

HSS361 – Notes de cours

I) Introduction aux neurosciences cognitives : du cerveau à la psychologie

- Historique des neurosciences cognitives :

- **Ancienne approche :**
 - Psychologie = software
 - Neurobiologie = hardware
- **Approche actuelle :** cette discipline consiste à trouver des **lois de transition** entre les différents niveaux d'analyse (du plus petit au plus grand : récepteurs, synapses, neurones, colonnes corticales, régions et circuits, comportements, culture et éducation)
- **Broca** prouve la spécialisation cérébrale en s'appuyant sur un patient qui a perdu l'usage de la parole → il découvre l'aire de Broca (= aire motrice du **langage**)

A) Démarches de neurosciences

- Méthodes utilisées :

- Observations des **patients malades**
- **Imagerie cérébrale :**
 - **IRM** (= imagerie par résonnance magnétique) : plus on monte en champ magnétique et plus on est précis spatialement
 - **IRM anatomique :** déceler l'**anatomie** du cerveau et déceler des lésions. On reconstruit la surface corticale et les noyaux sous-corticaux
 - **IRM de diffusion :** on utilise les flux d'eau à travers les membranes biologiques pour montrer le **connectome** (= les connexions entre aires)
 - **IRM fonctionnelle :** on utilise l'afflux de sang oxygéné (on s'appuie sur le champ magnétique d'une aire (induit par l'afflux d'hémoglobine qui comporte du fer = effet **Bold**) pour montrer l'**activation** des différentes aires en fonction de l'aire réalisée. Il y a un retard de quelques secondes par rapport à l'activité neuronale. Les travaux actuels consistent à trouver des relations bidirectionnelles entre **action réalisée et aire utilisée** : exemple du lobe occipital dont on peut trouver une carte qui relie la zone de la rétine stimulée et la zone du cerveau activée
 - **Microscopie électronique :** à échelle très précise en analysant des bouts de cortex (donc chez l'animal car méthode destructive)
 - **Électro/magnétoencéphalographie :** le vrai problème de l'analyse du cerveau est celui de la résolution temporelle (il y a toujours du retard entre phénomène et observation)
 - Détection des **petits potentiels électriques** (microVolts) engendrés par l'entrée en activité synchrone de groupes de neurones
 - Cela se passe en **temps réel** donc on peut augmenter la résolution temporelle. Concrètement, on met des électrodes sur le cerveau et on mesure le champ électromagnétique du cerveau
 - Le problème de cette méthode est la **résolution spatiale** : ce n'est pas très précis dans l'espace
 - Méthode **invasive** de l'**électrophysiologie** : électrodes posées sur le cerveau directement en ouvrant le crâne ou en faisant des mini trous : meilleure précision, on peut observer chaque neurone individuellement

- Résultats :

- Des **régions visuelles spécialisées** : la reconnaissance visuelle se fait par des aires différentes en fonction de ce qui est vu (lieux, corps, visages, objets, mots...). Par exemple, des neurones répondent à l'image de Luke Skywalker mais pas à la lecture du mot
- A l'inverse, la **stimulation électrique** du cortex visuel induit la **perception** d'une lettre → applications = **neuroprothèses** pour les patients aveugles

B) Psychologie

- Lois de la psychologie :
 - **William James** : « *la psychologie est la science de la vie mentale* »
 - Recherche de **lois universelles** en psychologie :
 - La vie mentale est soumise à des **lois** physiques, chimiques ou biologiques. Exemple : la vitesse de l'influx nerveux, des opérations mentales (ce n'est pas instantané, il faut à peu près 200ms pour une réponse stéréotypée, et une dizaine de plus pour prendre une décision)
 - On sait aujourd'hui qu'il y a une corrélation entre la **vitesse des opérations mentales et l'anisotropie** (dépendance en la direction) **des connections mesurées en IRM**
 - Expérience de **rotation mentale** → lois internes :
 - On prend des enchaînements de **cubes en 3D** et on leur applique des rotations. On compare ensuite deux rotations. Il s'agit de dire si les deux formes sont identiques ou différentes
 - Le temps de réaction moyen est une **fonction linéaire** presque parfaite de l'angle de rotation
 - Nous avons donc un « **modèle mental physique** » internalisé dans notre cerveau (soit au cours de l'évolution, soit de l'apprentissage). On l'utilise par exemple dans des expériences de pensée (intuition). Attention, il y a tout de même des **biais** physiques
 - Exemple d'utilisation : l'activité **mathématique** trouve ses racines ultimes dans les représentations mentales structurées que nous héritons de l'évolution.
 - Tout système d'information suit également des **lois algorithmiques** :
 - David Marr a proposé un modèle pour l'analyse par le **cerveau** :
 - **Computation** : quel est le problème ?
 - **Algorithme** : comment le système opère-t-il ? Quels formats de représentation et quels algorithmes ?
 - **Implémentation** : comment le système est-il organisé à l'intérieur ? Quels sont les mécanismes neurobiologiques ?
 - Expérience de la **comparaison de nombres** par rapport à 65 :
 - Plus les nombres sont proches de 65, et plus le **temps de réaction** est élevé
 - Plus les nombres sont proches de 65, et plus le **taux d'erreur** est élevé
 - Les courbes sont continues → la lecture chiffre par chiffre n'a pas l'air de jouer un rôle
- Conclusion :
 - La **psychologie** n'est plus séparée des neurosciences
 - Les neurosciences cognitives font appel à un ensemble de **méthodes** qui permettent d'explorer le cerveau à des échelles spatiales et temporelles : IRM (anatomique, fonctionnelle, diffusion), EEG/MEG, électrophysiologie, stimulation (lien causal entre neurosciences et cognition)
 - Des **connexions** commencent à s'établir avec des lois de la psychologie :
 - Le temps de réaction n'est pas instantané
 - Rotation mentale : certaines lois de la physique ont été internalisées au cours de l'évolution et du développement

II) Prise de décision : théorie de la détection du signal et accumulation d'évidence

A) Niveau théorique et mathématique : traitement du signal

- Expliquer les erreurs : la théorie de détection du signal pour expliquer les erreurs :
 - Expérience de la **comparaison de nombres** par rapport à 65 : cf. précédemment
 - Expérience de la comparaison du **nombre de points** :
 - **Démarche** : pas d'analyse du temps de réponse, seulement de la probabilité de bonne réponse
 - **Résultats** :
 - On obtient des « courbes de bonnes réponses » non symétriques avec des nombres différents // elles deviennent symétriques avec une échelle logarithmique
 - Ces courbes sont des gaussiennes
 - **Interprétation** :
 - La perception est basée sur une « échelle **logarithmique** interne de détection sous forme **gaussienne** » → c'est la référence
 - Lorsqu'on voit ces données, on se représente un **échantillon** avec une distribution gaussienne (pareil pour une intensité sonore par exemple)
 - Si les deux gaussiennes se chevauchent, on obtient un **taux d'erreur** (intégrale de la gaussienne entre le point extrême pris par la courbe détectée et la valeur moyenne de référence)
 - **Conclusion** : même pour traiter des **symboles**, nous faisons appel à un système **analogique** ancien ancré dans notre cerveau
- Expliquer les temps de réponse : la prise de décision comme une **marche aléatoire**
 - **Contexte** : l'expérience précédente s'occupe du taux d'erreur mais ne quantifie l'arrivée des réponses dans le temps
 - **Modèle** :
 - Deux **choix** : « A » et « non A »
 - On prend une série de décisions qui constitue une **marche aléatoire**
 - Une fois qu'on atteint un certain **seuil** (écarté de la moyenne), on émet la décision A
 - On définit le rapport « probabilité de « A » sachant l'échantillon S / probabilité de « non A » sachant S » → on utilise l'indépendance des réalisations, la règle des Bayes et on passe au logarithme → cela donne la **formule** suivante :

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Decision} & & \text{Sequential} & & \text{Bayes' rule} & & \text{Independence} \\ \text{rule (BF)} & & \text{sampling rule} & & & & \text{property} \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \frac{p(L|S)}{p(R|S)} = \frac{p(L|s_1, s_2, \dots, s_n)}{p(R|s_1, s_2, \dots, s_n)} = \frac{p(s_1, s_2, \dots, s_n|L) \cdot p(L)}{p(s_1, s_2, \dots, s_n|R) \cdot p(R)} = \frac{p(L)}{p(R)} \cdot \frac{\prod_{t=1}^n p(s_t|L)}{\prod_{t=1}^n p(s_t|R)} \\ & & & & & & \downarrow \\ & & & & & & \frac{p(L)}{p(R)} \cdot \prod_{t=1}^n \frac{p(s_t|L)}{p(s_t|R)} \\ & & & & \text{Log-scale} & & \\ \boxed{v(t) = \log \frac{p(L)}{p(R)} + \sum_{t=1}^n \log \frac{p(s_t|L)}{p(s_t|R)}} & \longleftarrow & & & & & \end{array}$$

- **Conclusions** :
 - Notre cerveau travaille donc sur des signaux **stochastiques** et traite ces informations de manière probabiliste
 - Suivant les signaux reçus, la **marche aléatoire** sera différente et prendra plus ou moins de temps
 - Nos décisions sont variables et entachées d'erreurs → sous certaines hypothèses, on peut calculer ce taux d'erreur et montrer qu'il a bien une forme de **cloche centrée sur la référence** :

B) Niveau psychologique : tâches cognitives

- Décomposition d'une tâche cognitive :
 - **3 étapes** :
 - Reconnaissance des symboles (P) → effet de **notation** (lettres ou chiffres par exemple)

- Conversion en quantité et décision (C) → effet de **distance** (vu précédemment)
- Programmation de la réponse (M) → effet de **latéralisation** (main gauche ou droite) et de complexité motrice (cliquer une fois ou deux fois)
- **Conclusion** : ce modèle fait des prédictions spécifiques :
 - Au global, **plusieurs régions cérébrales** participent à la tâche et donnent lieu à un temps de réponse d'environ **500ms**
 - Les 3 étapes sont associées à des **régions cérébrales** bien distinctes
 - **Additivité des 3 effets** sur la moyenne des temps de réponse (ils n'interagissent pas, « les boîtes sont différentes »)
 - **Effets différents** sur la variabilité des temps de réponse :
 - Les facteurs qui affectent les étapes P ou M ajoutent un **délai fixe** (pas d'effet sur la variabilité) → réseaux de neurones assez simples, linéarité
 - Les facteurs qui affectent C doivent augmenter la **variabilité**
- Collisions mentales dans l'exécution simultanée de deux tâches :
 - **Expérience** : on demande de réaliser deux tâches cognitives en même temps (une auditive et une visuelle)
 - **Conclusion** : effet de goulot d'étranglement :
 - Les deux tâches ne sont pas exécutées en parallèle mais en **série** → on observe une **période psychologique réfractaire** (la deuxième tâche doit attendre que la première ait fini d'être traitée)
 - Seule l'étape C est **ralentie** durant la collision
 - **Remarque** : ce délai n'est **pas conscient** → on n'a pas conscience que la deuxième tâche est en attente

C) Niveau de l'implémentation neuronale : accumulation d'évidences et réseaux de neurones

- Implémentation neuronale de l'accumulation d'évidence : accumulation stochastique dans le cortex préfrontal → niveau d'implémentation
 - **Contexte** : on a analysé la prise de décision sous l'effet comportemental // on peut maintenant l'analyser sous l'aspect neuronal
 - **Expérience** : des singes analysent un mouvement global de points vers la gauche ou la droite, et on enregistre l'activité de certains neurones qui semblent former un réseau de prise de décision
 - **Résultats** :
 - Il y a bien une accumulation d'évidence au niveau de ces neurones (ils sont de plus en plus stimulés au cours du temps)
 - La marche aléatoire d'une population de neurones **prédit la décision de l'animal**
 - **Conclusion** : la charge des neurones semble ainsi indiquer la difficulté de la tâche → il y a un processus d'accumulation impliquant une population de neurones :
 - Neurones **d'évidence** → envoient des stimulations
 - Neurones **intégrateurs** → prennent la décision globale
- Raisonnement probabiliste :
 - Expérience de **Wong et Wang** : deux populations de neurones sont en compétition (l'un intègre en faveur de A et l'autre de B)
 - **Résultats** : après plusieurs milliers d'essais d'entraînement, des singes répondent de manière probabiliste et régulière
 - **Conclusion** : **le cerveau raisonne avec des probabilités** → le taux de décharge des neurones reflète l'évidence accumulée à chaque instant
- Retour aux trois niveaux d'analyse proposés par David Marr :
 - **Computation** :
 - **Problème** = catégoriser un stimulus
 - **Solution** = probabilité de réponse sachant un stimulus
 - **Algorithme** :
 - **Accumulation d'évidence** pas à pas jusqu'à atteindre un **seuil**
 - **Représentation** de l'évidence et des probabilités
 - **Implémentation** : réseau de neurones avec **évidence et intégration**

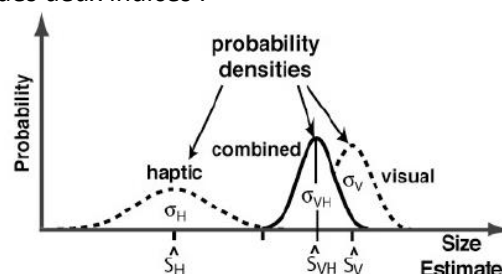
III) Le cerveau bayésien : le rôle des statistiques dans la perception, la prise de décisions et l'apprentissage

- Nous ne sommes **pas conscients** de l'**extérieur** mais d'une **inférence** réalisée sur les entrées perceptives

A) La perception visuelle comme inférence

- Inférence :
 - **Définition** : mouvement des pensées allant des propositions à la conclusion
 - On peut faire des **raisonnements probabilistes** classiques (en marche avant : règle de chaînage) ou bayésiens (en marche arrière : règle de Bayes)
 - **Inférence bayésienne** : étant donnée une observation, quelle est la probabilité de différentes hypothèses sur sa cause ?
- Raisonnement bayésien :
 - **Exemple** :
 - Une personne tousse. Trois **hypothèses** : grippe, cancer du poumon, gastro
 - **Raisonnement** :
 - Hypothèse 1 : probabilité et vraisemblance élevées
 - Hypothèse 2 : vraisemblance élevée mais probabilité faible
 - Hypothèse 3 : gastro
 - **Conclusion** : l'hypothèse 1 est la bonne → on utilise pour cela le maximum a posteriori (et non de vraisemblance car les probabilités ne sont pas les mêmes)
 - **Remarques** :
 - Le cadre bayésien s'applique parfaitement à la perception car les entrées sensorielles sont toujours **ambiguës** (les illusions d'optique en sont la preuve)
 - La théorie bayésienne explique ce processus de choix par :
 - Les a priori → **probabilités**
 - Les connaissances → **vraisemblances**
 - On a donc un **modèle interne** dans notre tête (utile dans notre imagination mais aussi dans notre perception)
- Illusions d'optique :
 - **Exemples** : masque qui tourne, tailles de barre en fonction de leur orientation ou de leur position...
 - **Explications** : le cerveau a internalisé un modèle d'a priori
- Intégration bayésienne de plusieurs indices sensoriels :
 - **Contexte** : le cerveau combine des indices sensoriels de plusieurs natures (visuels, auditifs...)
 - **Démarche** : on **fausse** des indices sensoriels simultanés (la vue est celle d'un écran dans un miroir, et brouillée par du bruit dont l'intensité est modulable) et on demande au sujet de mesurer la largeur d'un objet
 - **Attentes** : les indices sont conditionnellement indépendants donc la densité de probabilité combinée doit être le **produit** des densités de probabilité des deux indices :

$$\begin{aligned} P(w|t,v) &= \frac{P(t,v|w)P(w)}{P(t,v)} \\ &= \frac{P(t|w)P(v|w)P(w)}{P(t,v)} \\ &\propto P(t|w)P(v|w)P(w) \end{aligned}$$



- **Résultats** : plus le bruit est élevé, plus la perception est biaisée vers les informations tactiles (cohérent !) → Tout cela était bien prédit par la théorie bayésienne

B) L'apprentissage : un autre domaine d'application de la théorie Bayésienne

- Introduction :
 - **Apprentissage** : accumulation d'évidences à travers le temps
 - **Scandale de l'induction** : notre cerveau tire des conclusions à partir de très peu d'informations

- **Hypothèse** : notre cerveau rajoute artificiellement des informations → on peut trouver un compromis grâce à la théorie bayésienne (qui combine à priori et indices)
- Expérience :
 - **Démarche** :
 - Avec 3 modèles de « tufas », on est capable de distinguer avec succès d'autres « tufas »
 - Plus on diversifie les exemples de la catégorie qu'on cherche à identifier, et moins notre cerveau se trompera lors d'une identification future (prédit par la théorie bayésienne)
 - **Conclusion** : notre cerveau fonctionne avec un arbre de similarités qui élimine les hypothèses les plus improbables
 - **Remarque** :
 - Ces prédictions sont moins **biaisées** chez l'enfant
 - Ces calculs sont faisables par des enfants qui n'ont jamais fait de mathématiques auparavant → image des « **bébés statisticiens** » qui savent déjà faire des probabilités dès leur plus jeune âge (en anticipant des probabilités, dans le sens classique ou bayésien) :
 - Exemple d'une urne visible dont sort une boule aléatoirement
 - Exemple d'une urne au contenu caché dont on sort une boule pour inférer son contenu
 - Exemple de la détection et l'apprentissage de mots → utilisation de statistiques
- Conclusion :
 - L'inférence bayésienne est simplement l'extension de la **logique** → raisonnement plausible en présence **d'incertitudes**
 - Nos décisions reflètent un **calcul bayésien** des probabilités (combiné avec une estimation des conséquences de nos choix, non-abordée ici)
 - L'inférence bayésienne rend bien compte des processus de **perception** (étant données des entrées ambiguës, notre cerveau en reconstruit l'interprétation la plus probable), des **illusions d'optique** (rôle des a priori), et de la **combinaison de plusieurs indices sensoriels**
 - Le **bébé** semble doté, dès la naissance, de compétences de **raisonnement probabiliste**

IV) La conscience

- Questions :
 - Peut-il y avoir une **science de la conscience** ? La science n'est-elle pas limitée à l'étude des phénomènes objectifs ?
 - L'esprit n'échappe-t-il pas aux **limites du corps** (pensée **dualiste** séparant corps et âme) ?
- Descartes :
 - **Dualiste** : « substance cogitante » différente de la « substance réelle » → l'Homme a une âme
 - Tous les phénomènes biologiques (sommeil, mémoire...) ont une **explication mécanique** → les êtres vivants sont des automates // deux **problèmes** :
 - Comment avoir de la flexibilité, de la diversité de comportement ?
 - Comment comprendre la complexité du langage ?
- Aujourd'hui : le problème n'est plus insurmontable :
 - Emergence de **l'informatique** → une machine peut très bien utiliser un langage
 - Nous avons commencé à identifier des **mécanismes cérébraux objectifs** et les distinguer de ceux subjectifs (signatures de la conscience)
 - Ces éléments commencent à être utilisés en **clinique** (anesthésiants...)

A) Accès à la conscience d'une information

- Illusions d'optique : porte d'entrée sur le **monde de la conscience** → elles distinguent l'objectif du subjectif :
 - Le traitement perceptif initial peut-être très complexe mais demeure **non conscient** → cf. calculs bayésiens qui provoquent ces illusions
 - La **perception consciente** corrèle avec une vague d'activité neuronale tardive et durable qui intègre les entrées sensorielles dans un réseau global
 - Notre conscience est donc **en retard** sur le monde extérieur
- Les ingrédients essentiels de la science de la conscience :
 - Des **paradigmes expérimentaux** permettent de manipuler la conscience :
 - **Réalité binoculaire** → nos deux yeux perçoivent des images différentes → notre perception alterne entre les deux
 - **Masquage** → faire apparaître des choses sous forme de flashes les fait disparaître de notre perception consciente
 - **Clignement de l'attention** → enchainement à grande fréquence d'images → nous n'avons pas conscience de certaines d'entre elles
 - Les recherches se focalisent sur l'**accès à la conscience** d'une information sensorielle élémentaire
 - **L'introspection** est au cœur du programme de recherche → la subjectivité n'est pas un problème, et on peut quantifier la perception subjective (« j'ai vu... ») car **subjectif ne veut pas dire arbitraire**
- Méthode d'amorçage subliminal :
 - Expérience de **masquage** avec une image se répétant plein de fois et au milieu, un mot avec une durée très courte. A la fin, on réaffiche le même mot mais plus longtemps (ou un mot différent)
 - **Résultats** :
 - On ne voit pas la **première occurrence** du mot
 - Le temps de réponse est plus rapide lorsqu'on présente le même mot qu'avec un mot différent (même lorsqu'on change la casse) → effet d'amorçage inconscient avec traitement de l'information
 - Pour autant, le premier mot est impossible à conscientiser, personne ne se rappelle l'avoir vu
 - Le masquage ne fonctionne plus si on enlève les autres images qui encadrent temporellement ce mot (il est donc bref mais visible)
 - La durée du « flash » est importante → on peut conscientiser en augmentant sa durée
 - **Interprétation** : grâce à un IRM :
 - **Signature neuronale différente** associée aux différentes étapes de traitement (reconnaissance des traits puis des lettres) // pour autant, ces deux aires sont activées même lors d'un mot masqué
 - Les mots non conscients activent moins d'aires cérébrales que les mots conscients → existence d'un « **seuil de conscience** » qui active des aires cérébrales massivement :
 - Première partie de la réponse cérébrale est graduelle, linéaire et inconsciente → le cerveau accumule inconsciemment des statistiques sur les stimuli
 - Seconde partie de la réponse = « tout ou rien » → l'accès à la conscience survient quand l'activité franchit un seuil et embrase un vaste réseau cérébral
 - Les **aires activées** sont autant corticales que sous-corticales → il n'y a pas de séparation spatiale entre « conscient » et « non-conscient »

B) Mécanismes neurologiques derrière cet embrasement conscient

- Déroulement temporel des représentations mentales :
 - **Questions** :
 - Est-ce possible de décoder le stimulus (information) reçue par un sujet en fonction de son activité cérébrale ?
 - Est-ce qu'on obtient le subjectif ou l'objectif ?
 - **Réponse** : oui, avec un « décodeur multivarié des signaux MEG » qu'on a entraîné au préalable sur le même sujet avec les mêmes images possibles
 - **Résultats** : deux étapes :

- Cascade sérielle d'activité précoce → on peut voir, même dans un cas non conscient, qu'il y a bien eu un stimulus → accès à l'**objectif**
 - Accès à une **représentation métastable** dans le cas conscient → embrasement conscient
- Embrasement conscient chez le bébé : y a-t-il les **mêmes processus chez un bébé** ? Oui, il y a les mêmes processus // ralentis d'un **facteur 3** pour franchir le seuil de conscience
- Enregistrement de la conscience au niveau de neurones uniques :
 - Certains neurones ne **déchargent** que lors de la détection consciente de leur image préférée → caractère « tout ou rien » de l'accès à la conscience
 - Seules les images conscientes induisent une **réponse amplifiée et durable** (les autres ne provoquent qu'un tout petit stimulus)
- Théorie de la détection du signal : comment est reçu un signal faible ?
 - **Embrasement conscient** :
 - On peut représenter la **force de la représentation** (modulée par exemple avec le contraste) sur un axe horizontal
 - On fixe un **seuil de décision** → en-dessous, on voit le stimulus, et au-dessus on le voit
 - Existence **d'erreurs** → cf. superposition des gaussiennes
 - **Application** dans le contexte de l'**embrasement préfrontal** : observation de l'activité neuronale d'aires différentes avec des forces de représentation différentes :
 - Les **aires les plus profondes** ont le même niveau d'activité entre des essais « vus » et « manqués » → elles ne peuvent pas être à l'origine de la perception consciente
 - L'embrasement cortical a lieu dans le **cortex préfrontal** à chaque fois que l'essai est « vu »
 - **Modèle** : réseau de neurones modélisé par un graphe avec une activité montante et une autre descendante à chaque fois (réverbération qui explique la persistance d'une image dans la mémoire) → dès qu'on atteint le cortex, la perception est **conscientisée**

C) Modèle théorique : hypothèse de l'espace de travail neuronal global

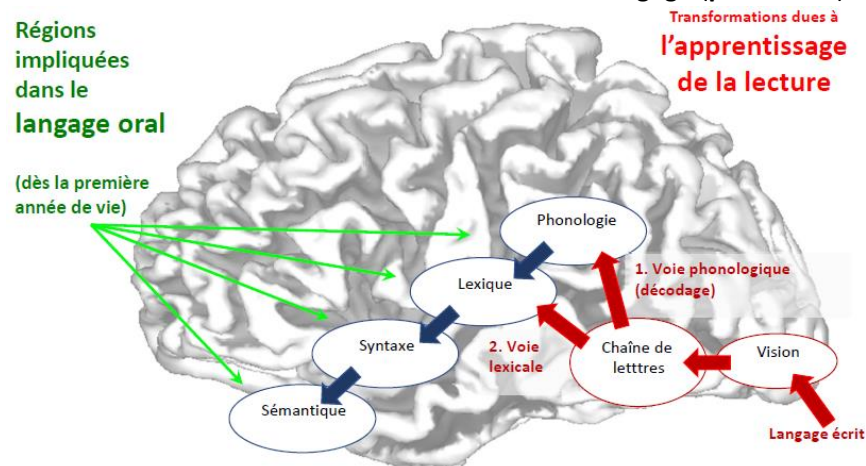
- Modèle théorique :
 - **Théorie** :
 - Le cerveau comprend de nombreux processeurs spécialisés qui traitent les informations **non-consciemment**
 - Ce que nous appelons « **prise de conscience** » correspond à l'entrée d'une information dans un système neuronal distinct : l'**espace de travail neuronal global**, un système de neurones denses dans les **régions préfrontales et pariétales**, dont les axones longs diffusent les informations globalement
 - L'information consciente devient alors **stable et disponible** à l'ensemble des processeurs, ce qui permet de l'utiliser avec flexibilité et de la rapporter aux autres
 - **Avantage** : cela explique plusieurs propriétés clefs (embrasement tout ou rien, collision entre tâches, activité spontanée...)
- Utilité de la conscience : pourquoi avoir évolué dans ce sens-là ?
 - **Avantages** :
 - **Réfléchir posément** : l'information subliminale s'évanouit rapidement, l'information consciente reste stable aussi longtemps que nécessaire
 - **Comprimer le flux d'informations** : le réduire à quelques symboles discrets qui peuvent être rapportés à d'autres ou stockés en mémoire
 - **Renvoyer l'information à d'autres processeurs** : le routeur cérébral permet de réaliser des opérations en série
 - **Surveiller nos opérations mentales** : repérer les erreurs (la détection de ses propres erreurs requiert une perception consciente : le cerveau sait tout seul qu'il a fait une erreur)
 - **Inconvénients** :
 - Très nombreuses opérations s'exécutent inconsciemment
 - L'accès à la conscience est souvent **lent**

V) Mécanismes cérébraux d'acquisition de la lecture

- Lecture :
 - **Reconnaissance des symboles** → permet donc la communication des pensées par les yeux
 - Apprendre à lire consiste à accéder, par la **vision**, aux aires du langage parlé → cela consiste donc à greffer une **entrée visuelle** (ou tactile pour le braille) sur le système du langage parlé
- Remarques : le langage parlé est très différent du langage écrit
 - Celui parlé est **inné** (déjà organisé chez un bébé) // celui écrit s'apprend
 - Ils activent des **aires cérébrales** différentes // certaines aires activées sont pour autant **communes** :
 - On peut comprimer la lecture en affichant les mots à la suite sous forme de flashes (supprime les saccades des yeux)
 - **Rythme de détection** du langage similaire, cela devient inintelligible autour de 50% de compression

A) Modèles de reconnaissance des lettres

- Aire des chaînes de lettres dans le cerveau :
 - **Caractéristiques** :
 - Elle détecte les **graphèmes** (chaînes de lettres)
 - Elle est détectable chez **tous** les lecteurs, au même endroit quel que soit la culture (cortex)
 - Elle est entourée d'une mosaïque de régions spécialisées dans la reconnaissance de visages, d'objets...
 - Elle est connectée à l'aire de reconnaissance des sons du langage (**phonèmes**)



- **Propriétés** :
 - Invariance pour la **position**, la **taille** et la **casse** → système de filtres
 - Amplification de **différences** petites mais pertinentes : deux VS doux
 - Sensibilité à l'**agencement** des lettres et **régularités** orthographiques : statistiques sur les chaînes de lettres...
- **Fonctionnement** : l'apprentissage de la lecture accroît l'activité cérébrale en réponse aux phrases écrites (cf. expérience avec analphabètes) :
 - Dans les aires du langage
 - Dans les aires visuelles
- **Remarques** :
 - Avant d'apprendre à lire, cette région sert à la **reconnaissance des visages**, des outils, des damiers... → il y a donc un **recyclage** de cette aire visuelle tandis que la reconnaissance des visages se déplace dans une autre aire → **plasticité cérébrale**
 - Chez les **dyslexiques** qui n'ont pas appris à lire, les deux aires visuelles (lecture et visage) sont désorganisées
- Modèles théoriques pour la reconnaissance des mots :
 - **Ancien modèle** : parallèle entre **reconnaissance des visages** et reconnaissance des mots : **réseau de neurones** qui reconnaissent un à un des parties du visages avec des **niveaux d'abstraction** de plus en plus élevés (reconnaissance sous différents angles, lumières...) → des neurones reconnaissent les

traits et activent des neurones reconnaissant des lettres, eux-mêmes activant des combinaisons de lettres... → on recycle donc des aires visuelles pour les dédier à la lecture

- **Modèle actuel** : même modèle mais affiné avec des prédictions informatiques basées sur des « réseaux de neurones » capables de reconnaître des images

B) Développement de la lecture

- Développement des aires visuelles à l'enfance :

- Concernant la **lecture**, le circuit se met en place très **rapidement** (quelques semaines) avec un développement rapide des aires qui y sont consacrées, et même une réduction plus tardive de leur taille après l'automatisation du processus de lecture (elle devient non-consciente)
- Concernant la **reconnaissance des visages**, celle-ci est très lente et sa taille reste assez stable. On observe aussi une légère corrélation avec le score de lecture

- Modèle de « mosaïque » de régions visuelles : **compétition des aires par voisinage**

- **Avant** l'école, on a déjà un cortex de régions répondant à certaines catégories + des aires non spécialisées
- **Après** l'école, ce sont dans ces **aires non spécialisées** que la reconnaissance de la lecture vient se placer // en l'absence d'école, cette aire aurait été envahie par une autre voisine (reconnaissance des visages...)

- Remarques :

- Chez **l'adulte**, la **plasticité cérébrale** est bien moindre (cf. patient alexique, qui ne sait plus lire après une lésion cérébrale → il ne récupère jamais ses capacités antérieures de lecture, il arrive seulement à déchiffrer lettre par lettre // chez l'enfant, aucun problème à récupérer)
- Chez les **mathématiciens**, il y a une compétition directe entre l'aire de la reconnaissance du langage mathématique et celle de la reconnaissance des visages
- Généralisation spontanée de la **lecture en miroir** : tous les enfants font des erreurs et écrivent parfois de droite à gauche (→ logique : cf. symétrie des visages) // nous devons désapprendre cette généralisation (*odil* VS *libo*)
- **L'alphabétisation** développe aussi :
 - Les **connexions neuronales** (la myélinisation dépend de l'apprentissage)
 - Les **aires auditives** liées à la reconnaissance du langage parlé

VI) Les mécanismes de l'apprentissage

A) La plasticité cérébrale dans l'apprentissage

- Plasticité cérébrale :
 - **Définition** : processus de **modification** du cerveau basé sur :
 - Le renforcement et élimination de **synapses** → l'activité neuronale module sélectivement la stabilité de synapses à des échelles de temps rapides par le biais de réarrangement d'épines dendritiques
 - La modification du **branchement** des axones et leur **myélinisation**
 - **Exemples** :
 - Lésion cérébrale sur un hémisphère entier // grandes capacités dans domaines variés
 - Hémisphère non développé à la naissance // réorganisation du cerveau avec réallocation de zones associées à l'hémisphère non développé
 - **Remarque** : pour autant, tout n'est pas plastique → il y a des **limites**
 - **Résultats** :
 - Le cerveau est donc un réseau **organisé et structuré** de neurones, et ce dès la naissance
 - Un bébé possède déjà des « noyaux de connaissances » (nombres, objets, personnes...) → il a déjà le sens approximatif de l'arithmétique
 - **Dynamique** : elle diminue au cours du développement car les neurones s'entourent progressivement de « barrières » (filets) qui empêchent de nouvelles synapses de se former → **l'apprentissage** fonctionne d'autant mieux qu'il est **précoce**
- Apprentissage :
 - **Définition** : apprendre, c'est ajuster les paramètres d'un modèle interne du monde → ajuster des millions de synapses afin d'accorder nos neurones aux aspects pertinents du monde
 - **Exemple** :
 - Décalage entre la vision et l'action → ajustement d'un seul paramètre
 - Reconnaissance d'un chiffre → ajustement de millions de paramètres → rétropropagation des erreurs pour « mettre à jour » le réseau de neurones
 - **Remarque** : le cerveau est une formidable **machine à apprendre** :
 - Il contient un algorithme **d'apprentissage statistique** extrêmement sophistiqué
 - Ce modèle est présent dès la **naissance** → l'enfant :
 - Dispose d'hypothèses **hiérarchiques** qu'il projette sur le monde extérieur
 - Il sélectionne des hypothèses en fonction de leur **plausibilité**
 - **Processus** : détection d'erreurs et rétropropagation pour mettre à jour le système

B) L'éducation comme un recyclage neuronal

- Explication :
 - Nous héritons de notre **évolution** des représentations intuitives de domaines importants pour notre survie (espace, nombres, langages...) // pas d'évolution propre à la lecture
 - L'apprentissage recycle ces **systèmes cérébraux** pour de nouveaux usages culturels
- Exemple : les mathématiques de haut niveau **recyclent** les réseaux corticaux impliqués dans le calcul et le traitement des nombres

C) Les quatre piliers de l'apprentissage

- Attention :
 - **Définition** : ensemble des mécanismes qui nous permettent de sélectionner une information et de ses étapes de traitement
 - **Exemple** : cécité attentionnelle (ne pas voir ce que l'on ne cherche pas)
 - **Mécanismes** :
 - **Alerte** : captiver l'attention
 - **Orientation** : l'amener sur un détail en particulier
 - **Contrôle exécutif** : traiter les informations et apprendre à apprendre (ne pas être distrait, résister à un conflit...)

- Engagement actif : on n'apprend pas bien en étant **inactif** → l'apprentissage est optimal lorsque l'étudiant alterne étude et test répété de ses connaissances
- Retour sur erreur :
 - **Mécanisme** :
 - **Signal d'erreur informatif** = décalage entre prédiction et perception
 - Rôle essentiel de **l'erreur de prédiction**
 - **Conséquence** :
 - Se **tester** régulièrement maximise la performance à long terme
 - Cela n'implique ni la sanction ni la punition → il vaut bien mieux **récompenser** le succès
- Consolidation : automatisation, sommeil
 - **Automatisation** :
 - Au début de l'apprentissage, le cortex préfrontal est fortement mobilisé : traitement explicite et conscient avec l'effort
 - Progressivement, l'automatisation transfère les connaissances vers des réseaux non-conscients libérant les neurones
 - Rôle important du **sommeil** :
 - Partie intégrante de notre algorithme d'apprentissage
 - Intervient dans la consolidation des apprentissages par un mécanisme de **replay**