
Circuits et réseaux de neurones, bruit, traitement de l'information.

Dr Jean-François Vibert

ESIM, INSERM UMR-S 707

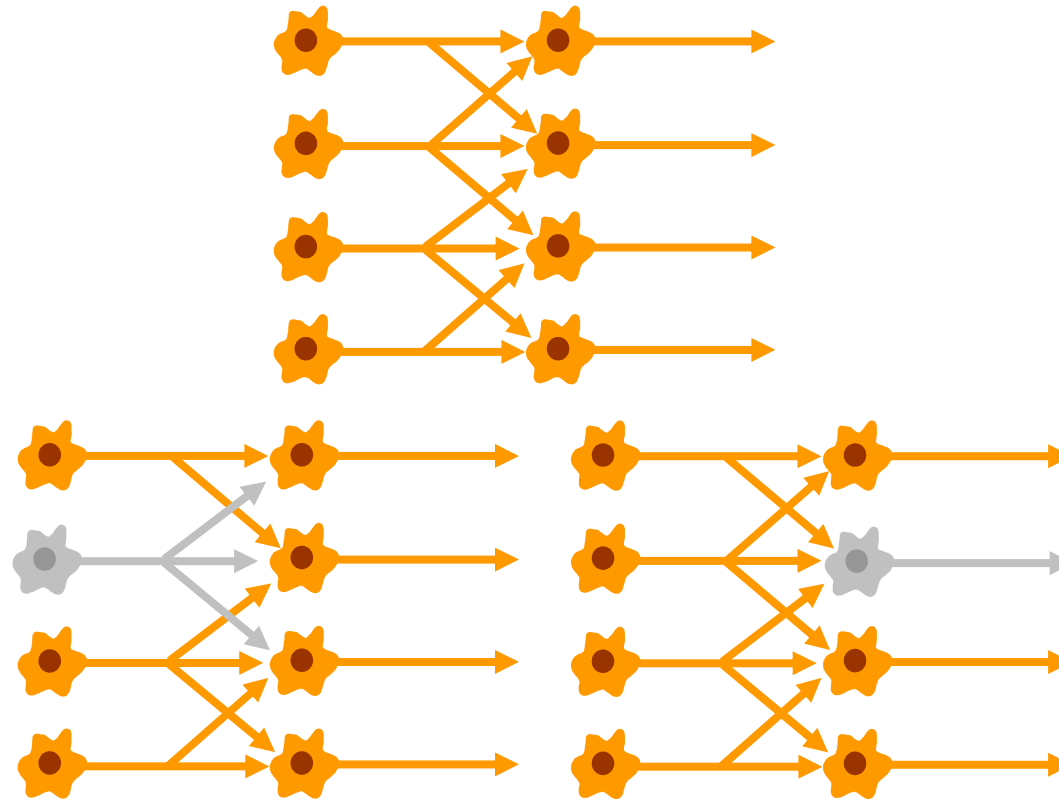
Faculté de Médecine Pierre et Marie Curie,
Site Saint-Antoine, Université Paris 6

Circuits et réseaux de neurones

- ▶ Les neurones ne sont jamais isolés.
 - ▶ Ils communiquent entre eux par les synapses, et forment des réseaux
 - ▶ au sein desquels l'information transite, est modifiée, améliorée, extraite, etc.
 - ▶ Le système nerveux traite l'information en assemblant des éléments lents
 - ▶ 1ms pour un potentiel d'action, avec une période réfractaire l'empêchant de répondre très rapidement à une nouvelle sollicitation.
 - ▶ C'est l'organisation des circuits de traitement de l'information qui compense la lenteur.
- ▶ Le système nerveux produit également des comportements, des rythmes
 - ▶ comme le rythme respiratoire ou celui de la marche
 - ▶ ils peuvent être, extrêmement lents comparés aux fréquences de décharge des neurones individuels (la respiration a une fréquence de 10 à 12 par minute).
 - ▶ Là encore, on est en présence d'architectures de réseaux de neurones permettant de produire ces rythmes lents.
- ▶ Le système nerveux produit également la conscience, la pensée
 - ▶ encore très mystérieux, ne serait-ce que parce que cela n'est pas accessible expérimentalement chez des animaux,
 - ▶ qui ont peut-être ce genre de fonctions supérieures, mais qui ne peuvent l'exprimer de manière compréhensible pour les humains.
 - ▶ On ne sait parfois même pas où les situer anatomiquement.
- ▶ Néanmoins, un certain nombre de circuits ont un rôle bien connu...

Principe de convergence-divergence

- ▶ La même information est véhiculée simultanément
 - ▶ par de nombreux axones (on parle de traitement parallèle de l'information) et elle est distribuée sur de nombreux neurones cibles.



Réseaux de neurones JFV (2007)

M1 Neurosciences

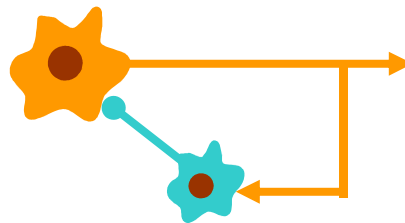
3

Fonctionnement statistique

- ▶ Tous les axones n'ont pas exactement la même longueur,
 - ▶ L'information partie en même temps d'un récepteur sensoriel va arriver au bout d'un certain temps, *en moyenne* au même moment.
 - ▶ Cette arrivée des influx légèrement désynchronisée
 - ▶ Cela produit ce que l'on appelle un *bruit structurel*.
- ▶ D'une manière générale, le système nerveux fonctionne donc sur une base statistique.
 - ▶ Il va faire la moyenne pondérée des informations,
 - ▶ ce qui assure sa fiabilité.
- ▶ Cette redondance de l'information et des neurones est retrouvée dans l'ensemble du système nerveux, et plus particulièrement au niveau des structures sensorielles.

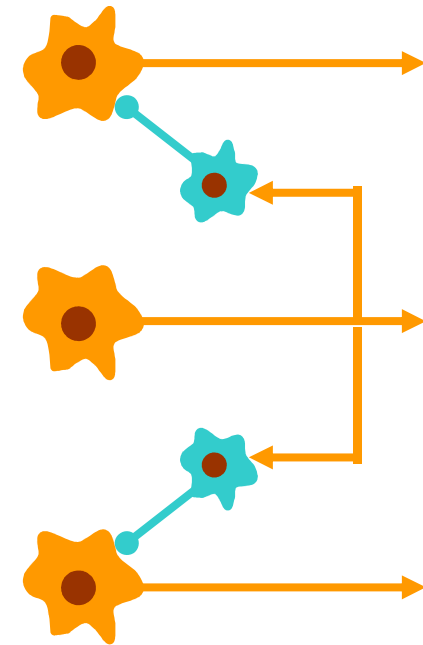
Circuit d'inhibition récurrente

- ▶ Un limiteur de fréquence,
 - ▶ plus le neurone décharge vite, plus il est inhibé, ce qui a pour effet de limiter sa fréquence de décharge à une valeur maximale, ce plateau étant atteint exponentiellement.
 - ▶ Le prototype en est la boucle de rétroaction inhibitrice de Renshaw au niveau des motoneurones dans la corne antérieure de la moelle, qui empêche que les muscles soient trop sollicités par une fréquence de décharge trop importante.



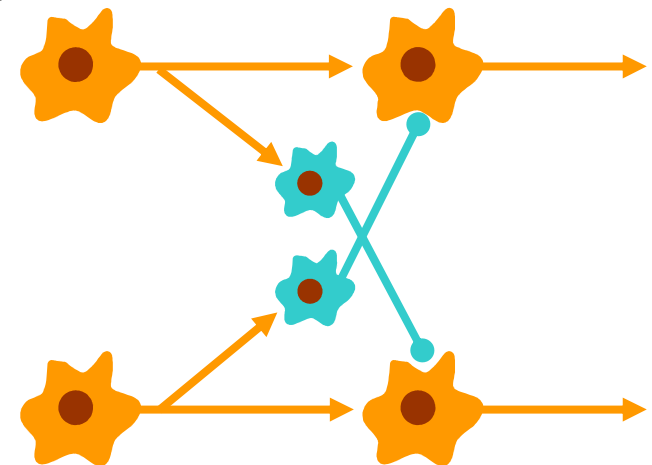
Circuit d'inhibition latérale

- ▶ Met au silence ou diminue la fréquence de décharge des neurones qui sont autour
 - ▶ Fait ressortir l'activité du neurone générant cette inhibition latérale, et donc augmente le contraste.
 - ▶ Ce type de circuit se retrouve dans tous les systèmes sensoriels, du récepteur jusqu'au cortex.
 - ▶ Cela n'a évidemment d'intérêt que s'il existe une topologie dans le système mettant en jeu ce type de circuit élémentaire (vision, somesthésie, etc.)



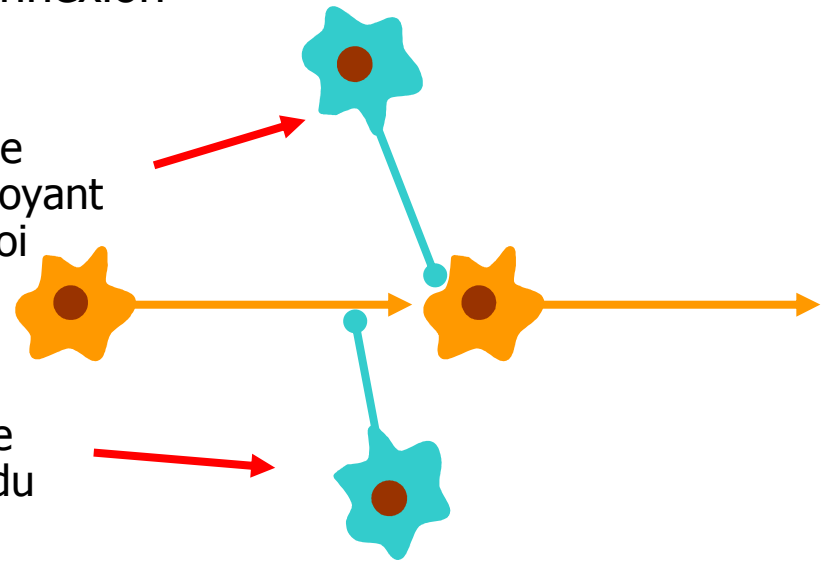
Circuit d'inhibition antagoniste

- ▶ Ce circuit implique deux systèmes dont l'un doit être au silence lorsque l'autre est actif.
 - ▶ C'est le cas du système des extenseurs et des fléchisseurs.
 - ▶ Pour qu'un mouvement ait lieu, lorsque le fléchisseur est actif, l'extenseur doit être inactif.
 - ▶ Le prototype en est l'inhibition croisée extenseur / fléchisseur.
 - ▶ Mais on a également retrouvé le même principe pour des fonction plus complexes comme la marche.



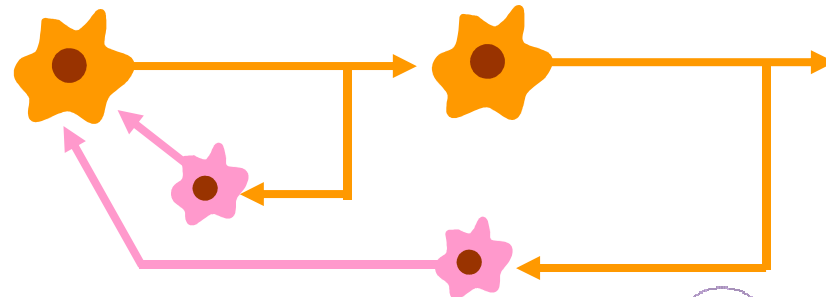
Circuits de blocage ou portillon

- ▶ Ce circuit permet de contrôler la transmission d'un neurone à un autre par l'information venant troisième neurone.
 - ▶ Ce blocage peut être le fait d'une connexion synaptique du neurone contrôlant sur le neurone de sortie,
 - ▶ en produisant un ipsp qui se somme à l'epsp produit par le neurone envoyant l'information, ce qui empêche l'envoi d'un potentiel d'action par le neurone de sortie.
 - ▶ Cela peut être aussi le fait d'une connexion présynaptique de l'axone du neurone contrôlant sur l'axone du neurone envoyant l'information.
 - ▶ Le contrôle segmentaire de la douleur au niveau de la moelle met typiquement en jeu ce mécanisme (gate-control de Melzak et Wall).



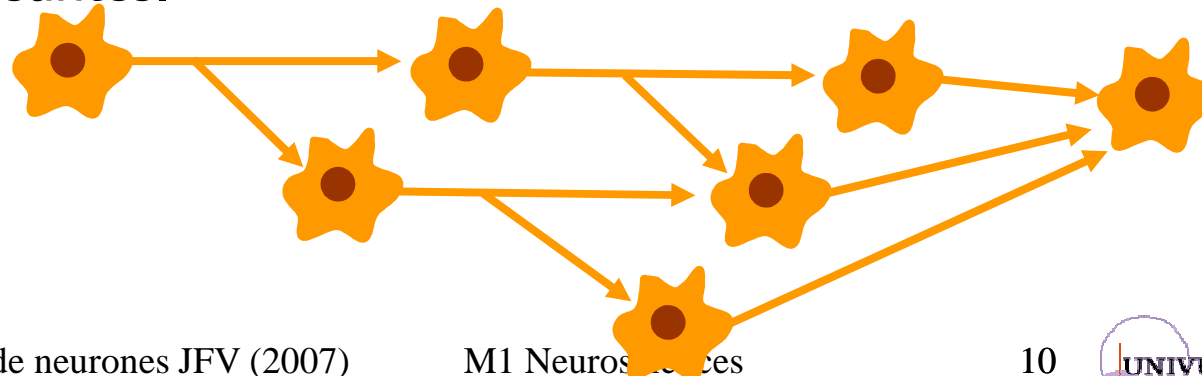
Circuit réverbérant ou de rétroaction positive

- ▶ Ce circuit maintient un niveau d'activité permanent grâce à un retour excitateur, direct ou indirect vers le neurone ayant lui-même envoyé l'information.
 - ▶ Ce type de circuit se rencontre de fait dans les grands réseaux (comme la formation réticulée) ou les très nombreuses connexions qui existent font que le signal arrive au bout d'un délai variable à revenir sur son émetteur.



Circuit amplificateur

- ▶ Ce circuit amplifie le signal provenant d'un neurone en le distribuant à plusieurs neurones qui eux mêmes le redistribuent à plusieurs neurones, etc., qui peuvent eux même converger vers un seul neurone.
 - ▶ Ainsi le signal est amplifié.
 - ▶ En pratique, c'est la conjonction des deux types de circuits, réverbérant et amplificateur, qui est présente dans les grands réseaux, et qui semble leur conférer des propriétés émergentes intéressantes.



Grands réseaux de neurones

- ▶ Le système nerveux central n'est lui-même qu'un immense réseau de neurones,
 - ▶ ou plutôt un ensemble de réseaux reliés entre eux.
- ▶ Il est évident que les circuits élémentaires qui viennent d'être décrits ne sont pas isolés,
 - ▶ ils constituent eux-mêmes des réseaux au sein desquels l'information transite, est transformée, ou même générée.
- ▶ Ces grands réseaux sont le domaine d'étude privilégié de la neurobiologie théorique et surtout de la neurobiologie numérique,
 - ▶ car leur étude analytique est rapidement impossible étant donné le nombre d'équations qui s'enchaînent.
- ▶ Or on sait bien que c'est de la compréhension du fonctionnement de ces grands réseaux
 - ▶ que viendra le début du début de la compréhension du fonctionnement des fonctions supérieures.

Réseaux ordonnés

- ▶ Les réseaux ordonnés, ou cristallins, sont des réseaux dans lesquels un motif de connexions entre neurones est répété de manière régulière, à la manière d'un cristal.
 - ▶ Il en existe de nombreux exemples dans le système nerveux
 - ▶ la rétine, le cervelet, l'hippocampe ou corne d'Ammon en sont les exemples les plus typiques, mais les colonnes corticales motrices ou sensitives en sont un autre exemple.

Réseaux « aléatoires »

- ◻ Ce sont les réseaux au sein desquels il n'a pas été possible de déterminer une structure cohérente de connexions.
 - ▶ La formation réticulée bulbo pontine en est un exemple typique.
 - ▶ Néanmoins ces réseaux, ont des propriétés émergentes (inattendues)
 - ▶ car ces neurones sont organisés en réseaux et non du fait des propriétés des neurones.
 - ▶ On distingue les réseaux excitateurs et les réseaux mixtes, excitateurs et inhibiteurs (un réseau inhibiteur inhiberait immédiatement toute information arrivant sur lui).
 - ▶ Ces réseaux peuvent être
 - ▶ complètement connectés (chaque les neurone est connecté à tous les autres)
 - ▶ partiellement connectés (chaque neurone n'est connecté qu'à quelques autre, la situation habituelle).

Réseaux « aléatoires »

- ▶ Ce sont les réseaux excitateurs, ou en majorité excitateurs, partiellement connectés qui semblent avoir les propriétés émergentes les plus intéressantes
 - ▶ Les informations venant d'autres neurones sont amplifiées, mémorisées et éventuellement recirculées grâce aux circuits amplificateurs et réverbérants qui se constituent, éventuellement dynamiquement au sein de ces réseaux.
 - ▶ Dynamiquement car il est possible qu'à un instant donné, un neurone soit en état de période réfractaire, et donc non réceptif, alors qu'un instant plus tard il sera de nouveau capable de retransmettre l'information.
 - ▶ Cette notion de réseau dynamique semble être la règle dans ce genre de réseau.
- ▶ Les réseaux en majorité inhibiteurs s'éteignent
 - ▶ Et semblent moins intéressants

Réseaux dynamiques

- ▶ Le système nerveux peut modifier ses connexions sur des temps prolongés en modifiant le trajet de ses axones
 - ▶ l'axone pourra se diriger vers un autre neurone cible
 - ▶ si un neurone cible produisant normalement des molécules induisant un tropisme positif, vient à arrêter sa production
 - ▶ si une voie est coupée (lésion).
 - ▶ Néanmoins, cela se passe sur des temps longs,
 - ▶ étant donnée la vitesse de la régénérescence nerveuse.
- ▶ Le système nerveux a d'autres moyens pour modifier la configuration de ses réseaux.
 - ▶ Il peut utiliser les neuromodulateurs, qui agissent en modifiant es transmissions synaptiques
 - ▶ comme au niveau de la rétine, où la dopamine agit comme neuromodulateur en modifiant la conductance des gap junctions entre les cellules horizontales
 - ▶ mais aussi des moyens plus immédiats pour changer sa configuration, en utilisant des circuits de type portillon,
 - ▶ soit de type inhibiteur pour supprimer provisoirement une connexion,
 - ▶ soit excitateur pour faciliter l'usage d'une voie.

Réseaux partagés

- ▶ De nombreux neurones sont spécialisés dans une fonction, et ne servent qu'à celle-ci.
 - ▶ Mais la plupart des neurones sont impliqués dans plusieurs fonctions,
 - ▶ des neurones qui font partie d'un circuit impliqué dans la mastication, vont servir également à un autre moment à la phonation, ou à la respiration.
- ▶ Cette convergence de signaux provenant de plusieurs systèmes permet la synchronisation entre ces systèmes.
 - ▶ Les motoneurones impliqués dans la mastication (noyau moteur du trijumeau) reçoivent des informations venant des centres respiratoires qui vont dépolariser certains motoneurones pendant l'inspiration et d'autres pendant l'expiration
 - ▶ Ceci a pour effet de synchroniser les mouvement de mastication avec la respiration afin d'éviter des conflits pouvant provoquer des fausses routes.

Rôle du bruit

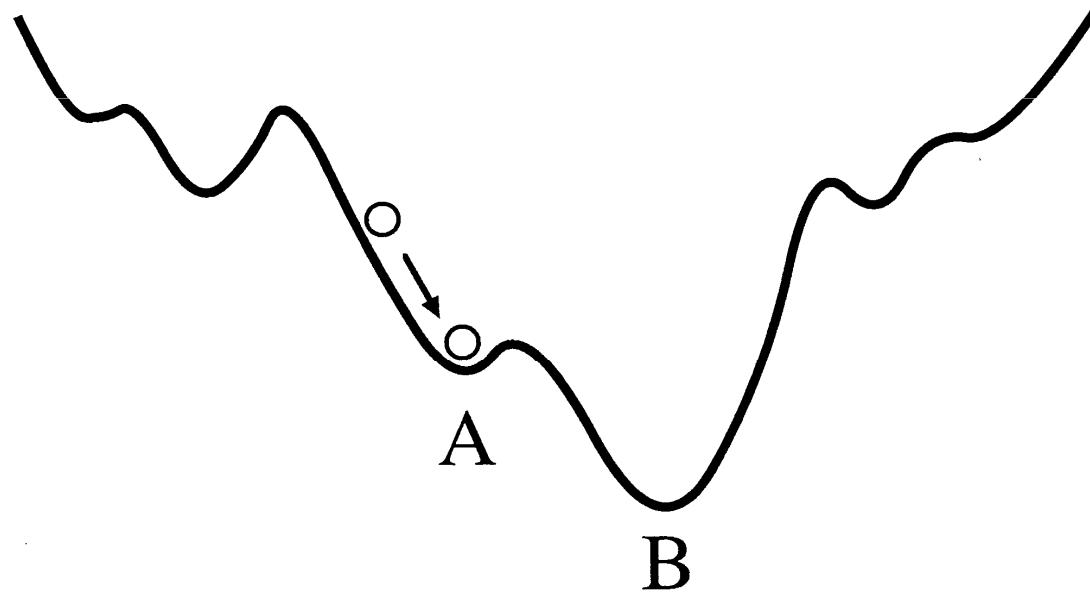
- ▶ Le bruit consiste en signaux parasites
 - ▶ qui se superposent au signal normal, pur, donnant un signal bruité.
- ▶ Le bruit qui nous concerne ici est un bruit aléatoire (perturbations accidentelles),
 - ▶ Il est en général représenté par l'arrivée d'informations asynchrones aléatoires.
- ▶ En pratique le bruit peut tout à fait être du à la superposition avec d'autres signaux,
 - ▶ pas aléatoires du tout, mais asynchrones,
 - ▶ ou sans rapport avec le signal auquel on s'intéresse.

Le bruit est bénéfique

- ▶ On pourrait penser que le bruit aléatoire est délétère.
 - ▶ Car il perturbe le signal
 - ▶ En fait le bruit semble être au contraire très bénéfique pour le traitement de l'information par le système nerveux.
- ▶ Le bruit évite que les neurones ne se synchronisent
 - ▶ et de ce fait se trouvent tous simultanément en phase réfractaire absolue puis relative,
 - ▶ empêchant ainsi le système de répondre.
- ▶ Une telle synchronisation provoque d'importantes non linéarités dans la réponse des neurones,
 - ▶ c'est-à-dire qu'une entrée d'intensité croissante ne produira pas obligatoirement une fréquence de décharge toujours croissante en sortie.
- ▶ L'ajout de bruit linéarise la réponse des neurones.
 - ▶ Ce fait n'est pas propre au système nerveux, et les physiciens connaissent bien ce phénomène.

Intérêt du bruit

- ▶ Le bruit évite de rester dans des minima locaux
 - ▶ Recuit simulé



Le bruit génère des rythmes

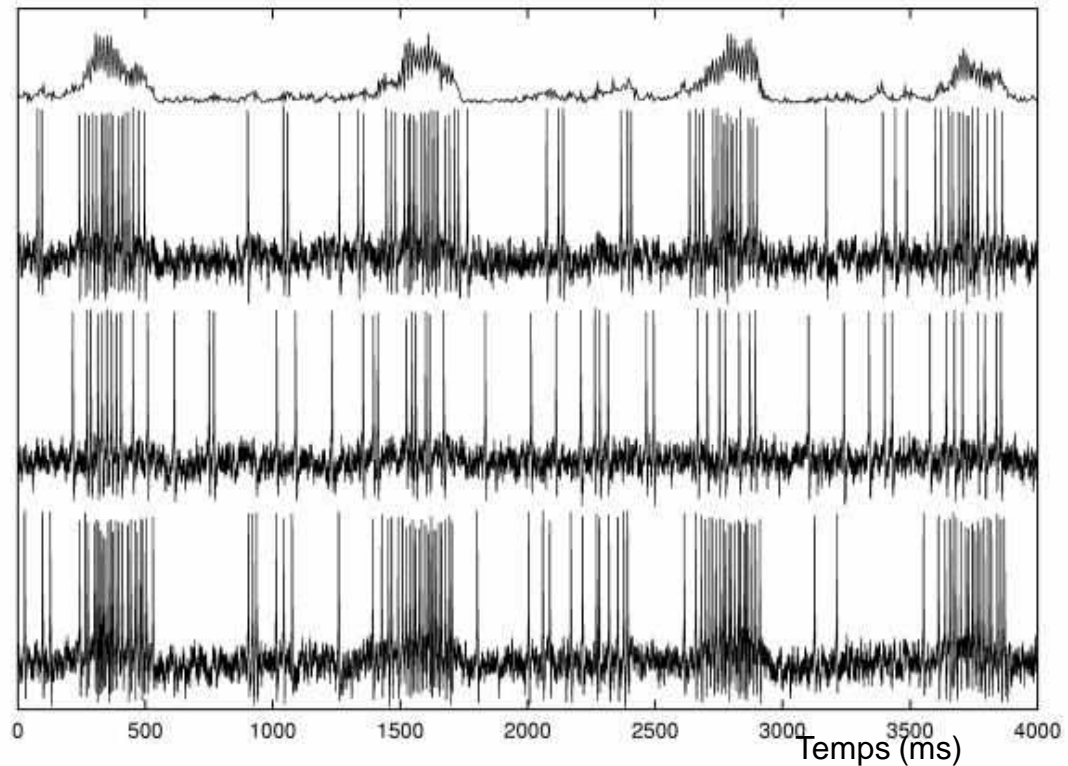
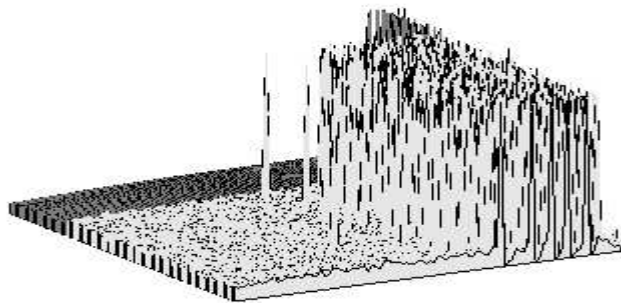
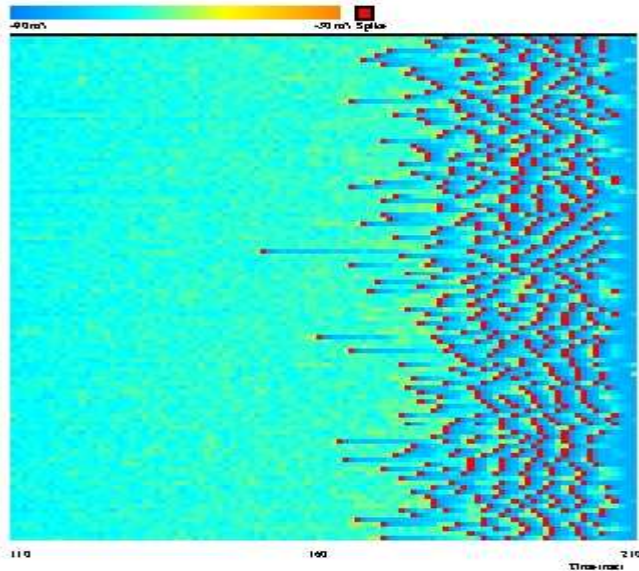
- ▶ Le bruit maintient un niveau de dépolarisation permanent des neurones dans un réseau, qui sans bruit resterait silencieux.
 - ▶ Cette propriété semble capitale pour la genèse de certains rythmes comme le rythme respiratoire
 - ▶ Celui-ci semble être généré au sein de la formation réticulée bulbo pontine, donc un réseau de type « aléatoire » à grande majorité excitateur.
 - ▶ La formation réticulée reçoit de l'ensemble de l'organisme des informations, qui sont par essence asynchrones, car venant de toutes les modalités sensorielles indépendamment.

Le bruit génère des rythmes

► Effet du bruit dans un réseau

- ▶ Ces informations arrivent sur les neurones, en font décharger quelques uns, qui eux même font décharger ceux avec qui ils sont connectés, et ainsi de suite, réalisant une cascade d'excitation qui fini par embraser tout le réseau.
- ▶ Mais plus le nombre de neurones qui déchargent augmente, moins il y a de neurones pouvant être activés, puisque la plupart sont passés en phase réfractaire, et le réseau fini par devenir silencieux, faute de neurones disponibles.

Genèse de rythme respiratoire



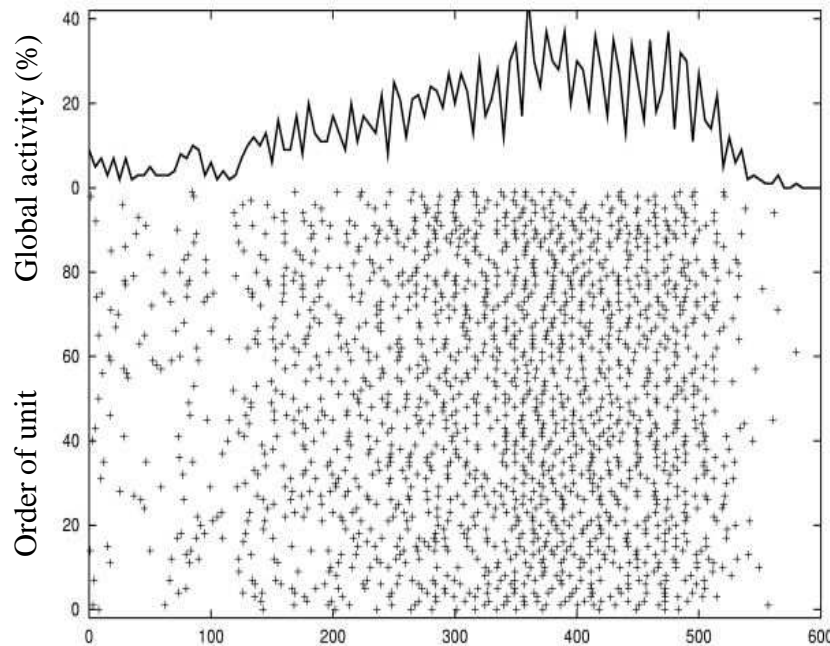
007)

M1 Neurosciences

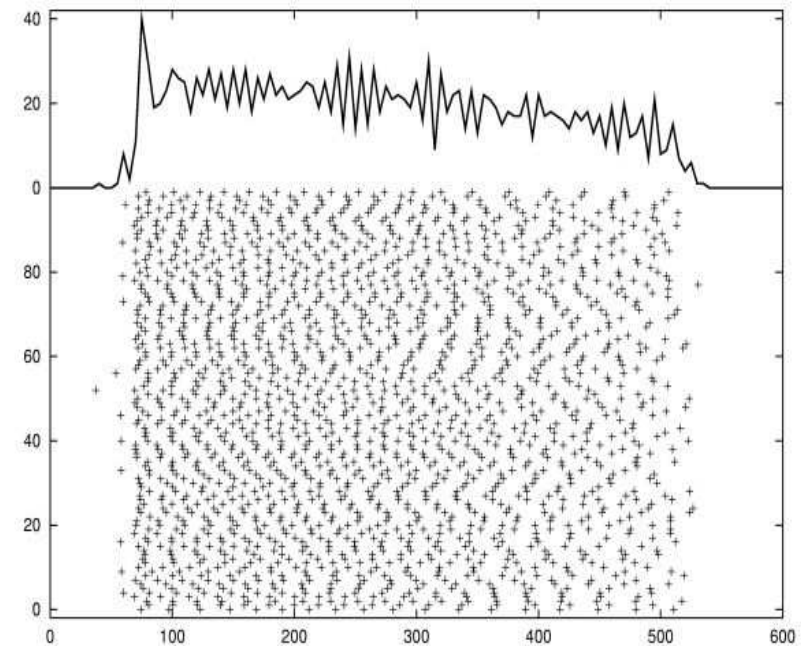
22

Genèse de rythme respiratoire

Network
 $\sigma = 0.16$



Pacemakers
 $[K^+]_{ext} = 4.6mM$



Time (ms)

Neurobiologie numérique

▶ La neurobiologie théorique

- ▶ Tente de décrire le fonctionnement du neurone en développant des modèles mathématiques.
 - ▶ Le modèle de Hodgkin-Huxley est le plus classique
 - ▶ Il permet de reproduire le comportement d'un neurone en modélisant les courants Na et K à travers les canaux ioniques (conductances voltage dépendantes)
 - ▶ Il permet de comprendre le comportement de petits réseaux de neurones
- ▶ Si le nombre de neurone augmente l'étude analytique devient impossible
 - ▶ Il faut recourir à la simulation.

▶ On tente de comprendre le fonctionnement des réseaux

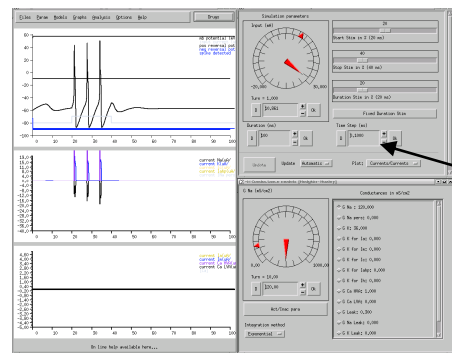
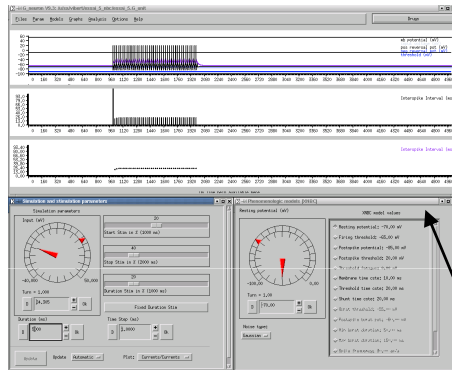
- ▶ en simulant sur ordinateur des modèles mathématiques de neurones.
- ▶ On parle alors de **neurobiologie numérique**.
 - ▶ Il existe des programmes de simulation gratuits
 - ▶ Neuron, Genesis, XNBC

Les outils composant XNBC

Une utilisation guidée pour le neurophysiologiste non informaticien

Editeurs de neurones

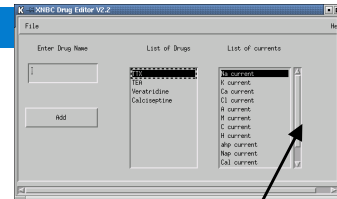
Modèle Phénoménologique



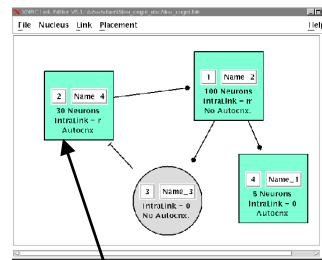
Modèle à conductance

Données expérimentales

Editeur de drogues



Editeurs de réseaux

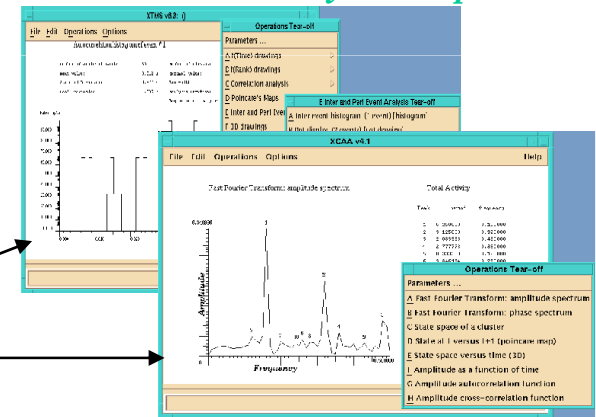
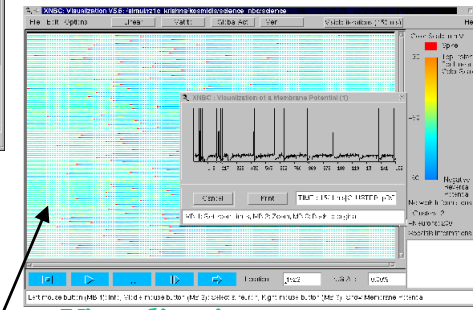


The main XNBC workstation interface. It features a central 'Simulator' button and a 'WORKSTATION FOR BIOLOGICAL NEURAL NETWORK SIMULATION V 9.2' logo. Surrounding the simulator are several tool buttons: 'Browse the full manual', 'Phenomenologic Neuron Editor', 'Single Network Editor', 'Conductance Neuron Editor', 'Full featured Network Editor', 'Virtual Neurons Browse', 'Drug Editor', 'Visualization', 'Time series Analysis', 'Cluster activity Analysis', and 'Raster viewer Analysis'. A mouse cursor is shown over the 'Drug Editor' button.

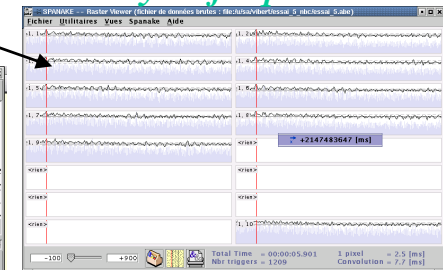
Panneau de contrôle

Simulation

Visualisation Analyses temporelles



Analyses fréquentielles



Activité du réseau

Les réseaux de neurones formels

▶ 1943 :

▶ Modèle de McCulloch et Pitts

▶ 1960 :

▶ Rosenblatt : perceptron et théorème de convergence

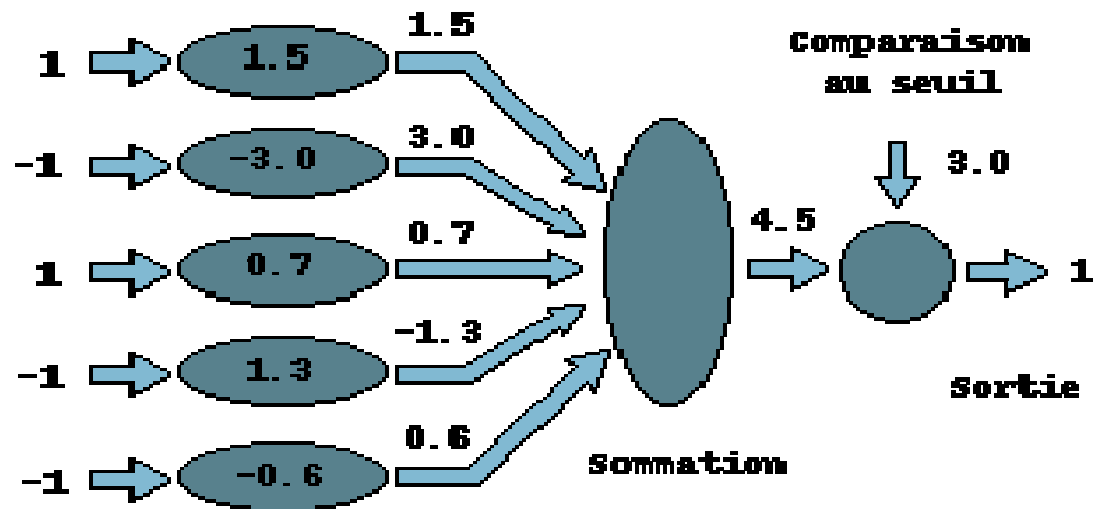
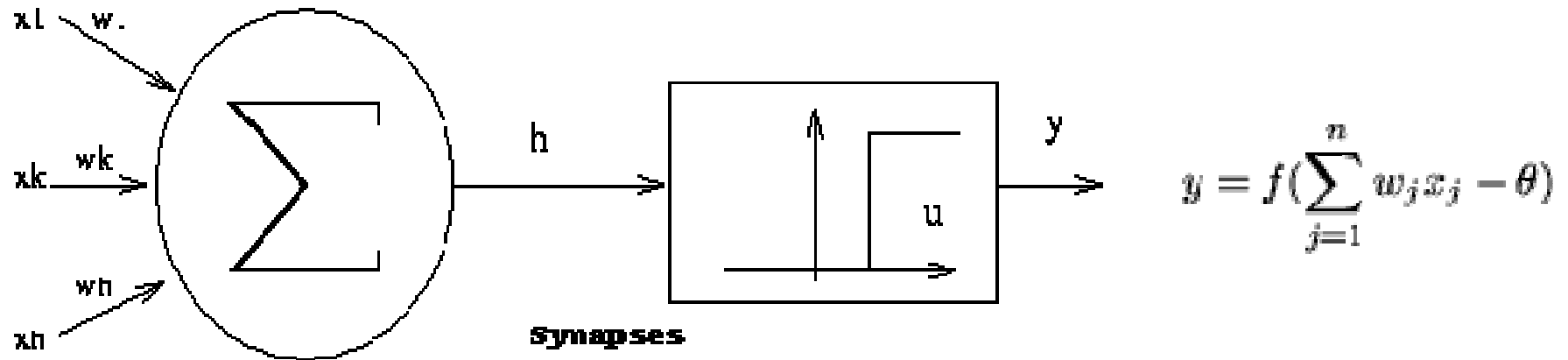
▶ Minsky et Papert : limites du perceptron mono-couche

▶ 1980 :

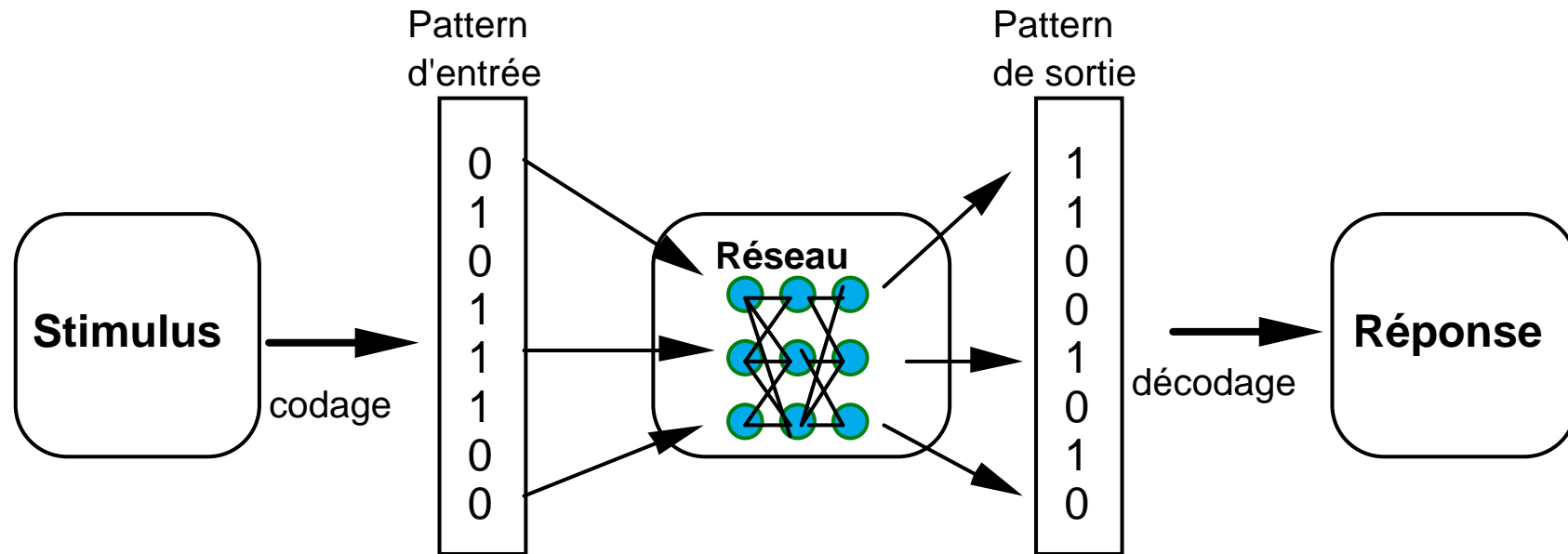
▶ Modèle de Hopfield

▶ Werbos : rétropropagation dans le cadre des perceptrons multi-couches (popularisé en 1986 par Rumelhart)

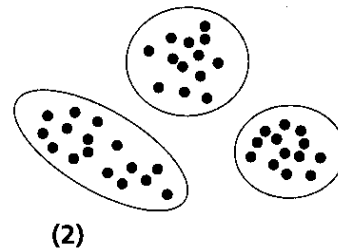
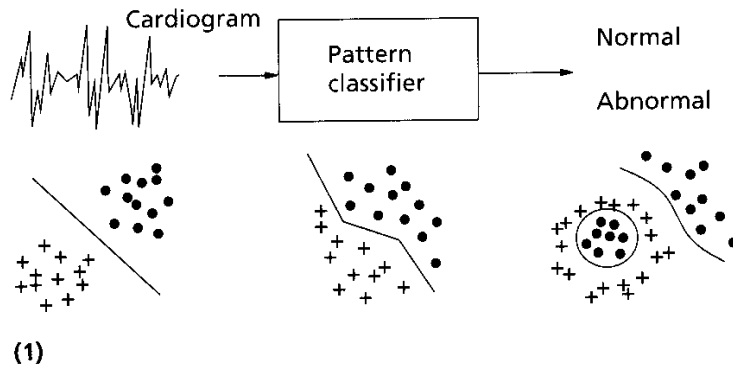
Le neurone formel



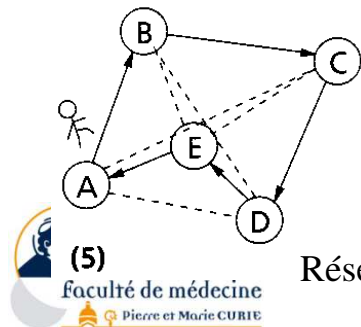
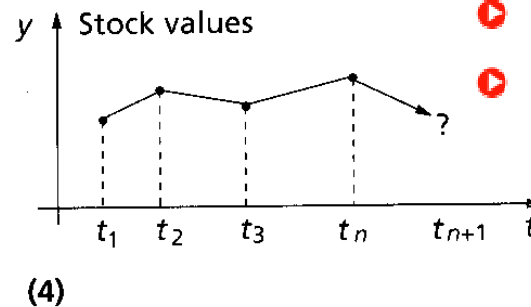
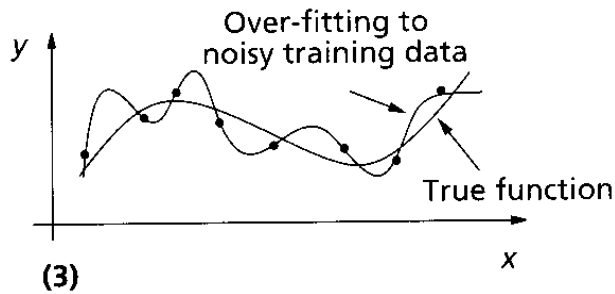
Architecture générale d'un RNF



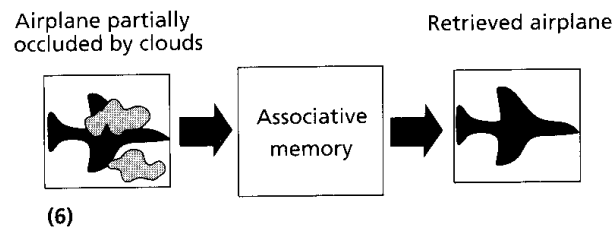
Applications des RNF



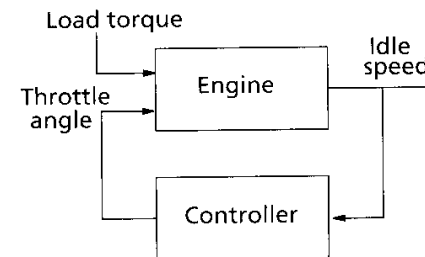
- ▶ 1. Classification
- ▶ 2. Regroupement
- ▶ 3. Approximation
- ▶ 4. Prédiction
- ▶ 5. Optimisation de parcours
- ▶ 6. Mémoire associative
- ▶ 7. Commande



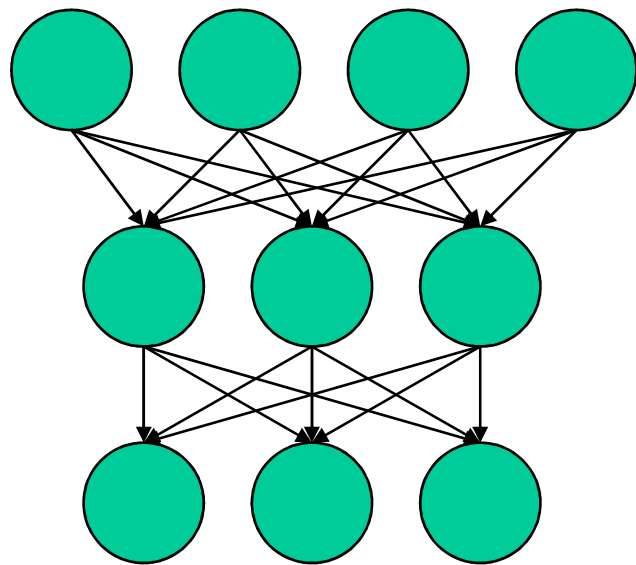
Réseaux de neurones JFV (2007)



M1 Neurosciences



Structure d'Interconnexion

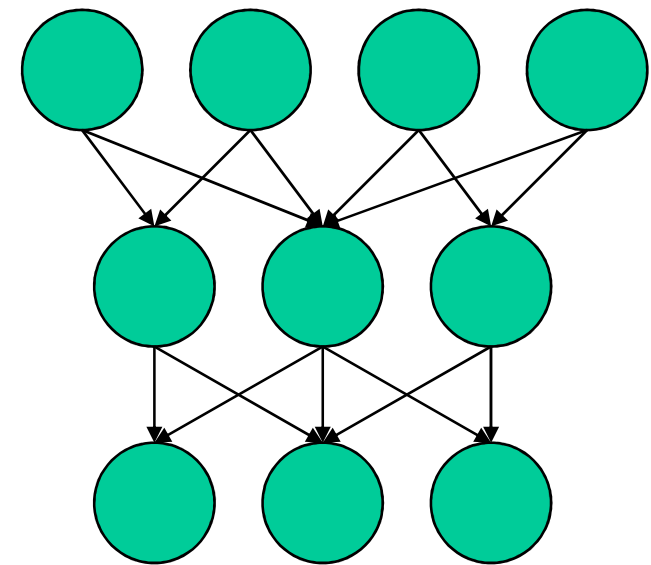


couche d'entrée

couche cachée

couche de sortie

réseau multicouche

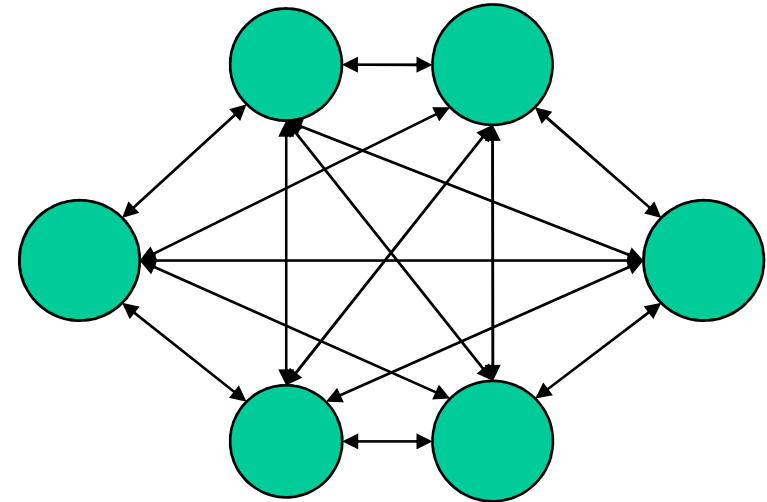
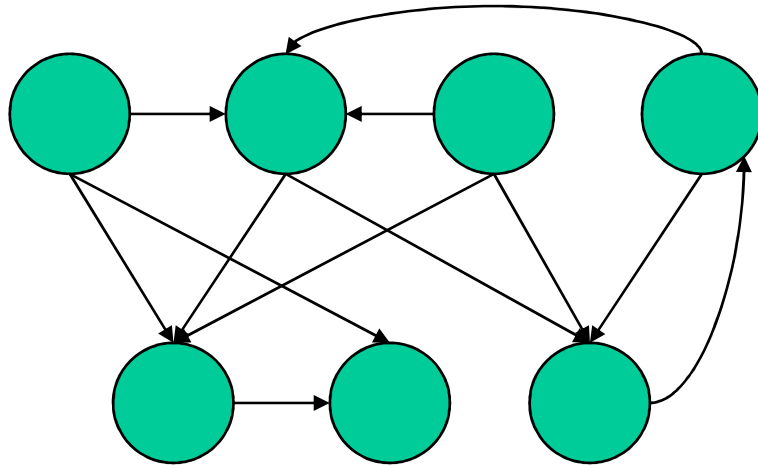


réseau à connexions locales

propagation avant (feedforward)

propagation des activations : de l'entrée vers la sortie

Structure d'Interconnexion



modèle récurrent (feedback network)

propagation des activations :

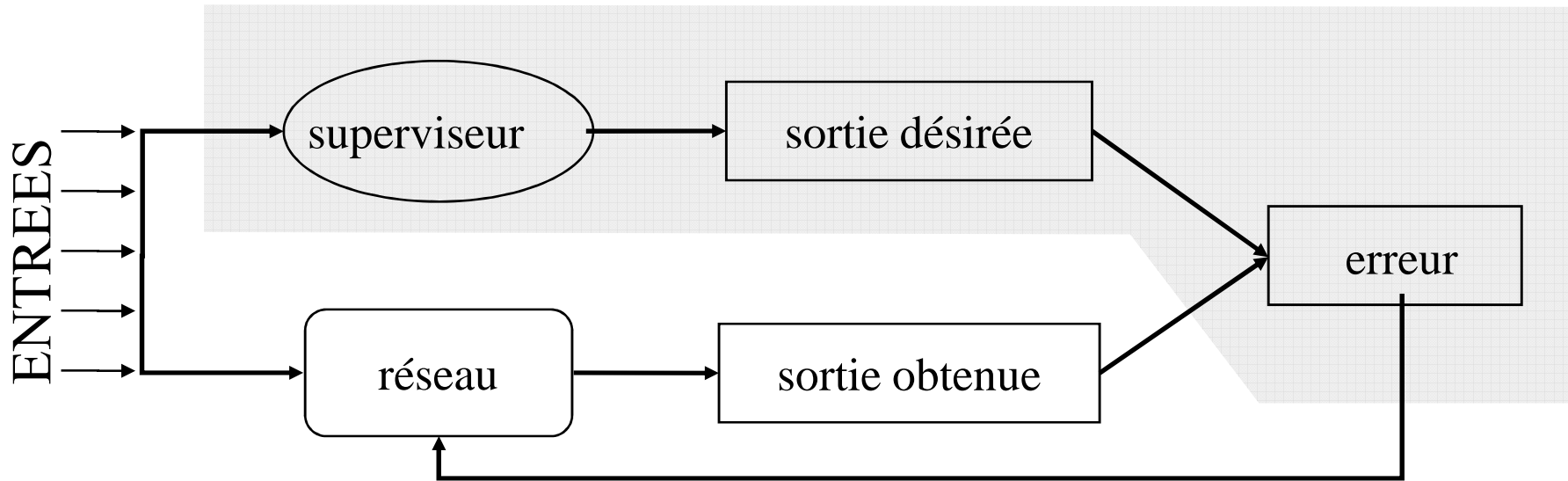
synchrone : toutes les unités sont mises à jour simultanément

asynchrone : les unités sont mises à jours séquentiellement

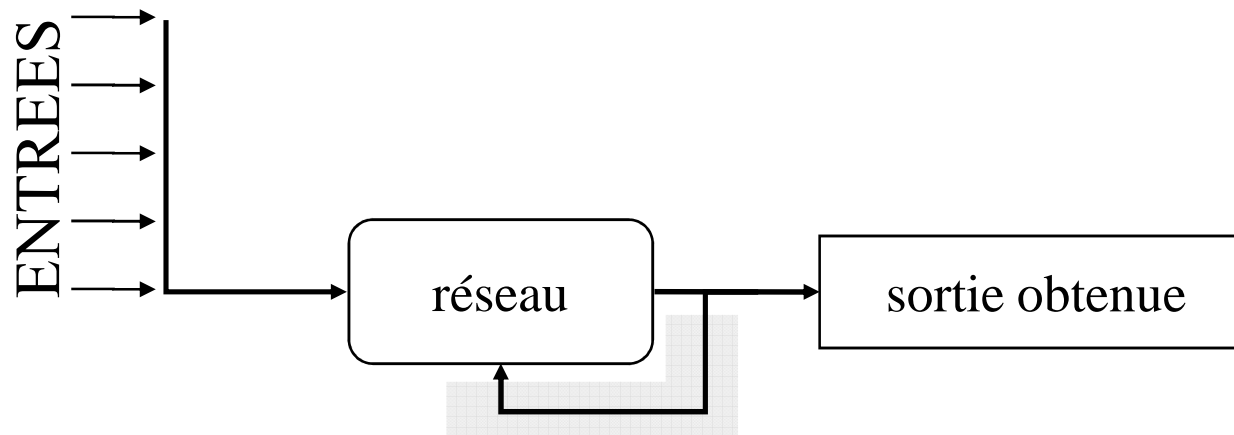
Apprentissage

- ▶ L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré.
- ▶ On distingue deux grandes classes d'algorithmes d'apprentissage :
 - ▶ L'apprentissage supervisé
 - ▶ L'apprentissage non supervisé

Apprentissage supervisé

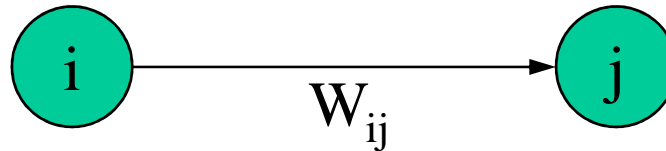


Apprentissage non supervisé



Règles d'apprentissage

- ▶ L'apprentissage consiste à modifier le poids des connections entre les neurones.

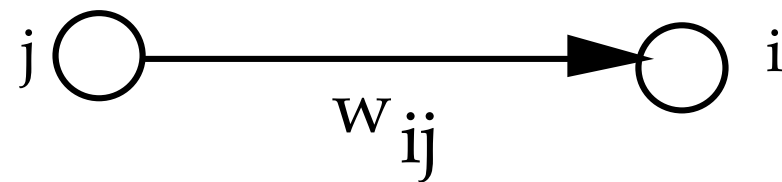


- ▶ Il existe plusieurs règles de modification :
 - ▶ Loi de Hebb : $\Delta w_{ij} = R a_i a_j$
 - ▶ Règle de Widrow-Hoff (delta rule) : $\Delta w_{ij} = R(d_i - a_i) a_j$
 - ▶ Règle de Grossberg : $\Delta w_{ij} = R(a_j - w_{ij}) a_i$

Règles d'apprentissage

► Loi de Hebb :

- Si deux unités connectées sont actives simultanément, le poids de leur connexion est augmenté ou diminué.
- R est une constante positive qui représente la force d'apprentissage (learning rate).



$$a_i = -1 \quad a_i = 1$$

$$a_j = -1 \quad \Delta W_{ij} = R \quad \Delta W_{ij} = -R$$

$$a_j = 1 \quad \Delta W_{ij} = -R \quad \Delta W_{ij} = R$$

$$\Delta W_{ij} = R a_i a_j$$

Règles d'apprentissage

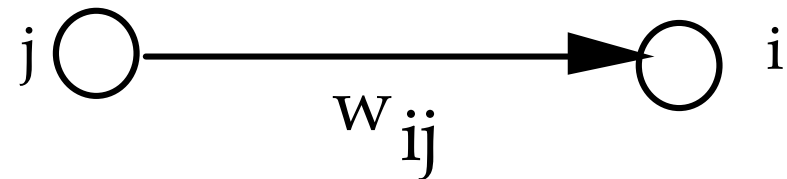
Loi de Widrow-Hoff (delta rule) :

- ▶ a_i activation produite par le réseau
- ▶ d_i réponse désirée par l'expert humain
- ▶ Par exemple si la sortie est inférieure à la réponse désirée, il va falloir augmenter le poids de la connexion à condition bien sûr que l'unité j soit excitatrice (égale à 1). On est dans l'hypothèse d'unités booléennes $\{0,1\}$.

$$a_i = 0 \quad a_i = 1$$

$$d_i = 0 \quad \Delta W_{ij} = 0 \quad \Delta W_{ij} = -R$$

$$d_i = 1 \quad \Delta W_{ij} = R \quad \Delta W_{ij} = 0$$

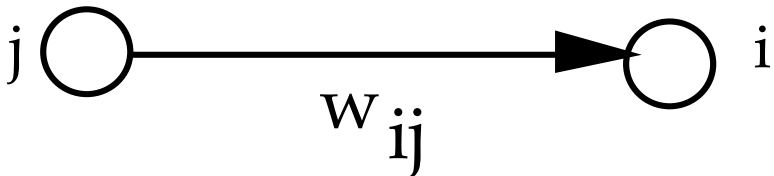


$$\Delta W_{ij} = R(d_i - a_i)a_j$$

Règles d'apprentissage

► Loi de Grossberg :

- On augmente les poids qui entrent sur l'unité gagnante a_i s'ils sont trop faibles, pour les rapprocher du vecteur d'entrée a_j . C'est la règle d'apprentissage utilisée dans les cartes auto-organisatrices de Kohonen

$$\Delta W_{ij} = R a_i (a_j - W_{ij})$$


Réseau dynamique de Hopfield

◉ Réseau complètement interconnecté

- ▶ Tous les neurones sont à la fois entrée et sortie

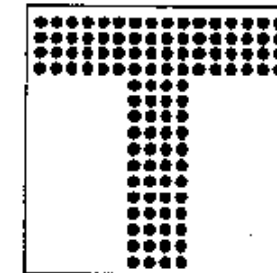
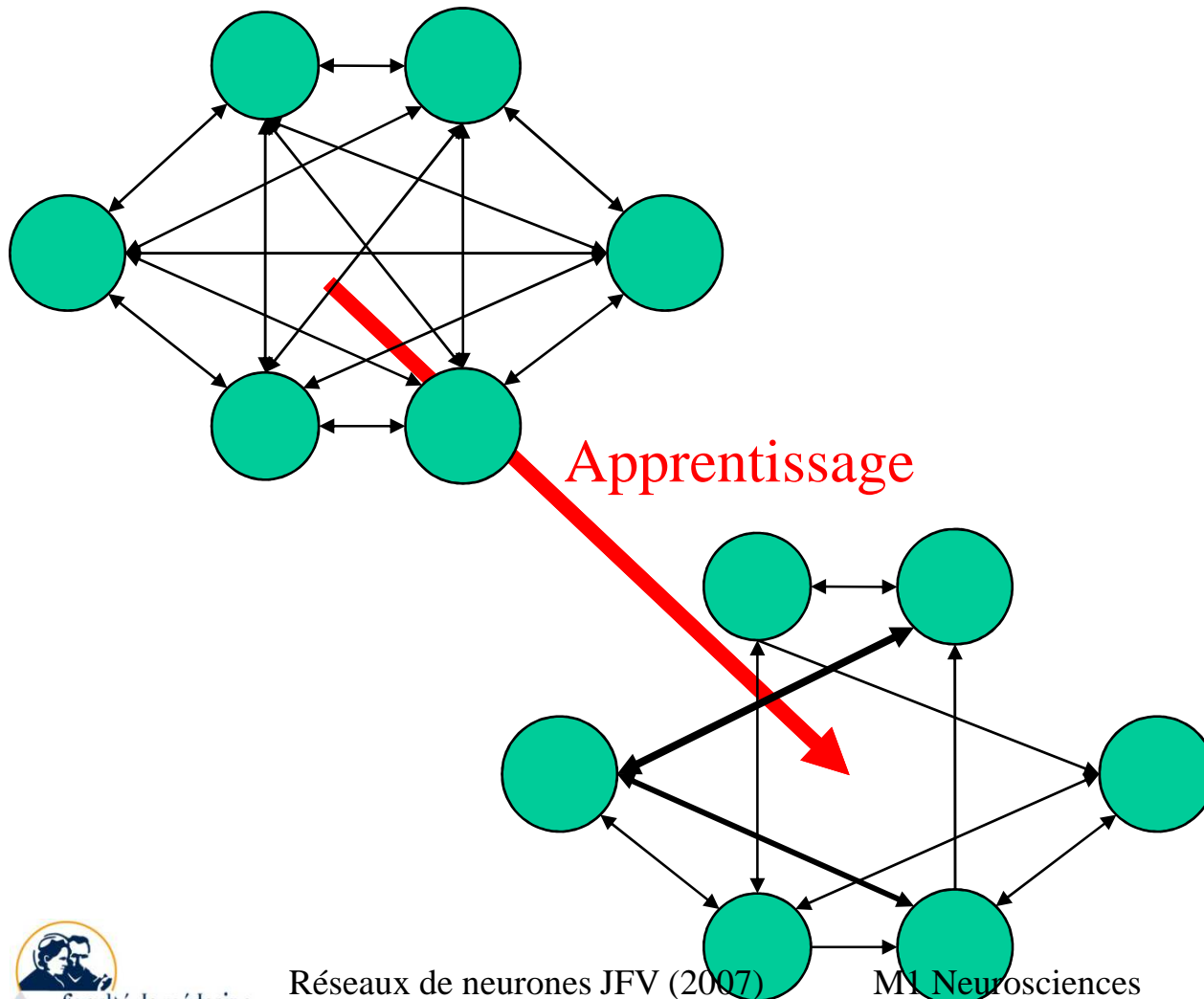
▶ **Mémoire associative**

- ▶ L'information n'est pas localisée, comme dans un ordinateur.
- ▶ L'information est stockée de manière distribuée dans les connexions du réseau.
 - ▶ Si un des éléments disparaît, l'information n'est pas perdue
 - ▶ On accède aux informations par le contenu de la mémoire
 - ▶ CAM : Content addressable memory
 - ▶ Réseau autoassociatif

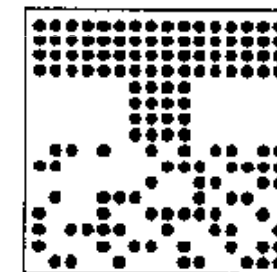
▶ Le réseau construit progressivement ses **attracteurs**

- ▶ Lors d'une **phase d'apprentissage**
 - ▶ Au cours de cette phase, les neurones ajustent leurs synapses en fonction de leur activité et de règles prédéfinies
 - ▶ Loi de Hebb
 - ▶ Loi de Widrow-Hoff

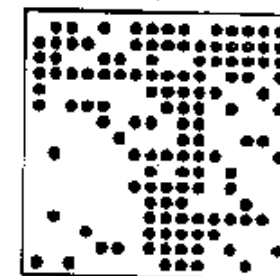
Mémoire associative



Original 'T'



half of image corrupted by noise

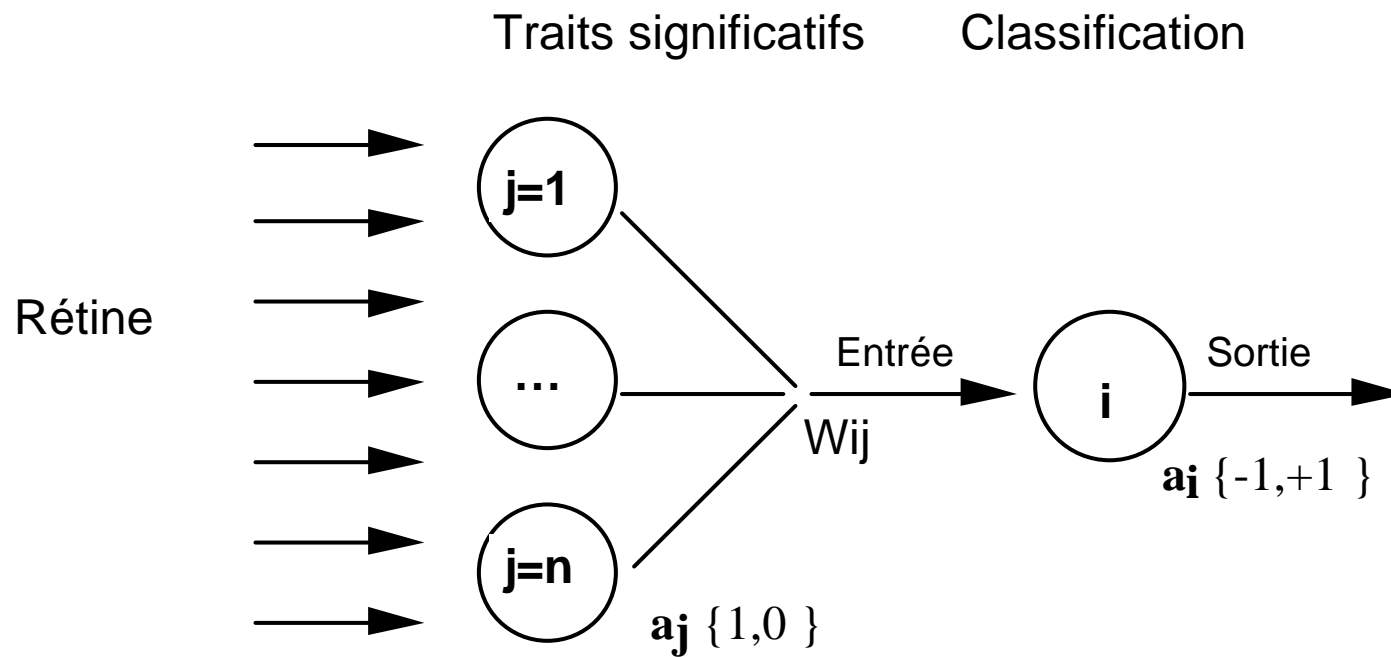


20% corrupted by noise (whole image)

Le perceptron

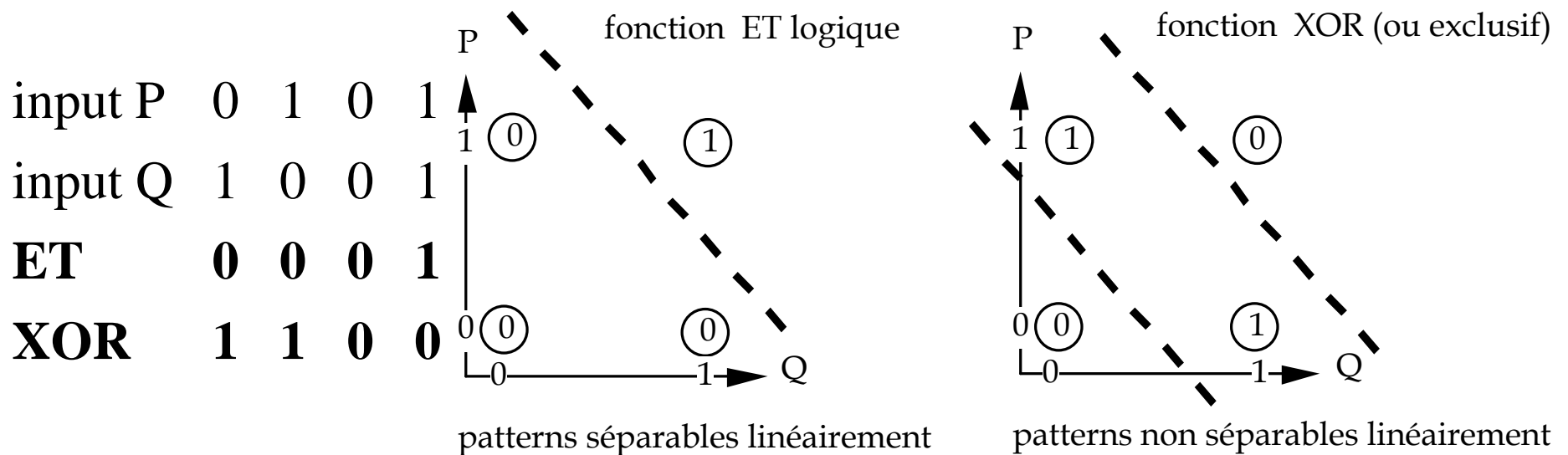
- ▶ Le perceptron de Rosenblatt (1957) est le premier RNF opérationnel.
 - ▶ C'est un réseau à propagation avant avec seulement deux couches (entrée et sortie) entièrement interconnectées.
- ▶ Il est composé de neurones à seuil.
- ▶ L'apprentissage est supervisé et les poids sont modifiés selon la règle delta.

Le perceptron

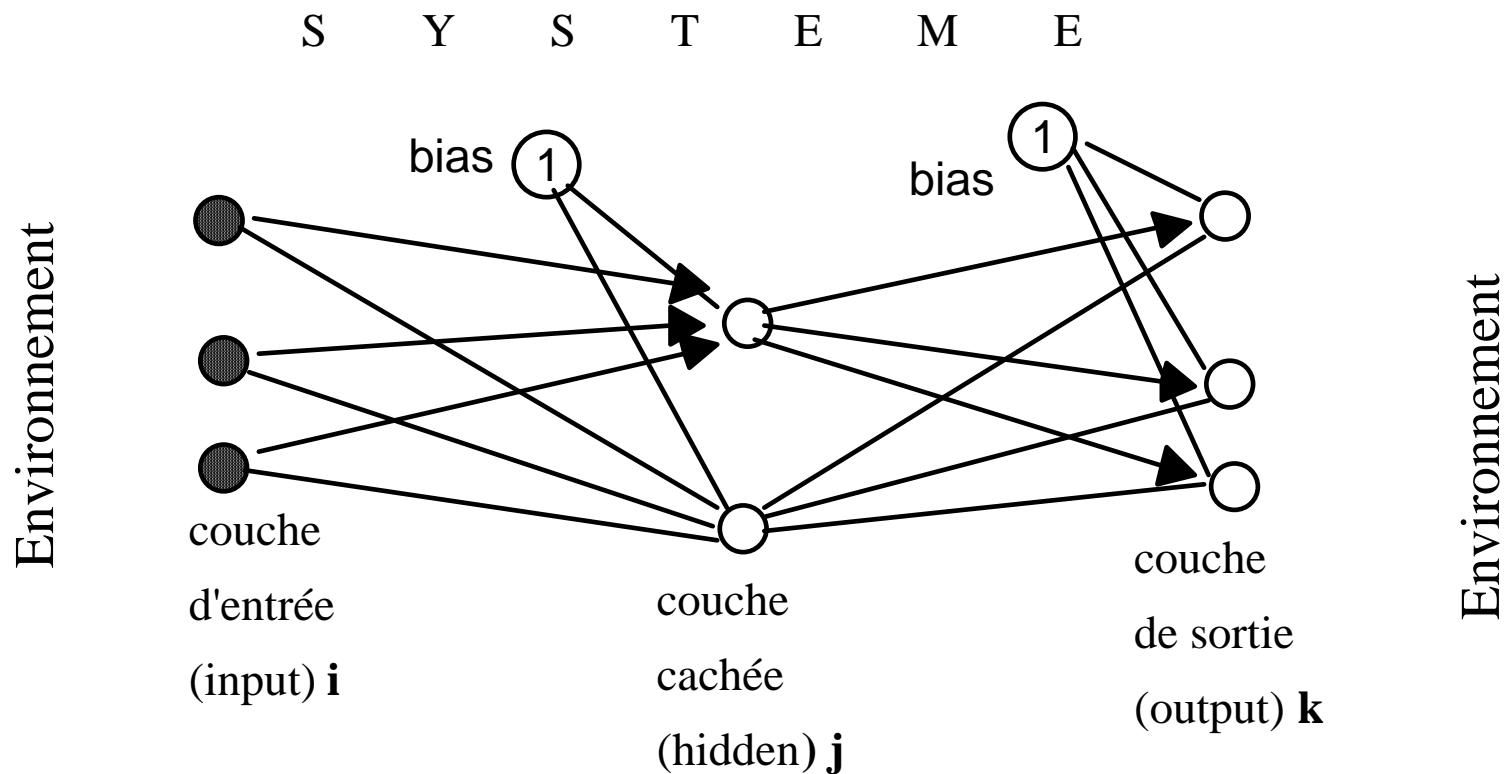


Limite du perceptron

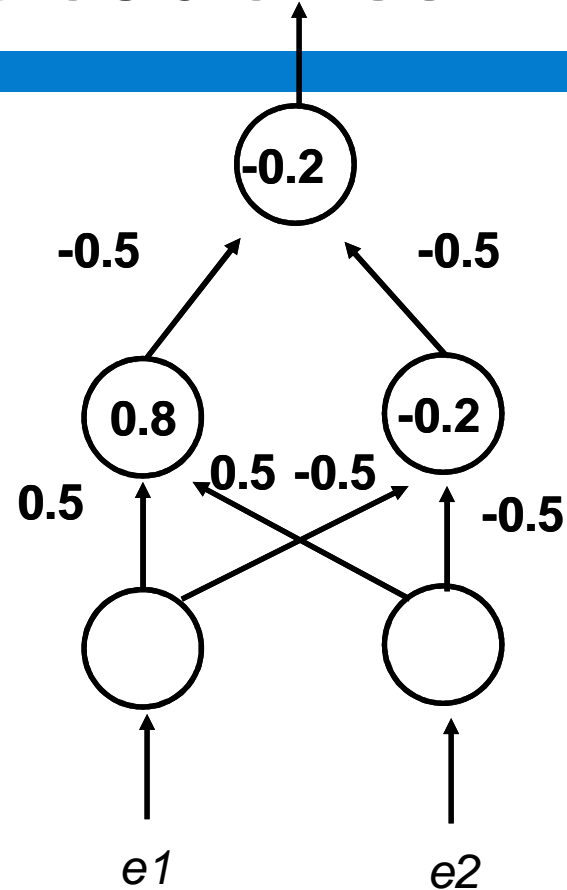
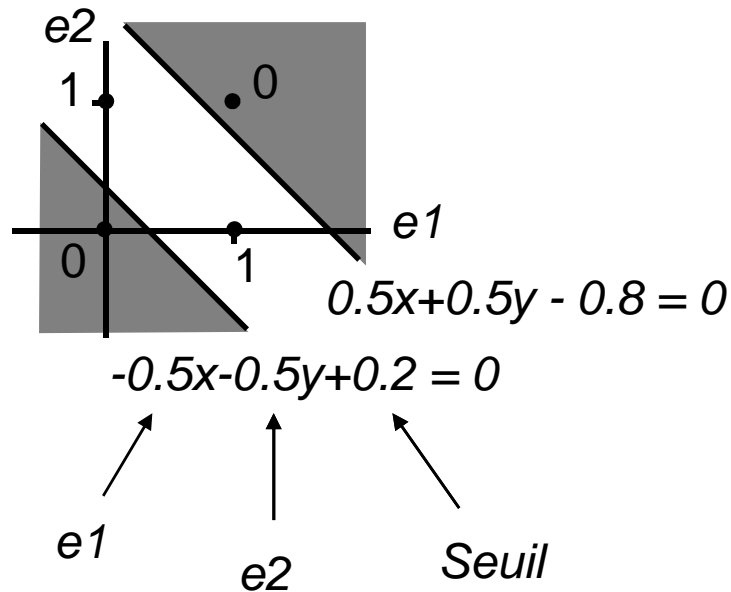
- Le perceptron est incapable de distinguer les patterns non séparables linéairement [Minsky 69]



Le perceptron multicouche



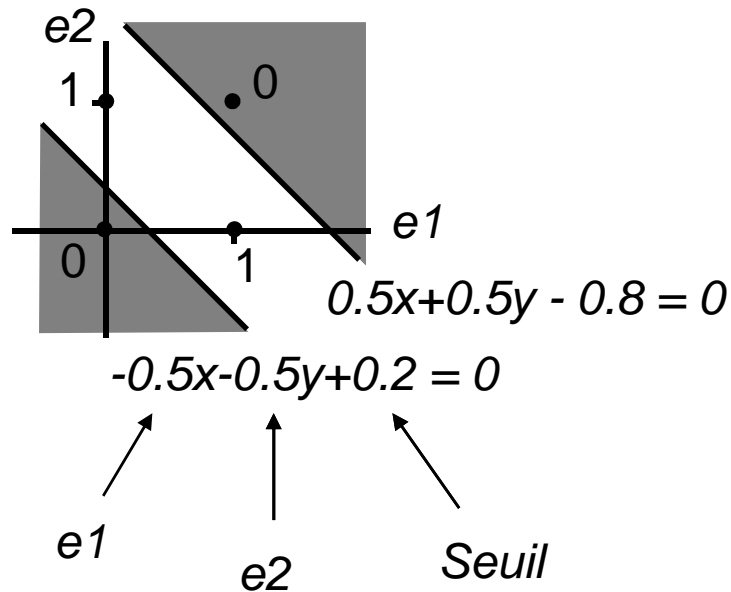
Perceptron multicouches



Comment traiter le OU exclusif?

Comment marche la couche cachée?

Perceptron multicouches

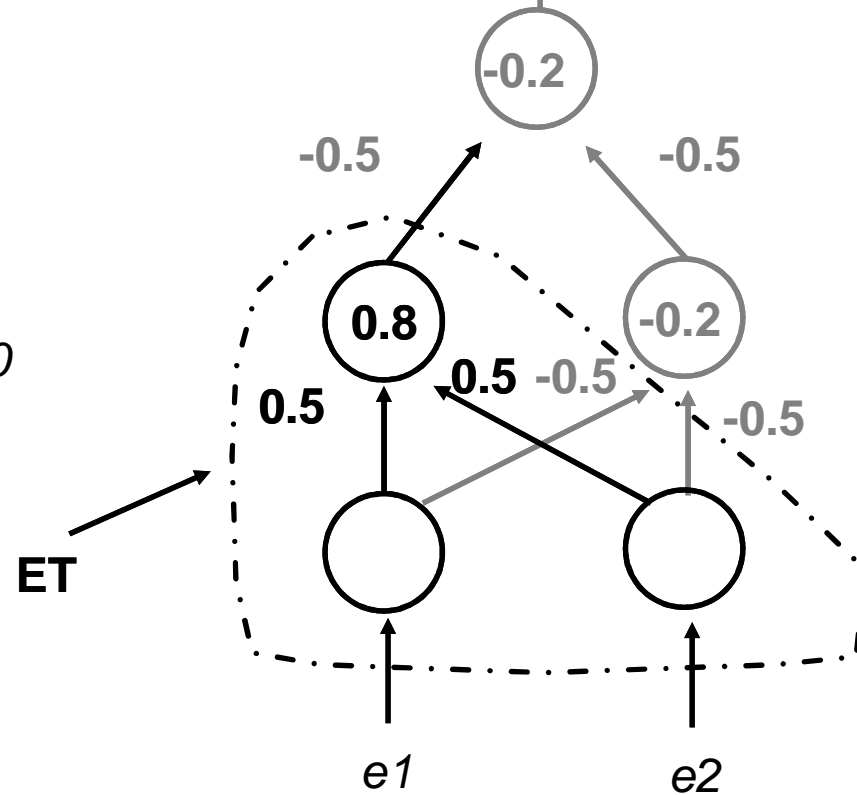


0 , 0 --> 0

1 , 0 --> 0

0 , 1 --> 0

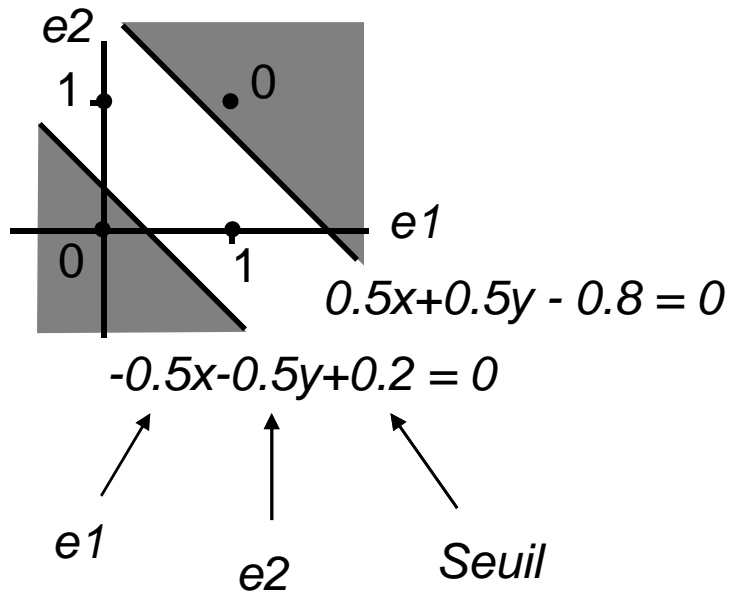
1 , 1 --> 1



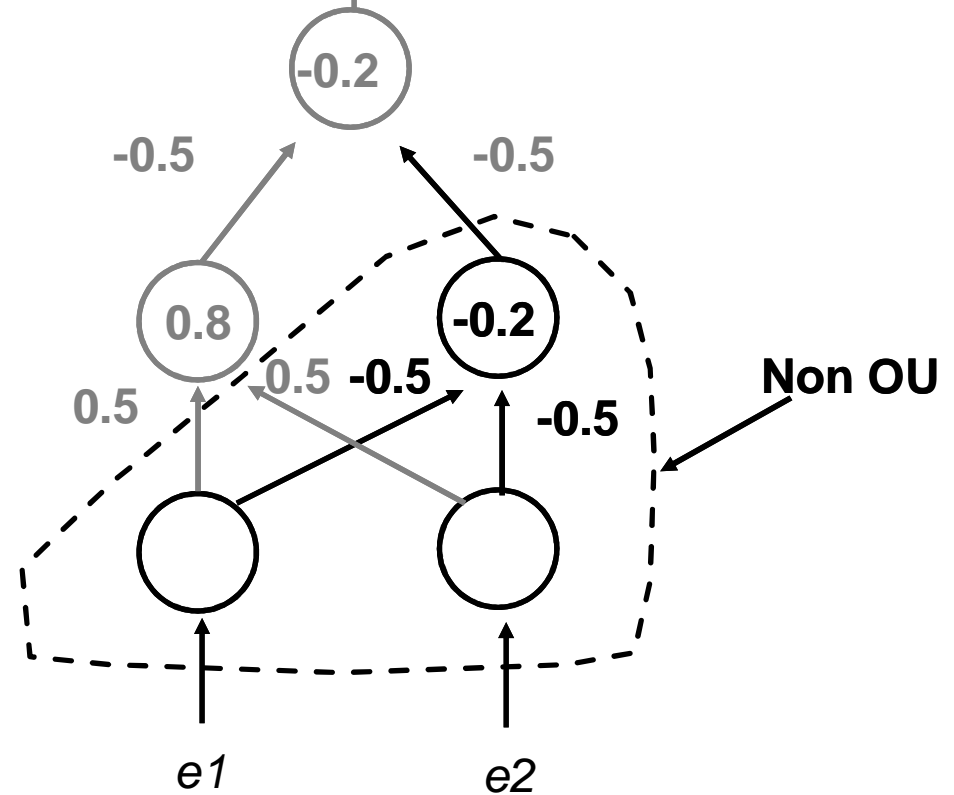
D'abord un ET...

1 + 1 --> 1

Perceptron multicouches

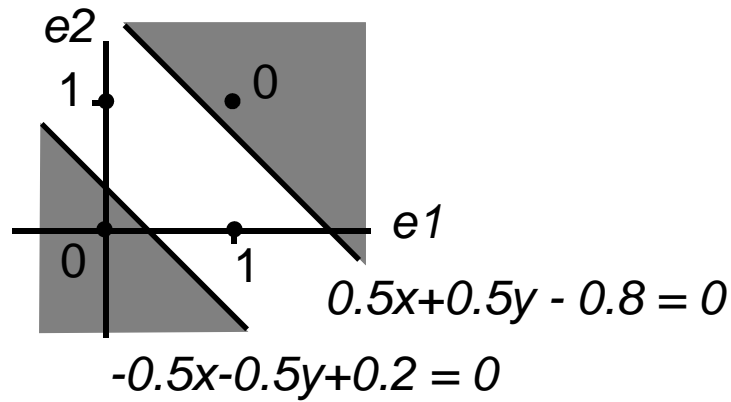


$e1$	$e2$	Seuil	
0	0	--> 0	--> 1
1	0	--> 1	--> 0
0	1	--> 1	--> 0
1	1	--> 1	--> 0



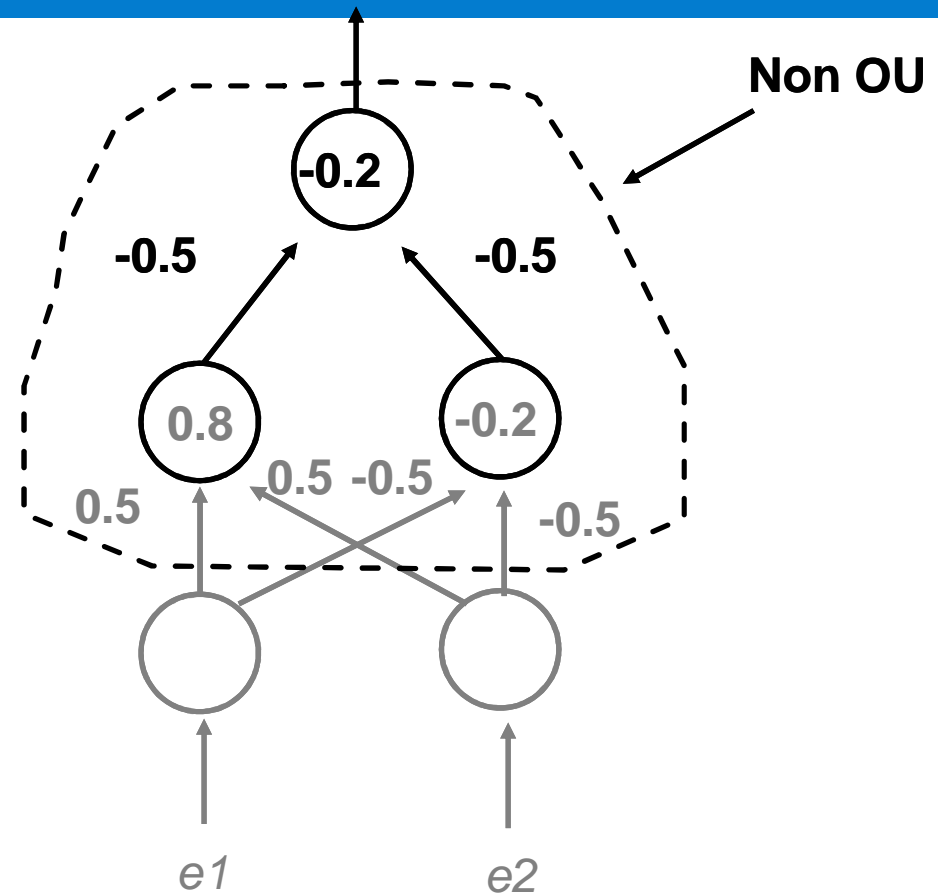
Puis un Non OU...

Perceptron multicouches



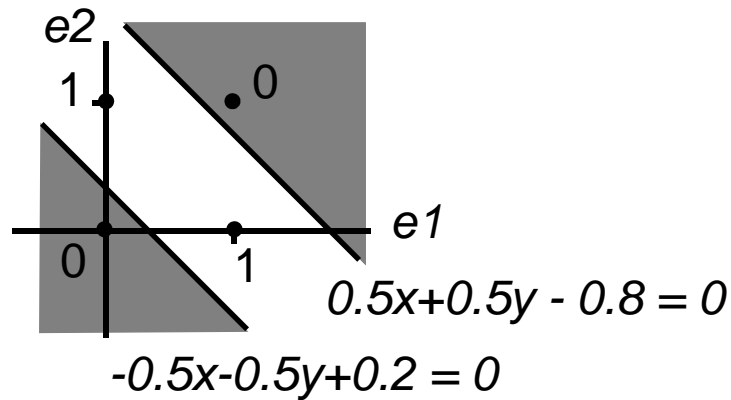
$e1$ $e2$ *Seuil*

0	,	0	-->	0	-->	1
1	,	0	-->	1	-->	0
0	,	1	-->	1	-->	0
1	,	1	-->	1	-->	0

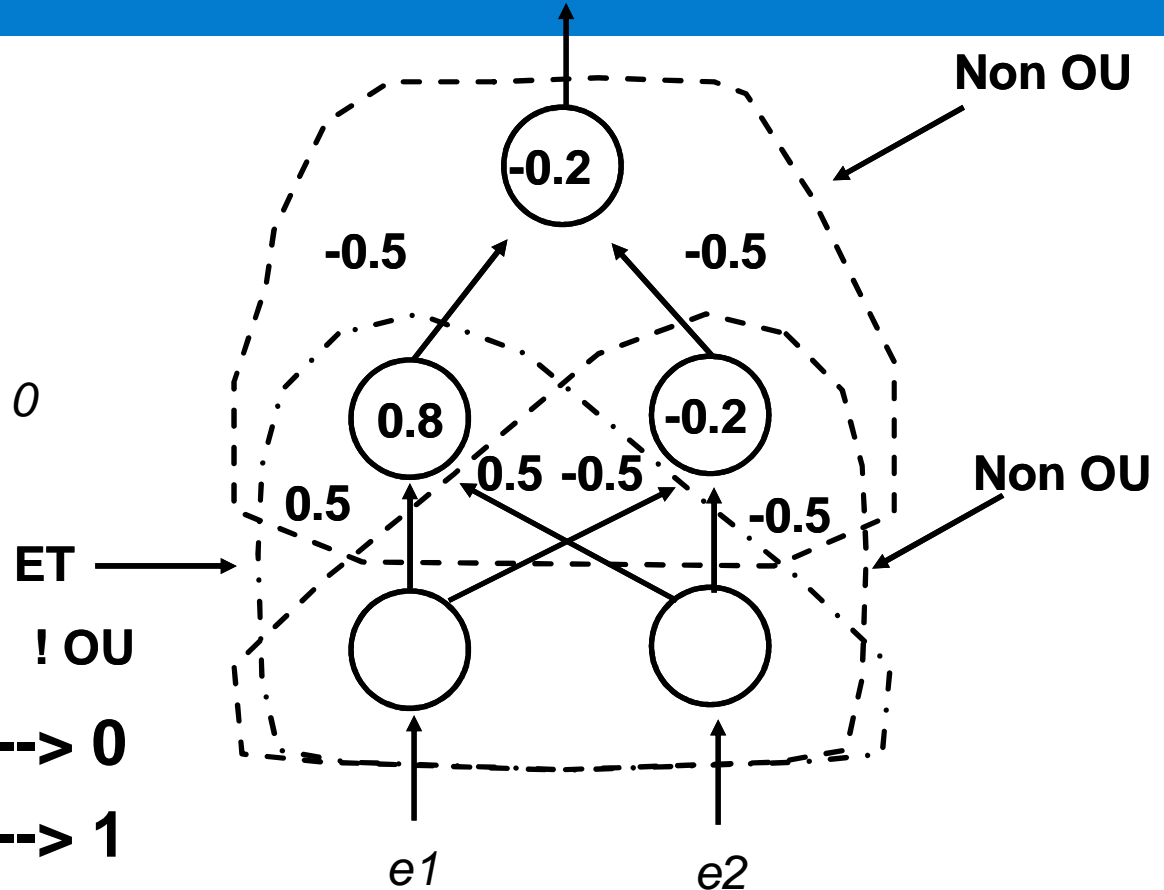


Et un second Non OU...

Perceptron multicouches



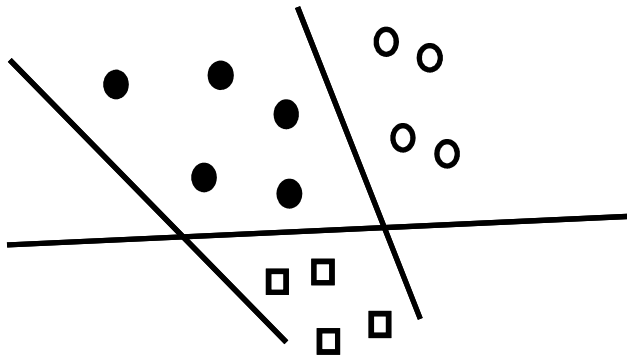
$e1, e2$	ET	! OU	OU	! OU
0,0	0	1	--> 1	--> 0
1,0	0	0	--> 0	--> 1
0,1	0	0	--> 0	--> 1
1,1	1	0	--> 1	--> 0



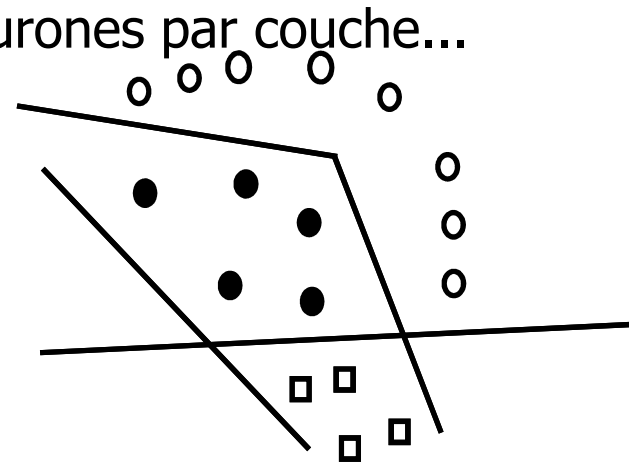
C'est le OU exclusif de $e1$ et $e2$

Combien de couches?

- ▶ C'est une matière d'expérience...
- ▶ En règle générale, une couche permet de séparer l'espace avec 2 droites, 2 couches avec 4 droites, etc...
 - ▶ mais pas toujours aussi simple
 - ▶ dépend aussi du nombre de neurones par couche...



2 couches cachées



3 couches cachées

Réseaux auto-organisés

- ▶ Certains jeux de données ne sont pas pré-structurés
 - ▶ agrégation, réduction de dimensionnalité, extraction de caractéristiques, détection de nouveautés
- ▶ Le réseau doit trouver seul son organisation
 - ▶ L'« éducation » du réseau se fait sans enseignant extérieur
 - ▶ c'est dans le jeu de données que se trouve l'enseignement
 - ▶ le réseau trouve seul son organisation à partir des données
- ▶ L'adaptation non supervisée des poids est généralement basée sur une sorte de compétition globale entre les neurones.
 - ▶ Réseaux à apprentissage compétitifs (Rumelhart)
 - ▶ Réseaux à conservation de topologie (Kohonen)
 - ▶ Réseaux à résonance adaptative (Grossberg)

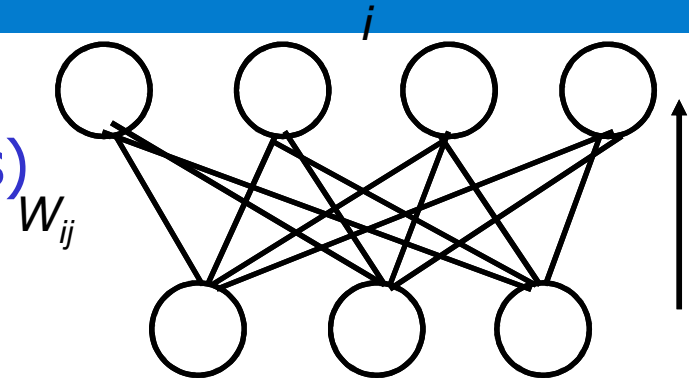
Apprentissage compétitif

- ▶ Tous connectés a tous
- ▶ Poids initialisés au hasard (normalisés)
- ▶ Chaque neurone calcule son activation a_i

$$a_i = \sum_j w_{ij} x_j = W_i^T X$$

- ▶ Le neurone k avec l'activation maximale est sélectionné
- ▶ Tous les autres a sont mis a 0 (compétition)
- ▶ c'est un réseau "winner take all"
- ▶ Les poids du neurone k sont alors mis à jour

$$W_k(t+1) = \frac{W_k(t) + \gamma(X(t) - W_k(t))}{\|W_k(t) + \gamma(X(t) - W_k(t))\|}$$



Apprentissage compétitif

- ▶ Utilisé pour les problèmes d'agrégation de données
 - ▶ clustering
- ▶ Plusieurs variantes:
 - ▶ Poids de départ tirés au hasard dans le jeu de données
 - ▶ "leaky learning" : les poids des autres neurones sont updatés comme celui du vainqueur k mais avec $\gamma' \ll \gamma$
 - ▶ "frequency sensitive competitive learning" :
 - ▶ plus souvent un neurone donné est vainqueur, moins il devient sensible.
 - ▶ Ainsi plus un neurone donné perd, plus il augmente ses chances de vaincre
 - ▶ et de constituer un nouveau cluster

Cartes de Kohonen

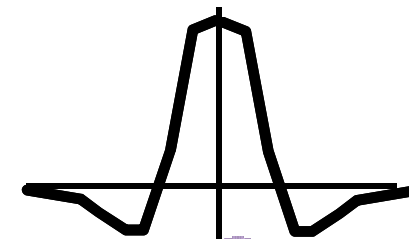
- ▶ Réseaux à conservation de topologie
- ▶ Directement dérivées de l'apprentissage compétitif
- ▶ Tient compte de la "distance" entre les entrées
 - ▶ la distance peut être dans une métrique quelconque
 - ▶ distance topologique
 - ▶ Un réseau à N neurones entrée aura S=N neurones sortie
- ▶ Un "Winner take almost all"
 - ▶ les poids sont mis a jour pour tous les neurones
 - ▶ en fonction de la distance par rapport au vainqueur

$$W_i(t+1) = W_i(t) + \gamma h(i,k) (X(t) - W_i(t))$$

avec $h(i,k)$ une fonction décroissante entre i et k ,
telle que $h(k,k) = 1$

Cartes de Kohonen

- ▶ Du fait de cet apprentissage collectif
 - ▶ les entrées voisines se retrouvent mis en correspondance ("mappés") par des neurones voisins
 - ▶ la topologie implicitement présente dans les données d'entrée sera donc préservée dans cette correspondance (mapping).
- ▶ Cette préservation de topologie existe dans les réseaux biologiques
 - ▶ somatotopie, rétinotopie, tonotopie
- ▶ Si la fonction $h(i,k)$ implique un renforcement au voisinage et une inhibition plus loin
 - ▶ augmentation du contraste
 - ▶ rétine
 - ▶ cortex



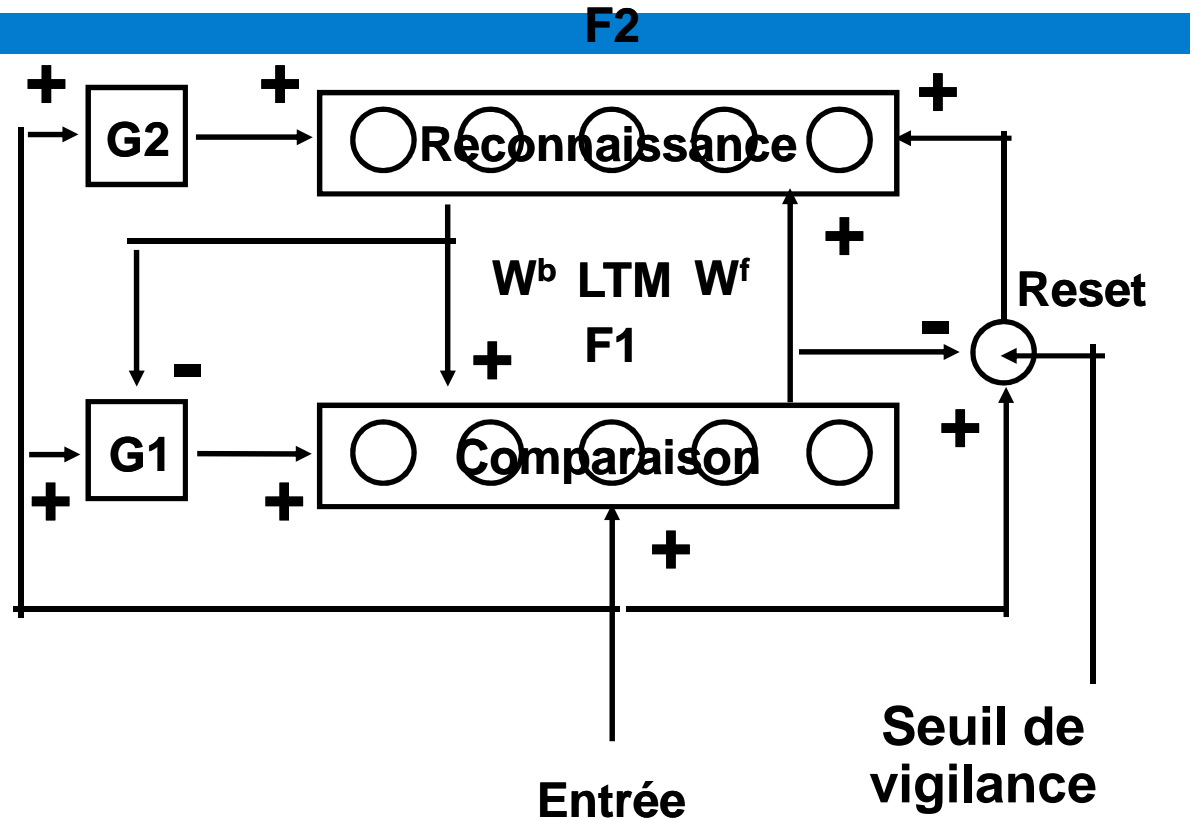
55

Résonance adaptative

- ▶ Réseau ART (Adaptive Resonance Theory)
 - ▶ réseau à antéropropagation et rétropropagation
- ▶ Trois propriétés cruciales inspirées de la biologie
 - ▶ Une *normalisation* de l'activité totale du réseau
 - ▶ les systèmes biologiques s'adaptent à de grandes modifications de leur environnement
 - ▶ Une *augmentation du contraste* des motifs d'entrée
 - ▶ détecter de subtiles différences peut tout changer
 - ▶ distinguer la panthère cachée dans le fourré peut-être vital...
 - ▶ Une *mémoire à court terme* des motifs contrastés (STM)
 - ▶ avant que le motif ne soit reconnu, il doit être stocké
 - ▶ la mémoire à long terme (LTM) implémente une classification, qui est graduellement modifiée par la mémoire à court terme

ART net, Novelty detector

- ▶ Chaque neurone de F1 reçoit 3 entrées
 - ▶ sort 1 si 2 des 3 est 1
- ▶ Chaque neurone de F2 calcule son état
 - ▶ le gagnant inhibe tous les autres (inhib. lat.)
- ▶ G2 est le OU de l'input
- ▶ G1 aussi sauf si il y a un 1 venant de F2 (0)
- ▶ Le signal de reset est envoyé si la sortie de F1 et l'entrée diffèrent d'une valeur (seuil de vigilance)



Follow-the-leader algorithm : tente de mettre toute nouvelle entrée dans une classe existante. Si la distance est trop grande, il en crée une nouvelle

ART net, Novelty detector

- ▶ Initialiser les poids à 1 ou $1/(1+N)$ et le seuil de vigilance
- ▶ Application du motif
- ▶ Calculer les activations dans F2
- ▶ Sélectionner le vainqueur
- ▶ Si le poids du vainqueur est sous le seuil de vigilance
 - ▶ désactiver le vainqueur
 - ▶ recalculer les activations de F2 et rechercher le vainqueur...
- ▶ Si le poids du vainqueur dépasse le seuil de vigilance
 - ▶ modifier les poids de ses connexions vers les autres
 - ▶ réactiver tous les neurones de F2 et continuer
- ▶ *Follow-the-leader algorithm* : tente de mettre toute nouvelle entrée dans une classe existante. Si la distance est trop grande, il en crée une nouvelle

Conclusion

- ▶ C'est l'organisation des neurones en réseaux
 - ▶ qui permet de traiter de multiples manières l'information
 - ▶ qui permet de générer de l'information ou des rythmes
 - ▶ Le système est optimal et les neurones sont généralement impliqués dans plusieurs systèmes
- ▶ Le bruit est important pour le fonctionnement du SN
- ▶ L'ingénieur a souvent tenté de copier le SN pour traiter l'information
 - ▶ Les réseaux de neurones formels sont maintenant très utilisés
 - ▶ Ils ont parfois permis de mieux comprendre le fonctionnement du SN