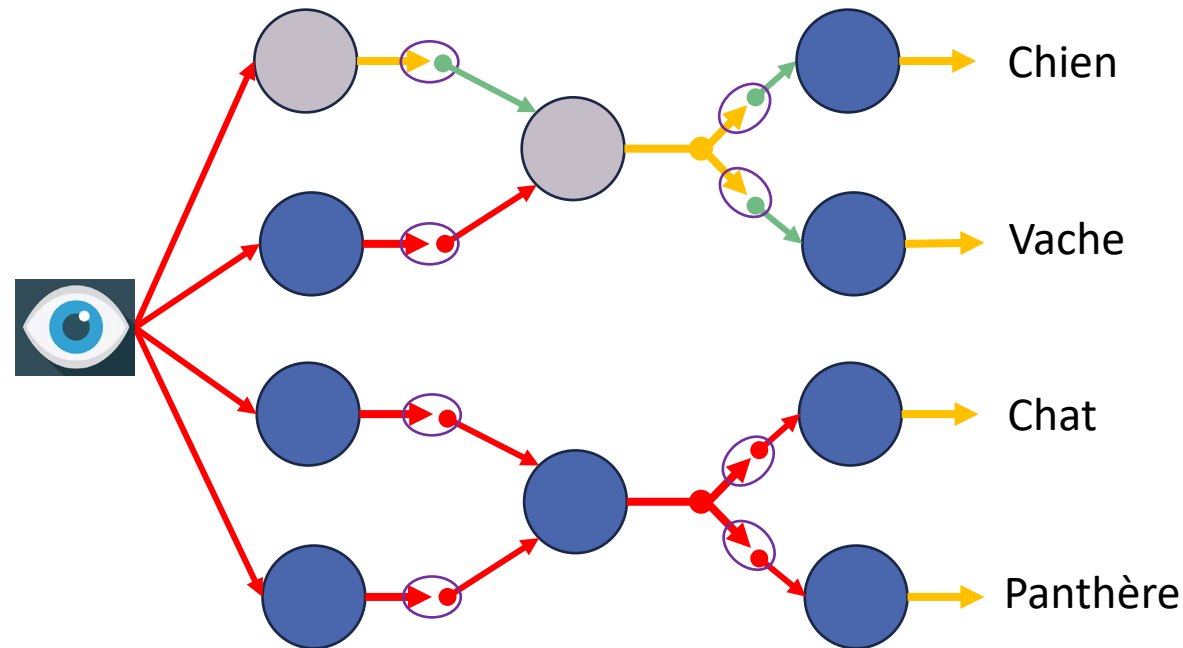
Passage de la deuxième couche

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Stimulus



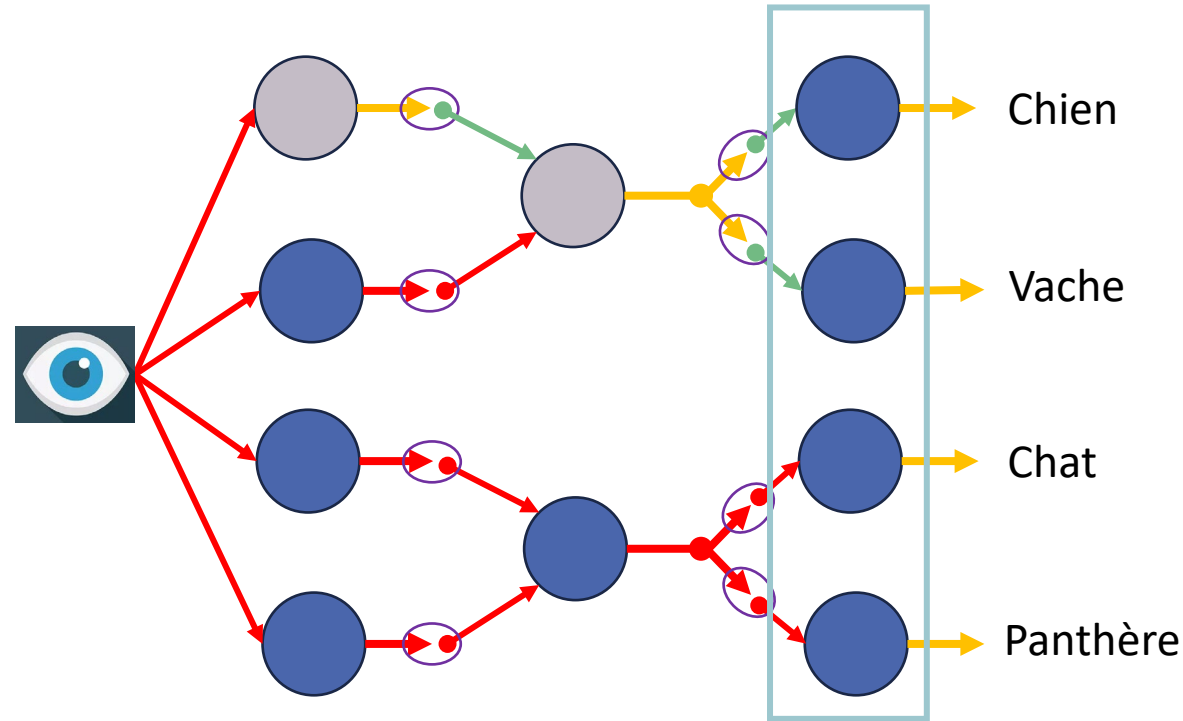
Transmission du PA à la couche suivante

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



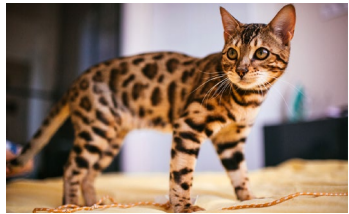
Stimulus



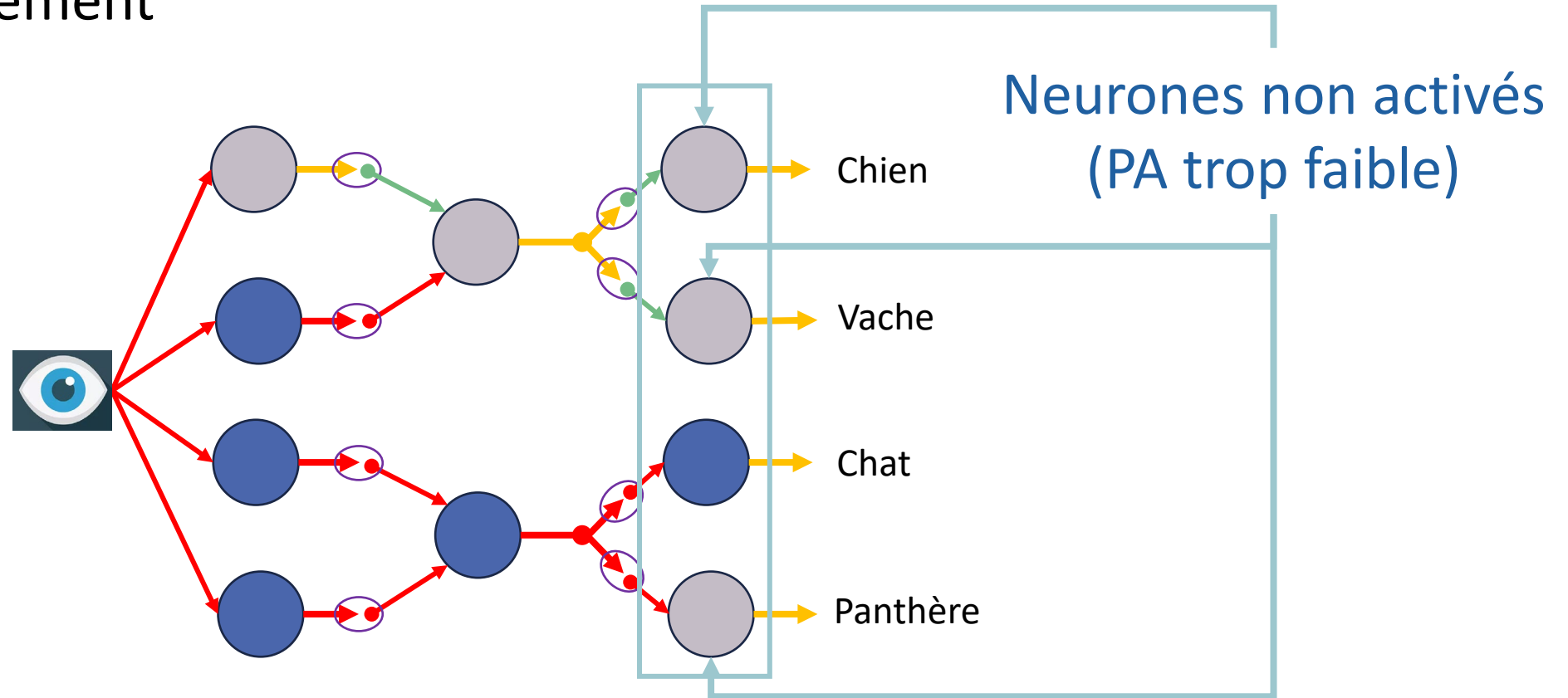
Passage de la troisième couche

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



Stimulus



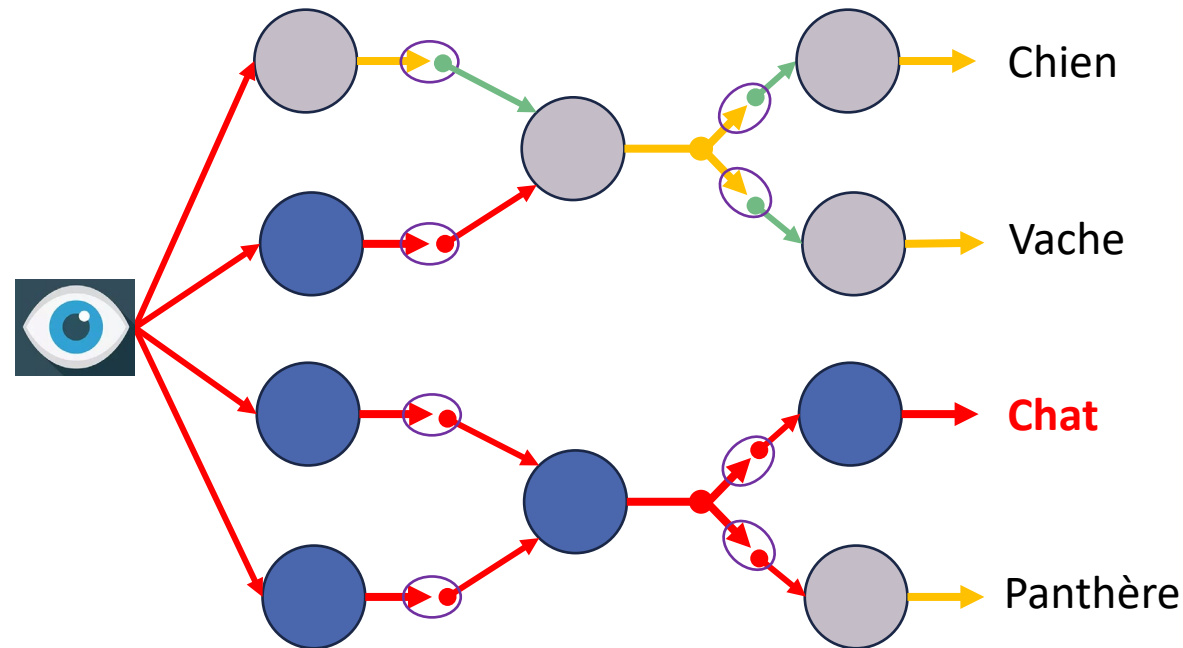
Passage de la troisième couche

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement



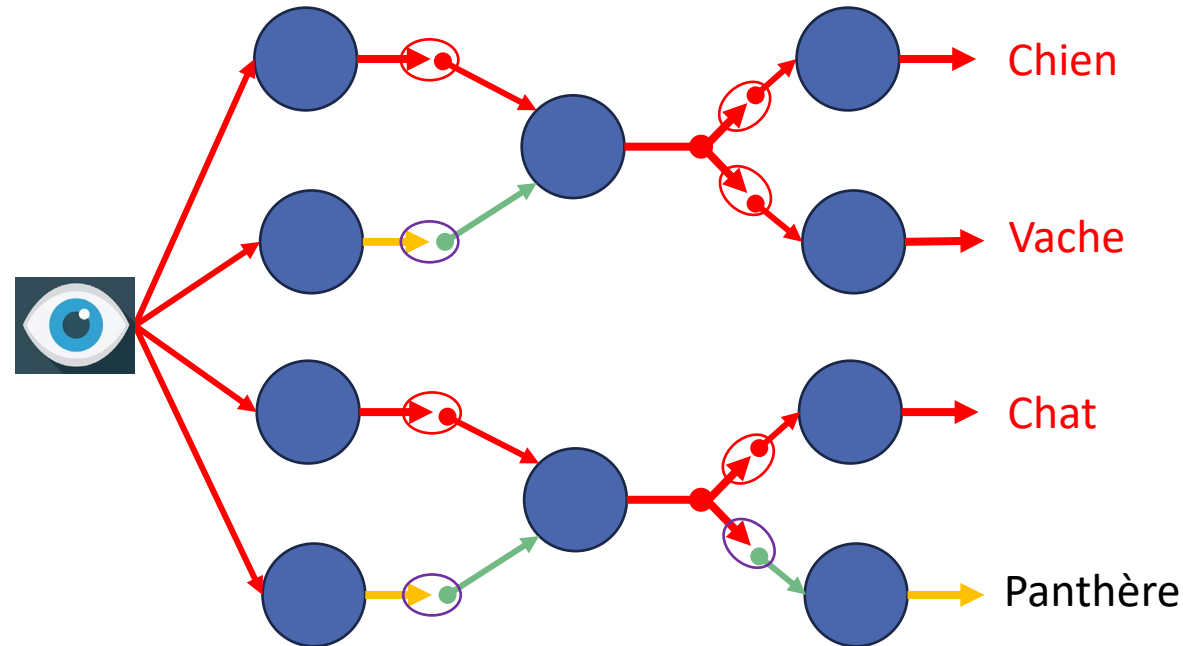
Stimulus



Identification

Réseaux de neurones

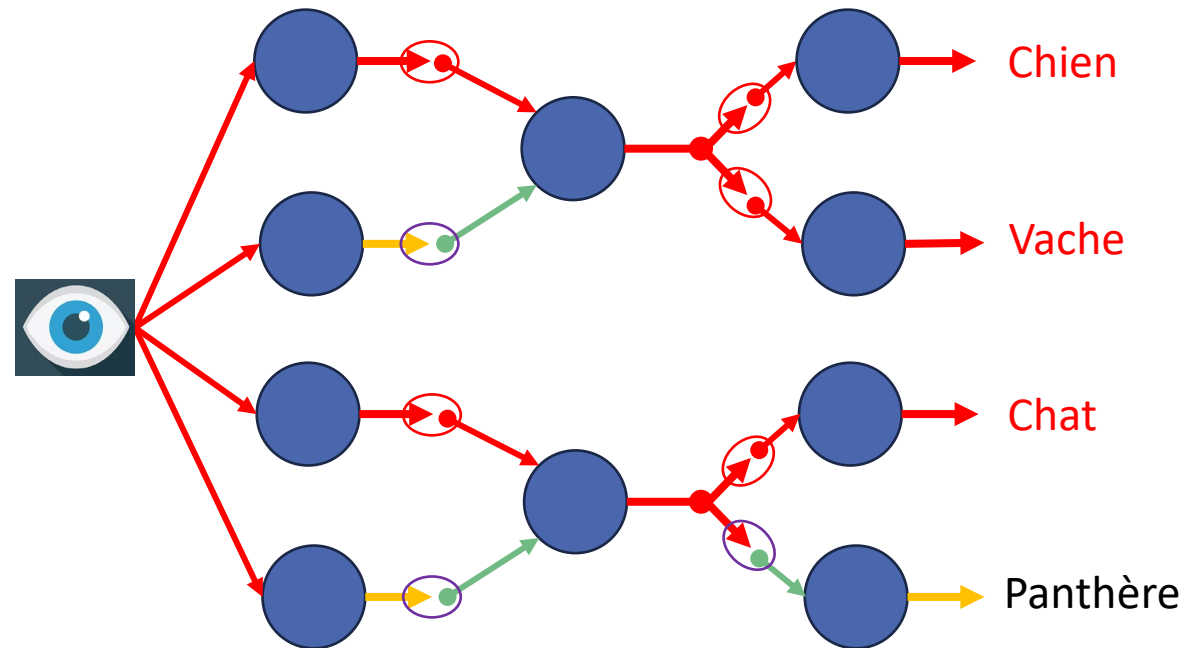
■ Apprentissage



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

Réseaux de neurones

■ Apprentissage

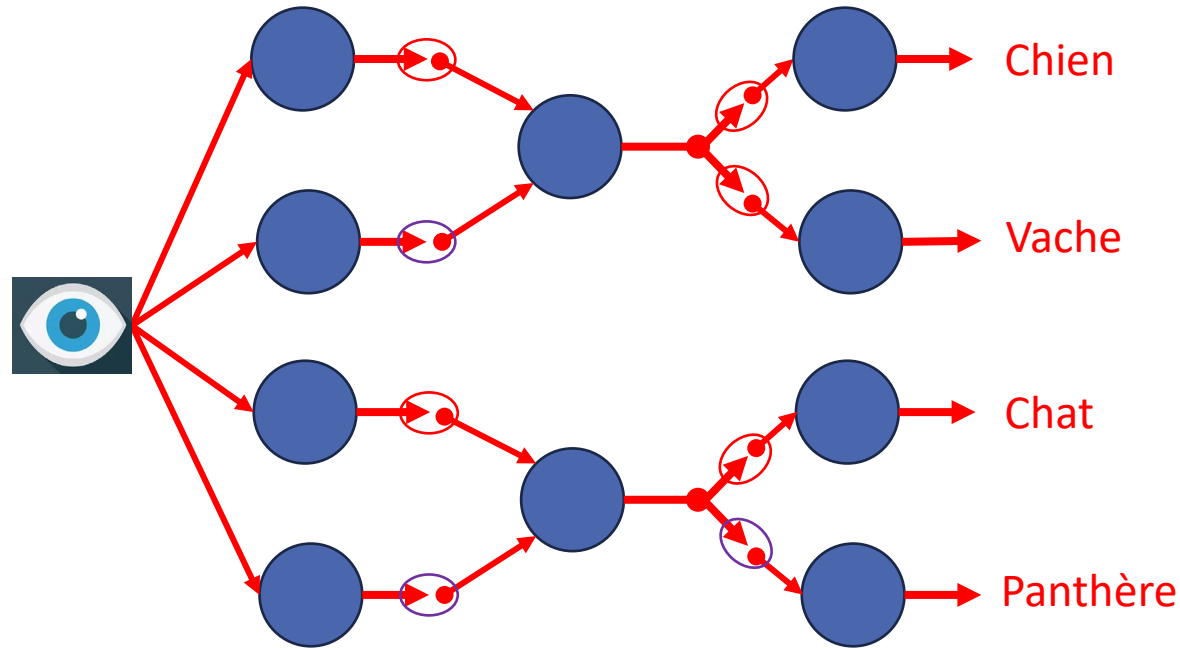


Fixe: Organisations des neurones

Variable: Capacité des synapses

Réseaux de neurones

■ Apprentissage

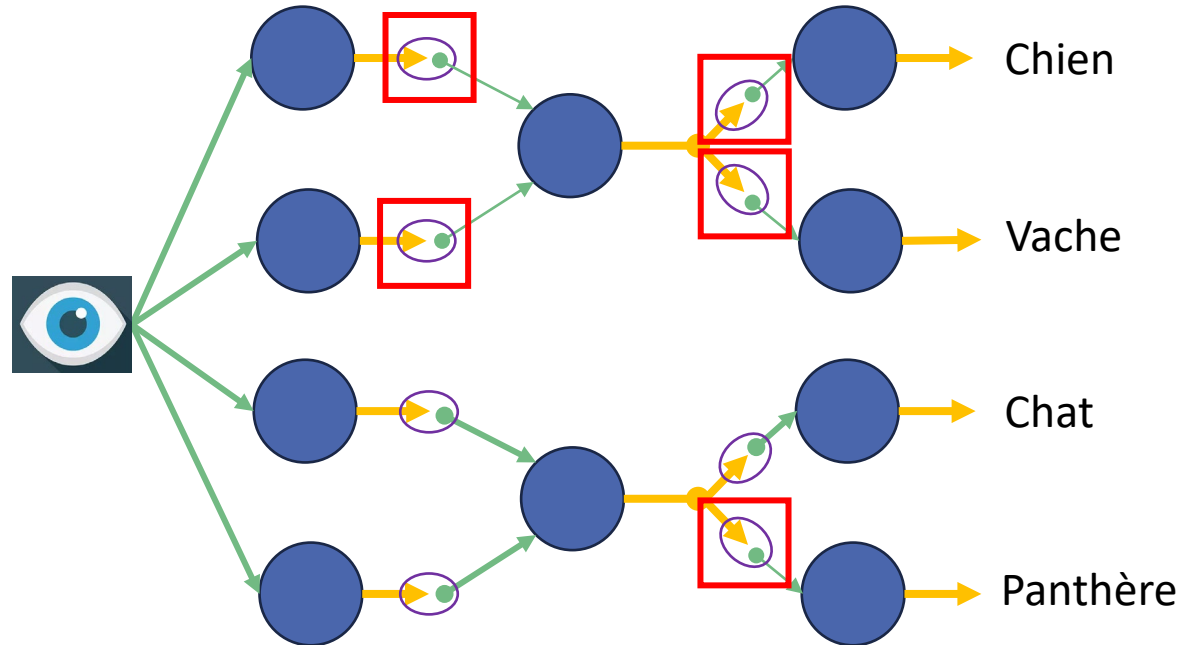


Etat initial

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

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

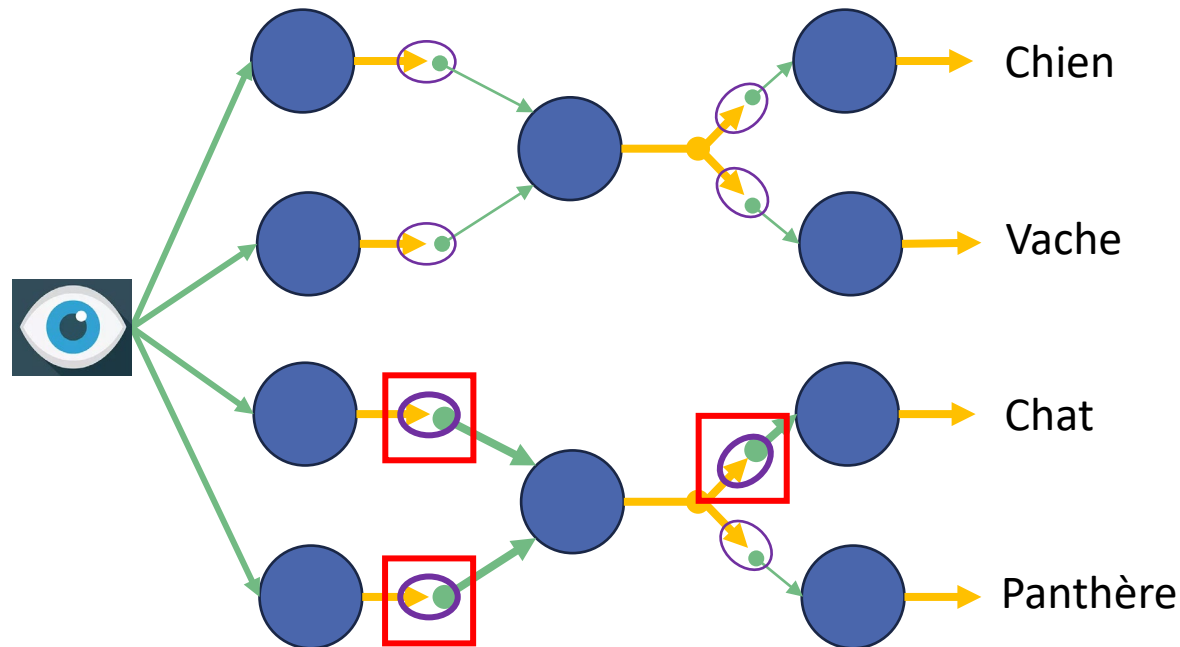
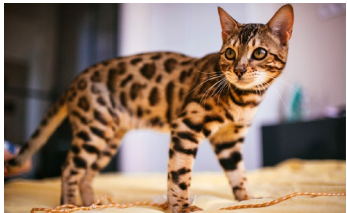


Correction

Inhibition des synapses
menant à une mauvaise
réponse

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

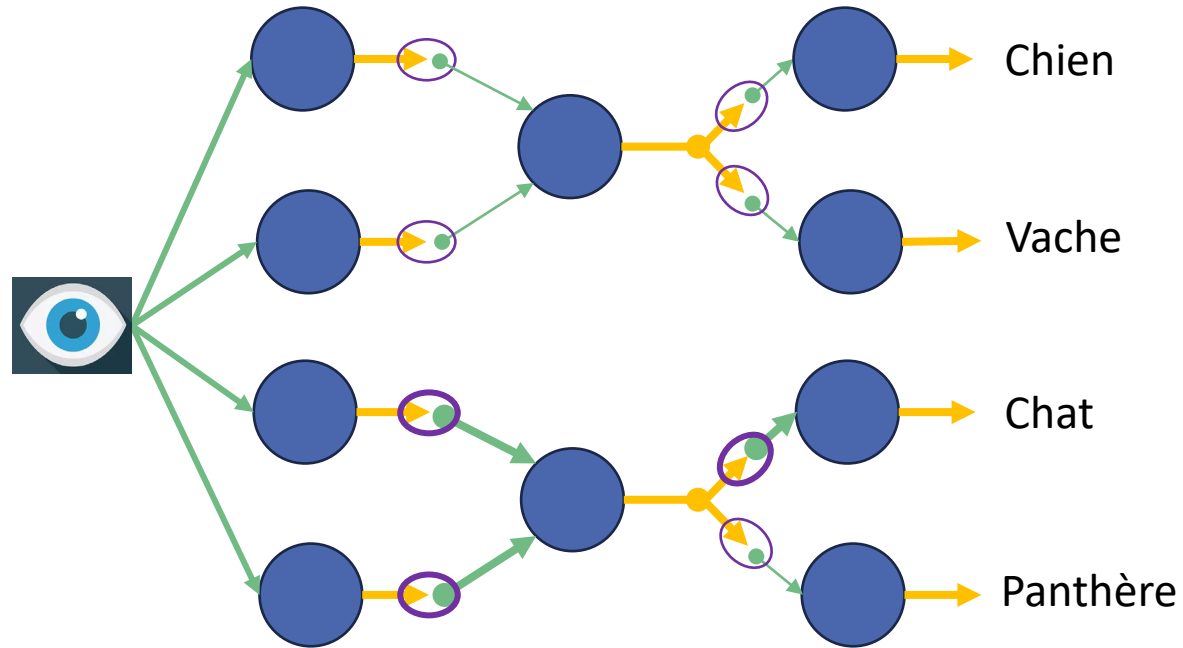


Correction

Excitation des synapses
menant à une bonne
réponse

Réseaux de neurones

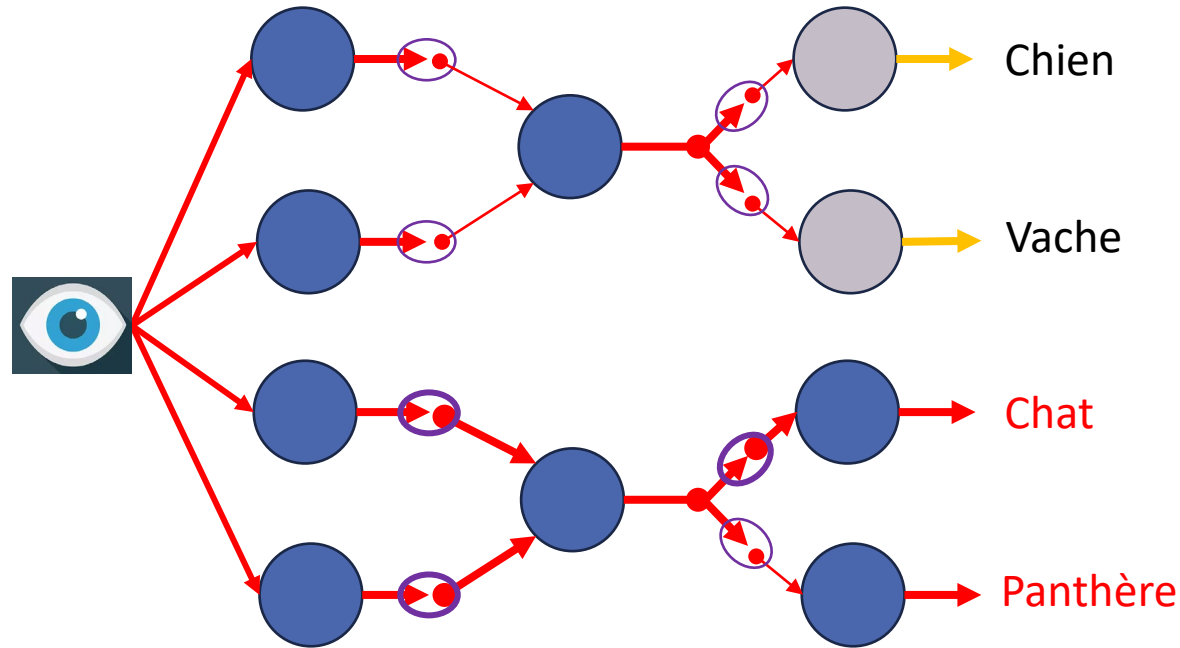
■ Fonctionnement



Interrogation

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

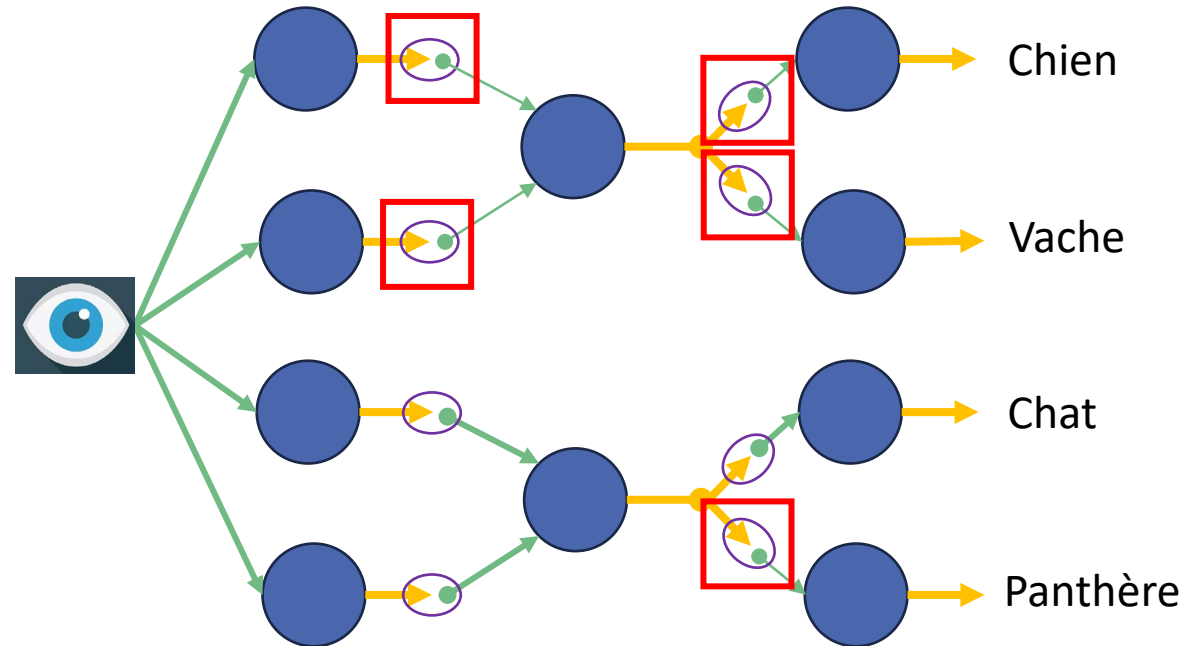


Interrogation

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

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

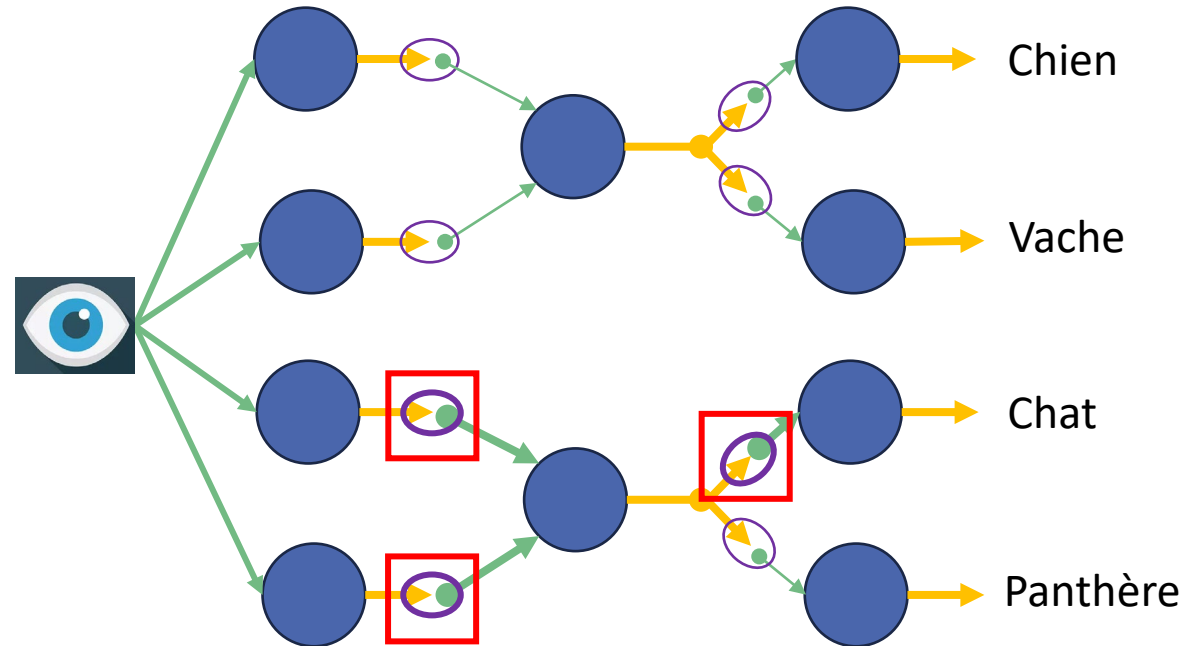


Correction

Inhibition des synapses
menant à une mauvaise
réponse

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

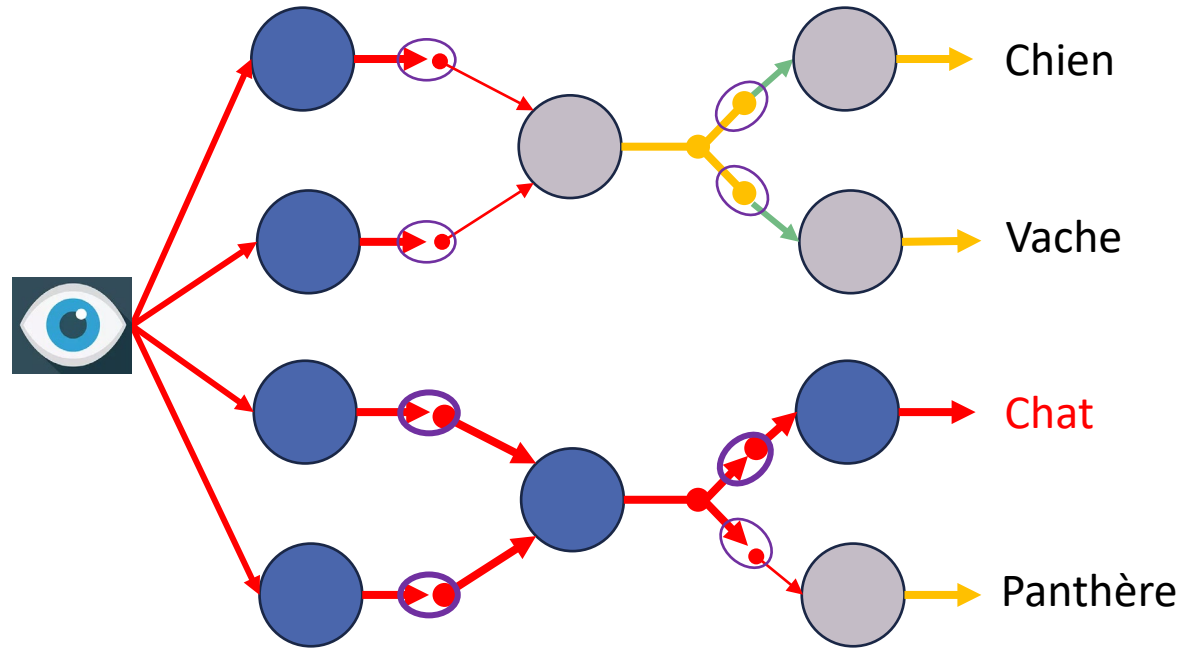


Correction

Excitation des synapses
menant à une bonne
réponse

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

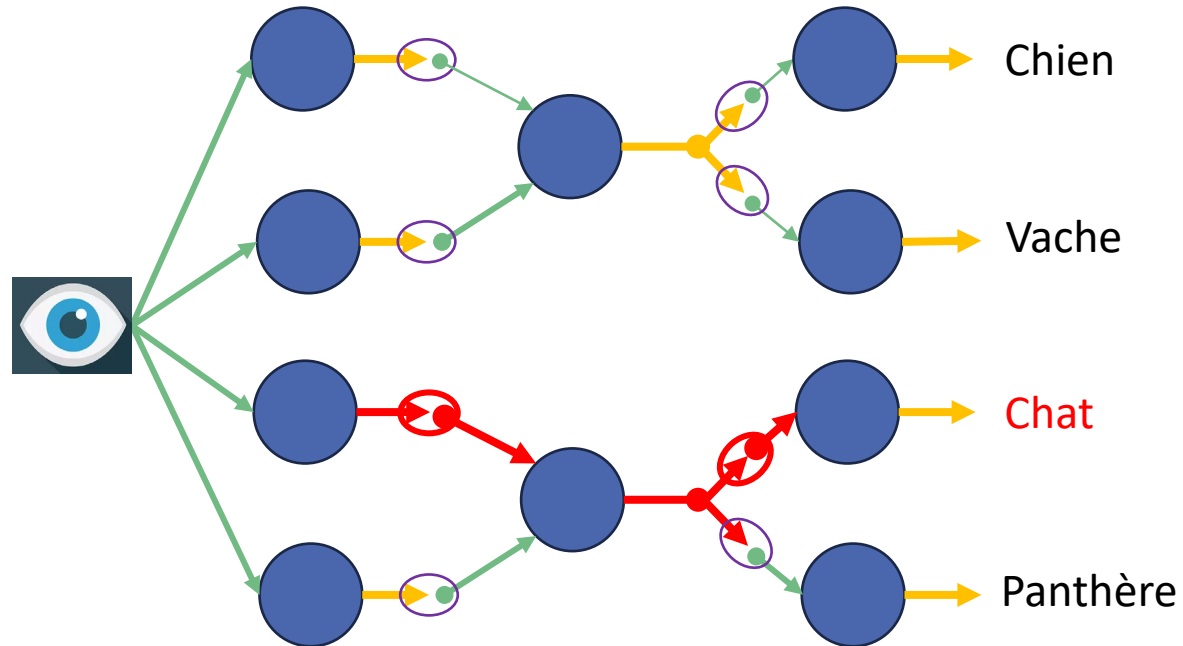


Interrogation

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

Réseaux de neurones

■ Fonctionnement

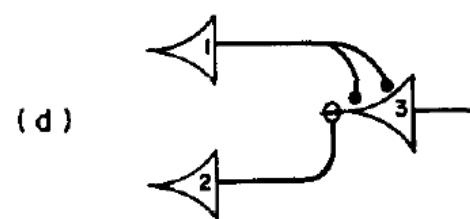
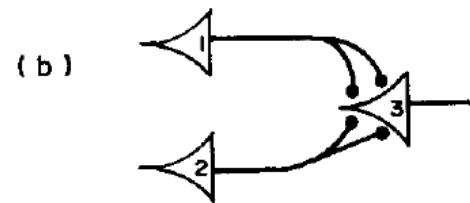
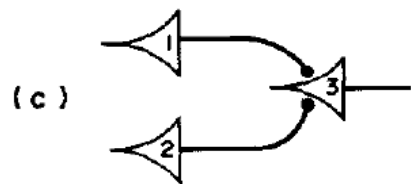
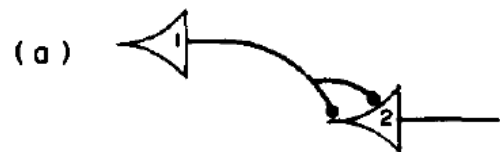


Validation



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>



$$(a) \quad N_2(t) \equiv N_1(t-1);$$

$$(b) \quad N_3(t) \equiv N_1(t-1) \vee N_2(t-1);$$

$$(c) \quad N_3(t) \equiv N_1(t-1) \cdot N_2(t-1);$$

$$(d) \quad N_3(t) \equiv N_1(t-1) \cdot \sim N_2(t-1);$$

5 postulats

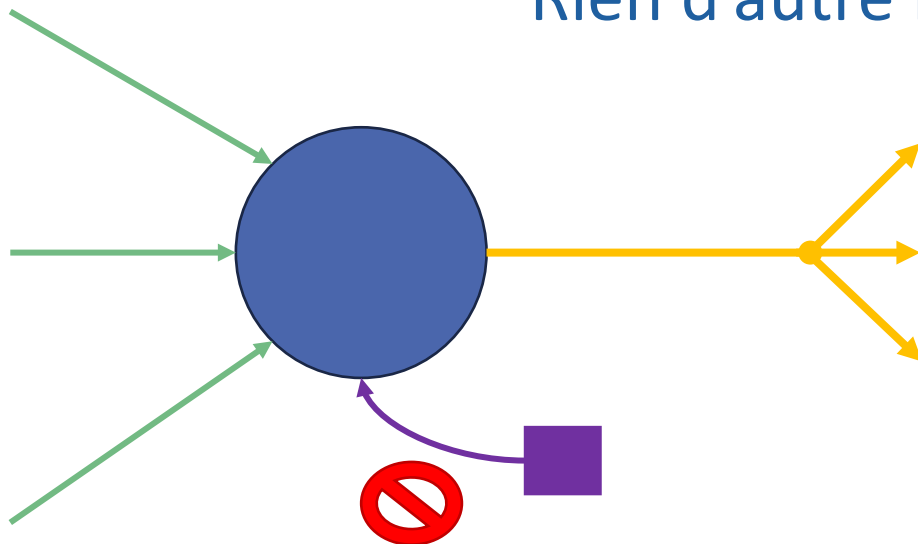
- L'activité d'un neurone est de type « **tout ou rien** »

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 influencer 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

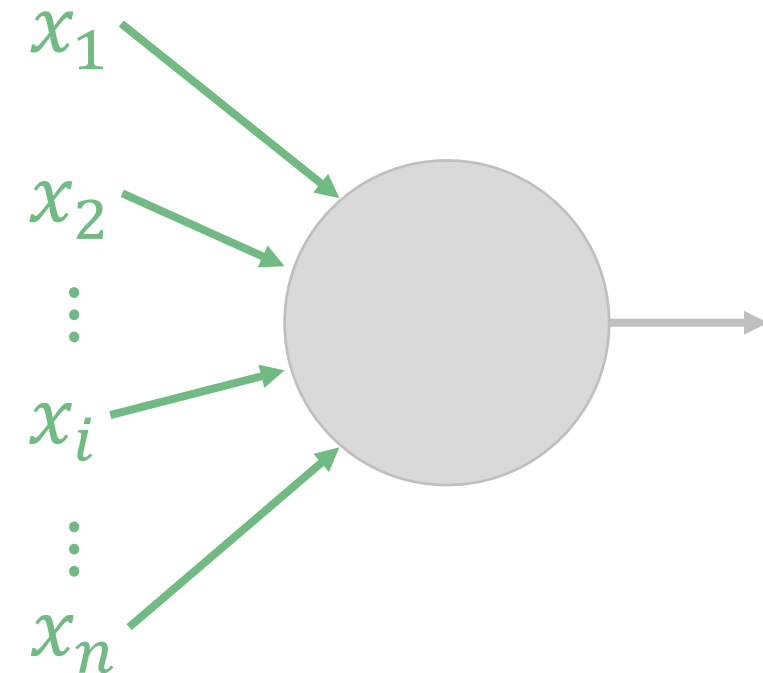
Tout neurone calcule en temps fixe

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 $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n), x_i \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq n$

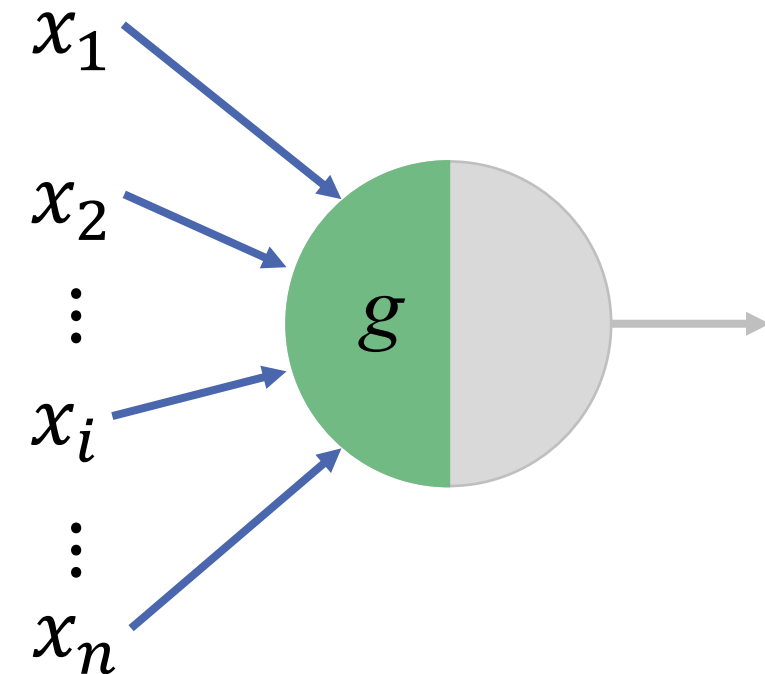


Formalisation

■ 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

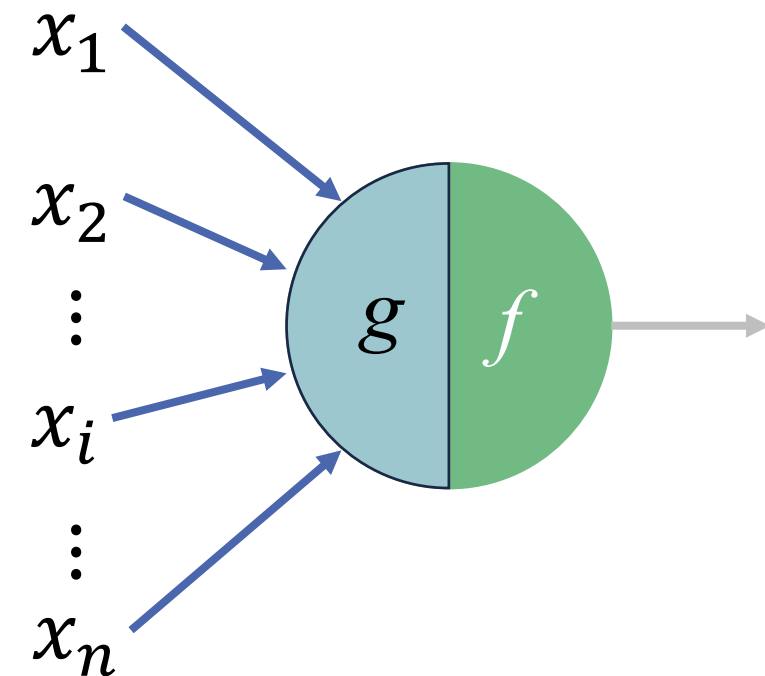
■ Vecteur d'entrée $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n), x_i \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq n$

■ 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 $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n), x_i \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq n$

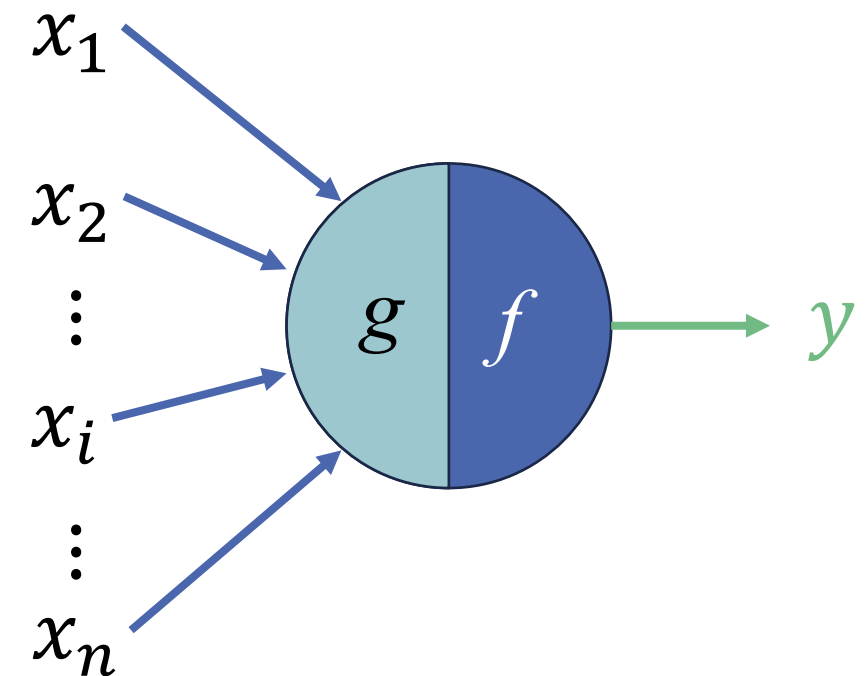
■ Fonction d'agrégation

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

■ 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 $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n), x_i \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq n$

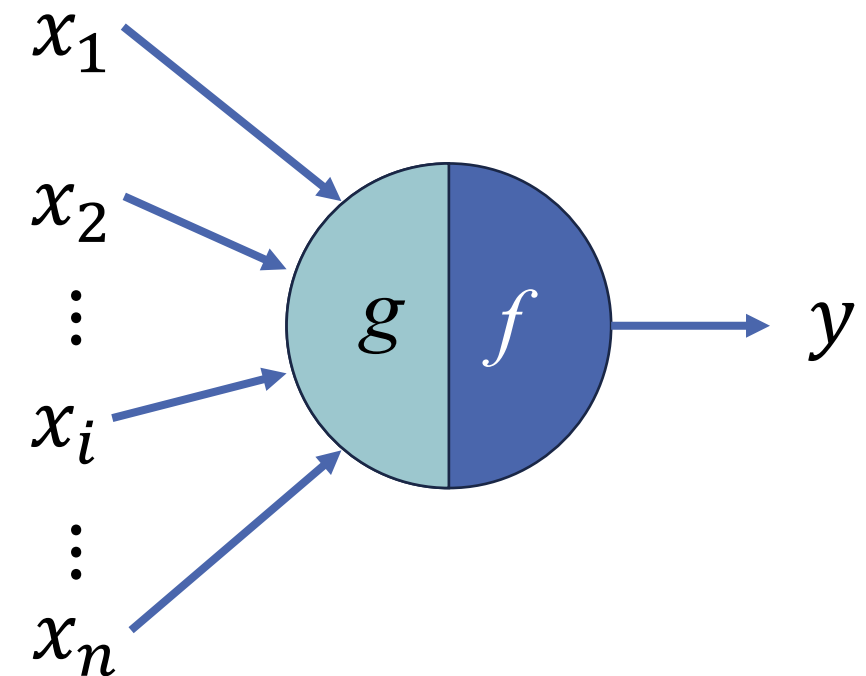
■ Fonction d'agrégation

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

■ 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>

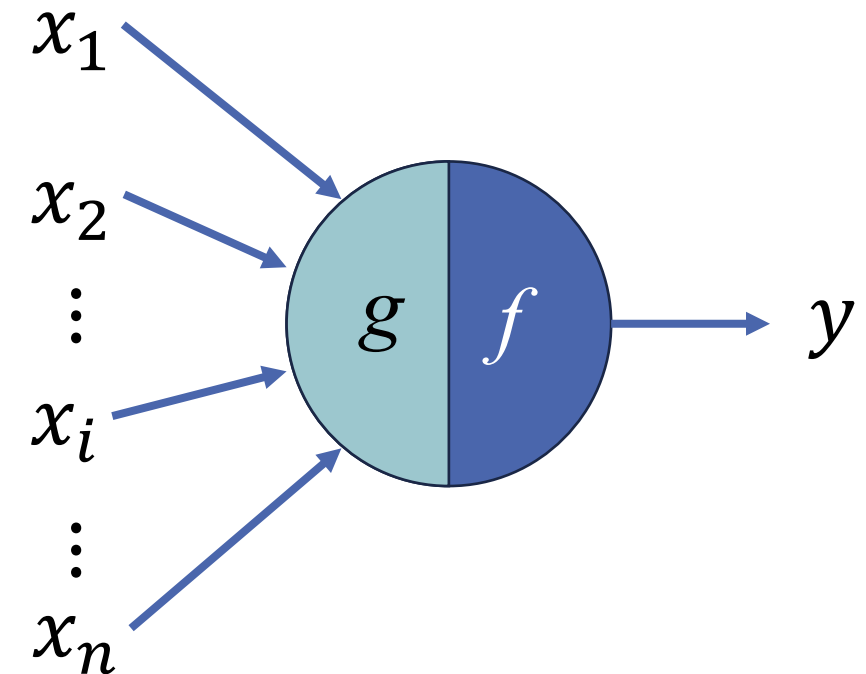
Notation

■ 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

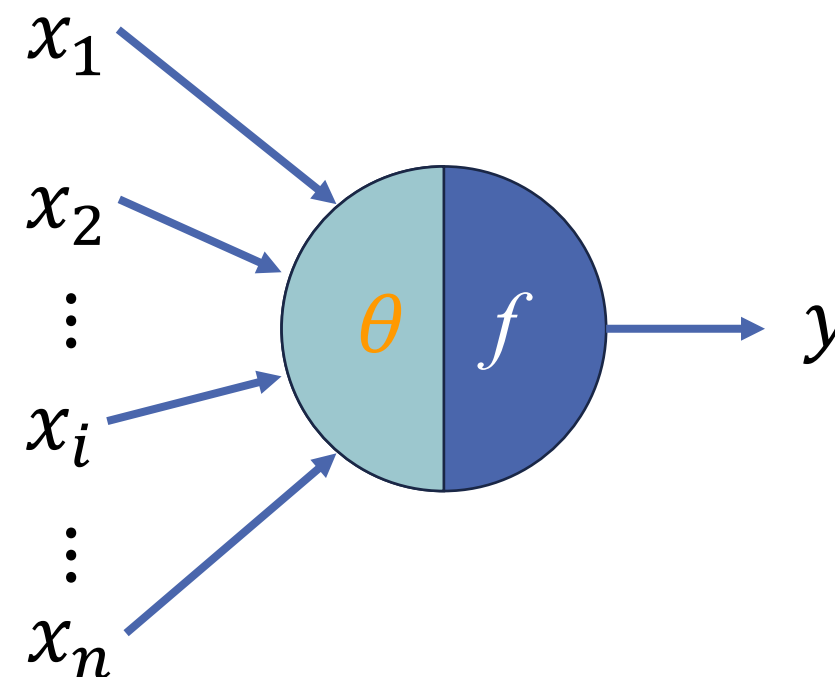
- Fonction d'agrégation

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

- 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

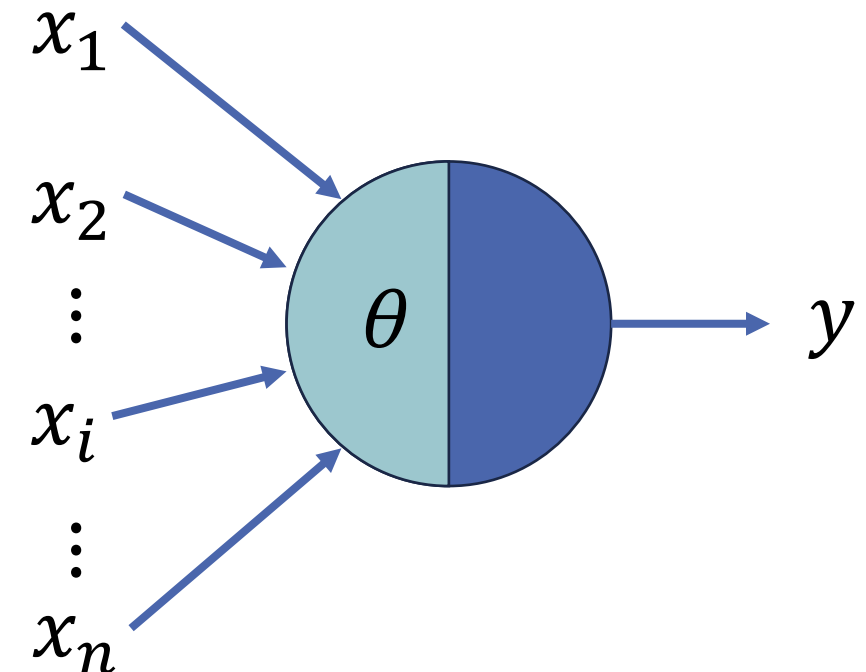
- Fonction d'agrégation

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

- 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

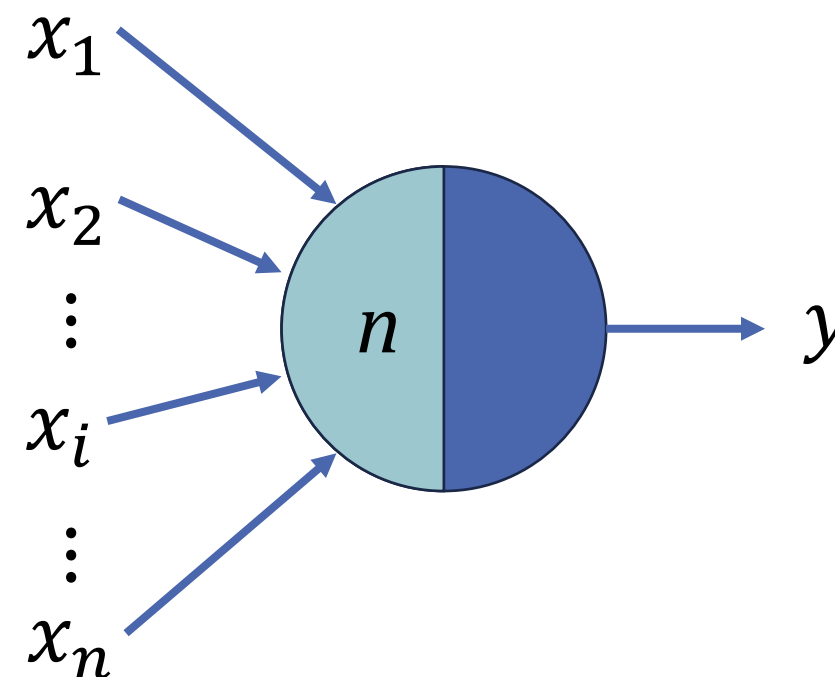
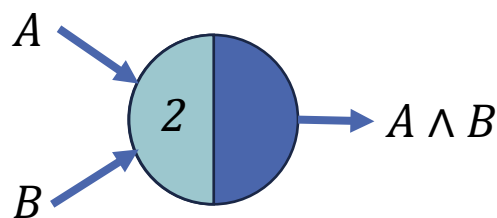
■ Pour n entrées

■ $\theta = n$

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

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

■ Cas binaire



Calculs

■ Ou logique

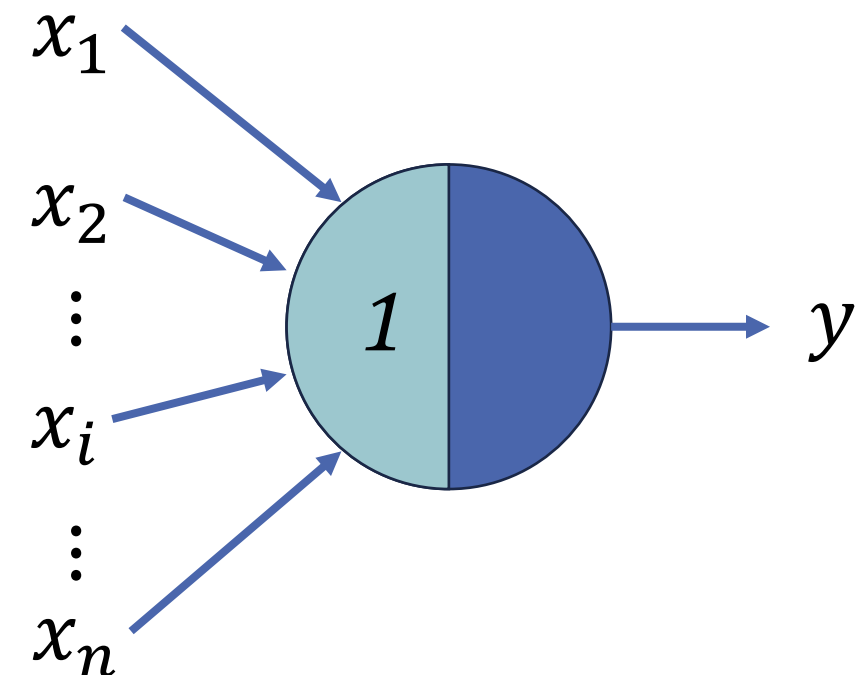
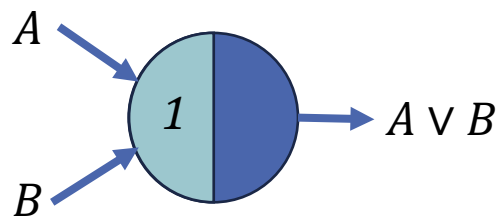
■ Pour n entrées

■ $\theta = 1$

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


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

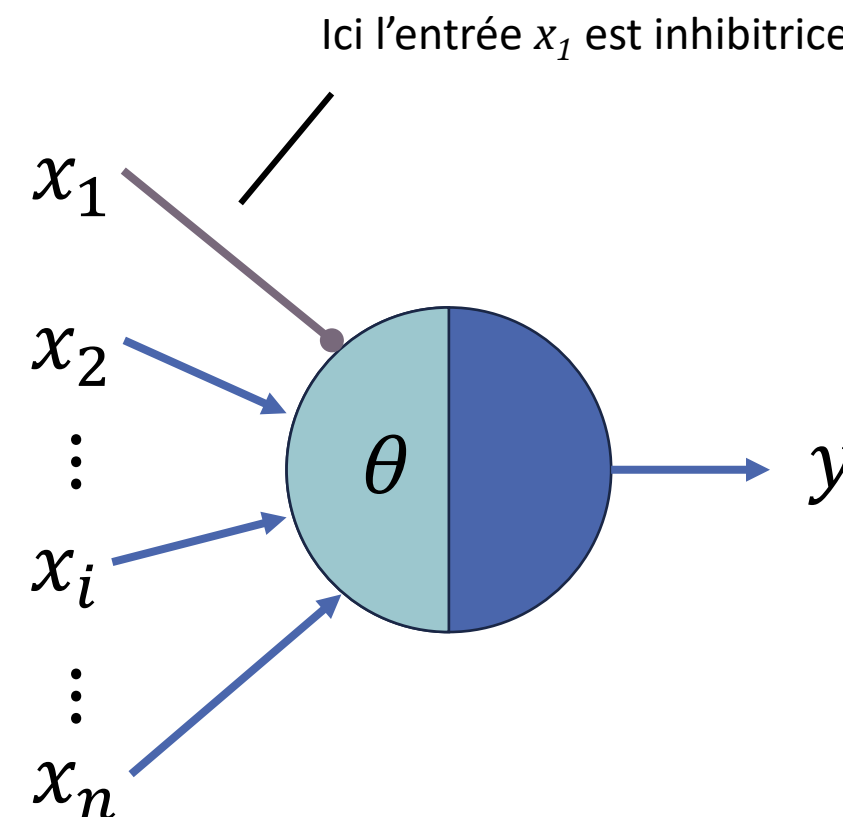
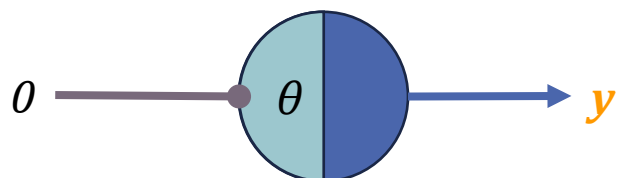
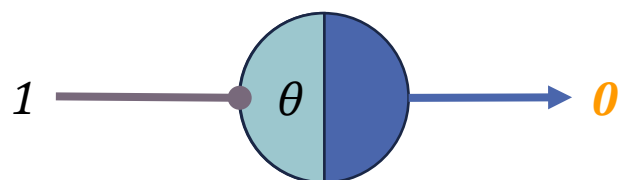
■ Cas binaire



Calculs

■ Négation

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



Calculs

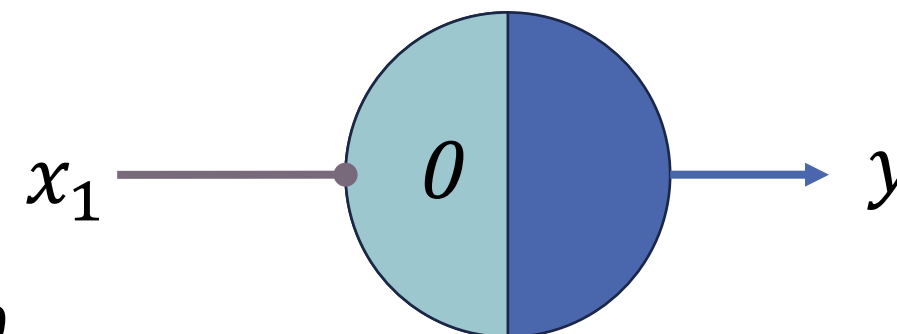
■ Non logique

■ Pour 1 entrée

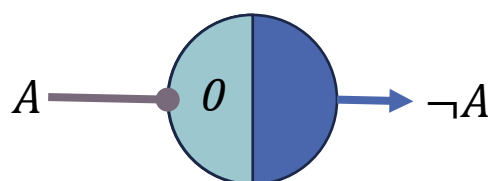
■ $\theta = 0$

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

■ $y = 1$ 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

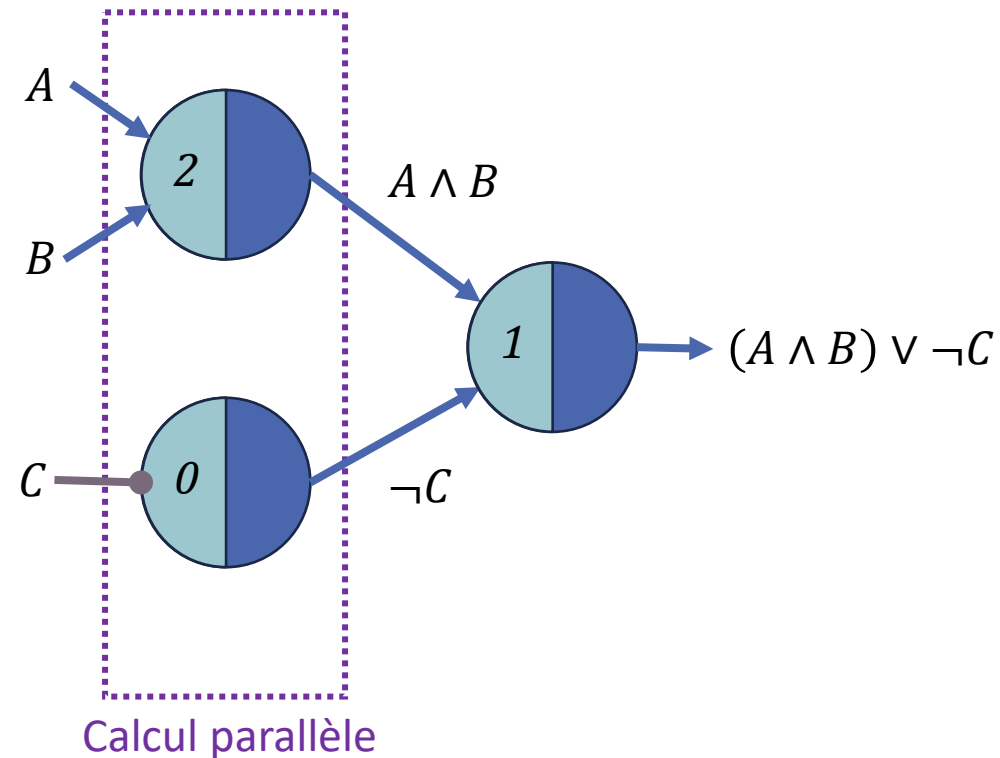
- Toute formule logique peut être représentée par un réseau M-P

- Il est possible de représenter une machine de Turing avec un réseau M-P

- Calcul parallélisable

Exemple de réseau de neurones M-P

■ Formule: $(A \wedge B) \vee \neg C$

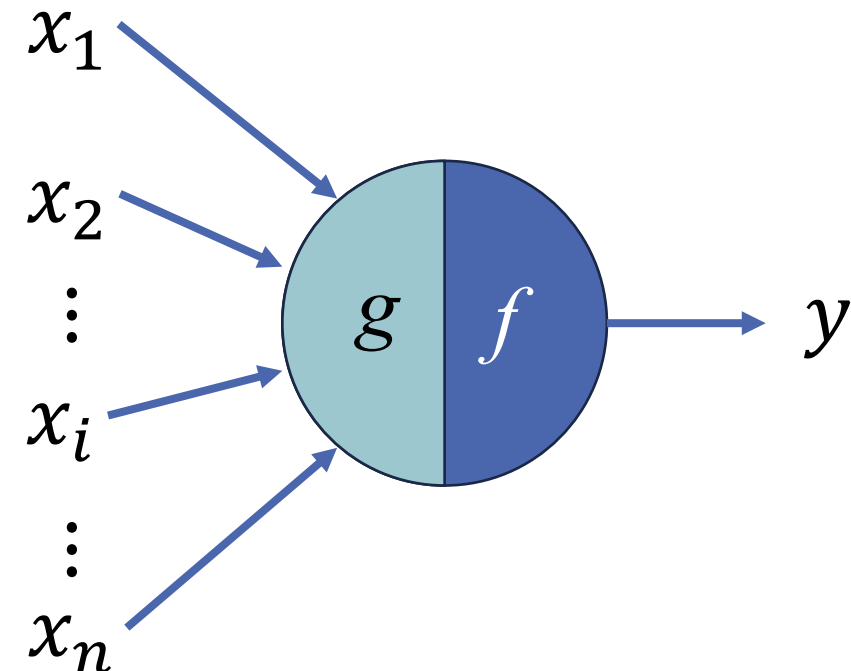


Limitations d'un réseau de neurones M-P

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

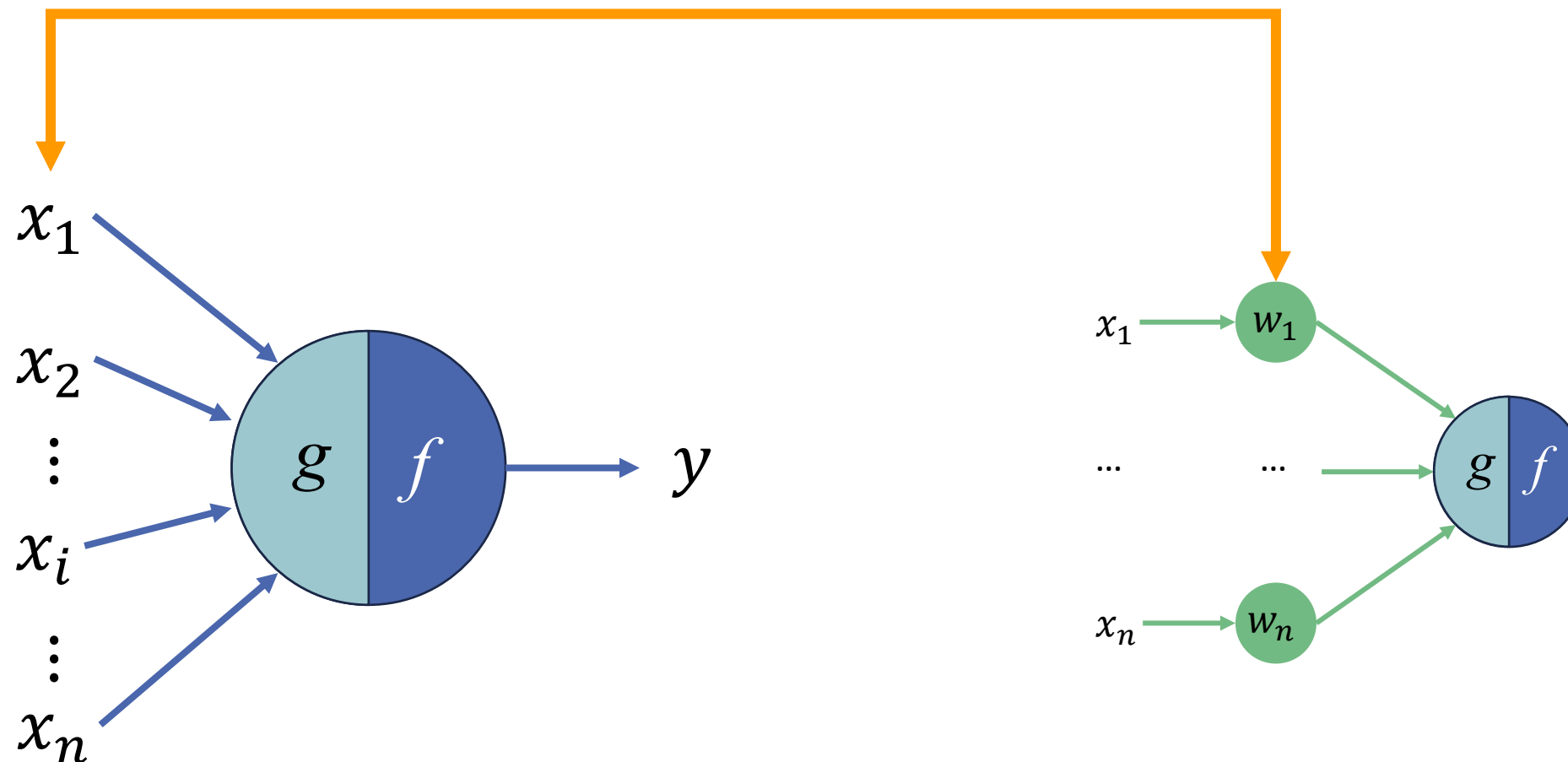
Neurone formel

- 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

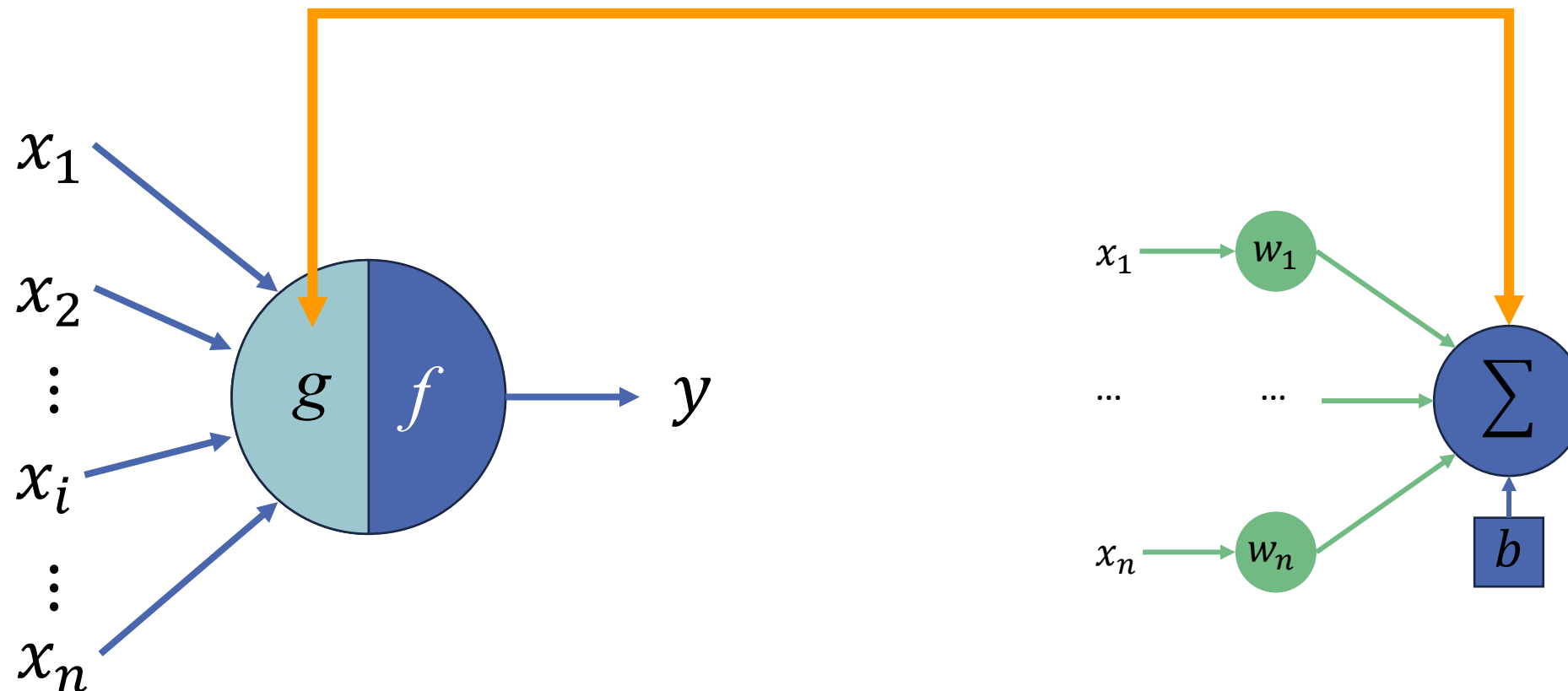


Neurone M-P vers Neurone Formel

■ La fonction d'agrégation g est remplacée par la fonction

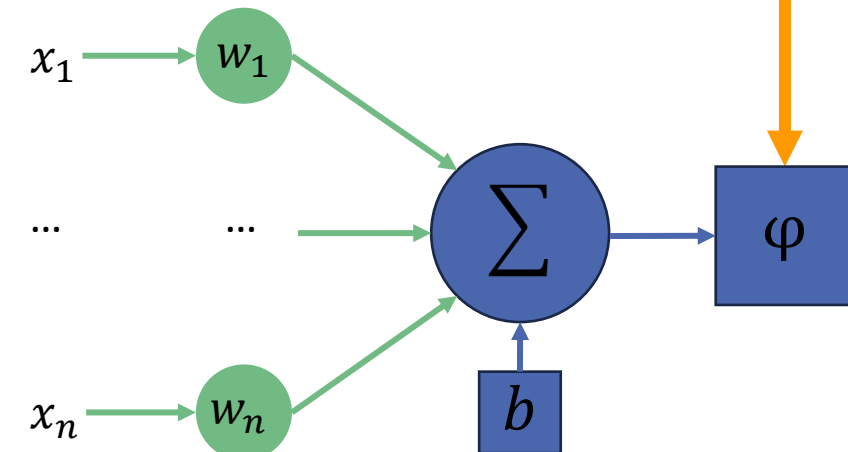
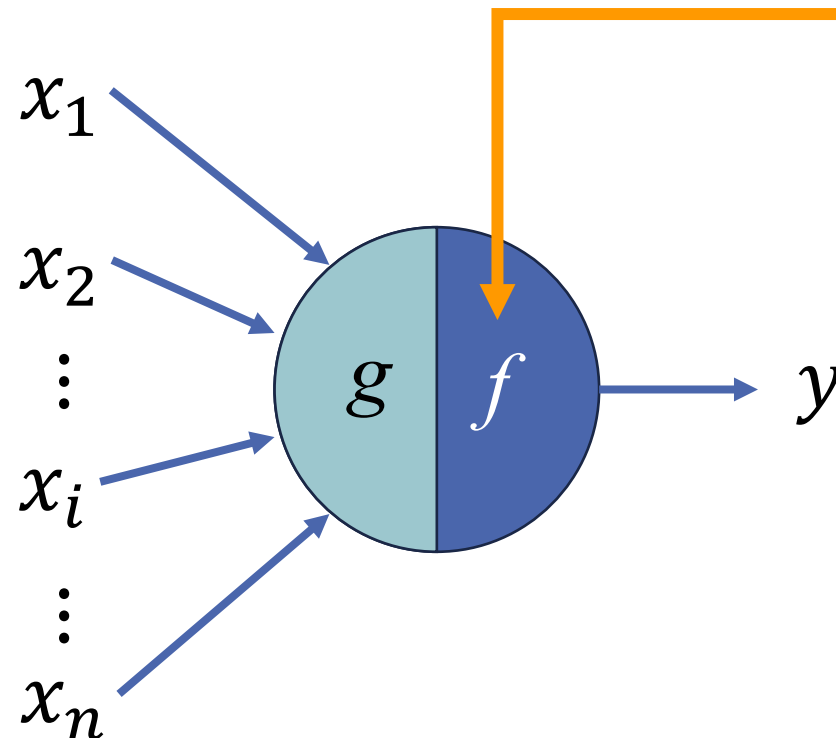
$$\sum_{i=1}^n x_i w_i + b$$

■ b est le biais du neurone (ou valeur de seuil)



Neurone M-P vers Neurone Formel

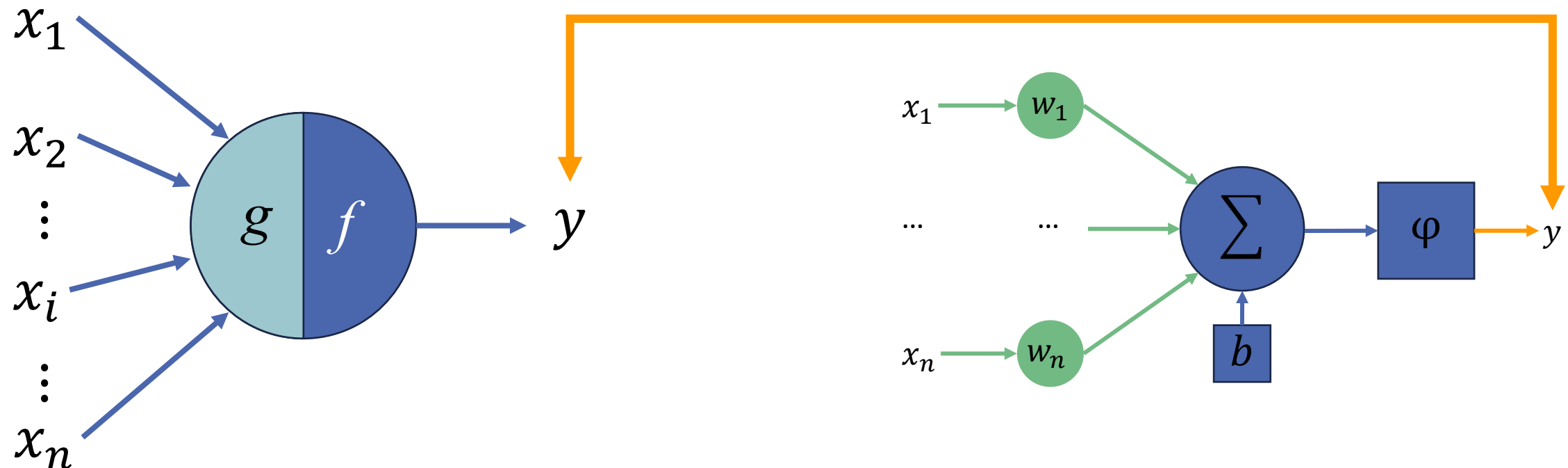
- La fonction d'activation f n'est plus fixe
 - f est remplacée par une fonction quelconque φ



Neurone M-P vers Neurone Formel

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

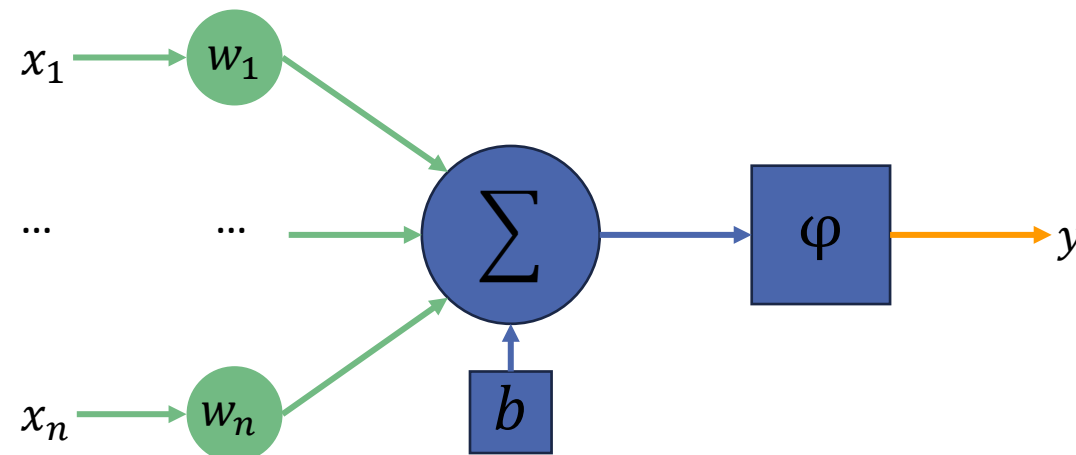
$$y = \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + b \right)$$



Neurone formel

- Fonction à n variable, notée f telle que:

$$y = f(x_1, \dots, x_n) = \underbrace{\varphi}_{\text{Fonction d'activation}} \left(\underbrace{\sum_{i=1}^n x_i w_i + \underbrace{b}_{\text{Biais}}}_{\text{Fonction d'agrégation}} \right)$$



Neurone formel

- Représenter un neurone M-P

- Tous les poids synaptiques w_i sont égaux à 1

- Le biais b a pour valeur $-\theta$

- 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:

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


Neurone formel

- Intégration du biais:

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

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:

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

