

Éclairage scientifique

L'apprentissage prédictif : apprendre des erreurs

L'erreur au cœur des apprentissages

Les erreurs sont importantes pour apprendre et le fait de commettre des erreurs ne devrait pas être perçu comme une menace à l'image de soi, mais comme une condition normale en phase d'apprentissage de quelque chose de nouveau.

Dans beaucoup de cas, commettre des erreurs a des conséquences désastreuses. Et c'est bien pour cela que les erreurs s'accompagnent d'un sentiment négatif. Être conscients de ses erreurs et y associer un sentiment négatif sont des comportements adaptatifs qui ont dû aider nos ancêtres à survivre, car ils permettent de modifier ses comportements pour éviter de commettre les mêmes erreurs dans le futur. Apprendre de ses erreurs est donc fondamental, mais pour cela il faut que le cerveau puisse prendre note de ses erreurs. Les neuroscientifiques ont d'ailleurs identifié une activité particulière du cerveau (appelée ERN : négativité associée à l'erreur, car elle correspond à une polarité négative dans des enregistrements par électroencéphalogramme, EEG) et qui accompagne l'erreur.

Le cerveau prédictif : un modèle (ou des modèles) pour expliquer certaines formes d'apprentissage

Notre cerveau fonctionne en produisant des prédictions, en les comparant avec les informations (input) qui arrivent de l'environnement et en mettant à jour ces prédictions quand la situation le demande. Les prédictions, dont la génération requiert un modèle interne du monde, sont accompagnées d'un certain degré d'incertitude/confiance (Meyniel et al. 2015). Lorsque les prédictions sont comparées avec l'input deux choses peuvent se passer : il y a cohérence ou incohérence entre les deux. Si la prédiction se trouve en conflit avec l'input alors un signal d'erreur se déclenche qui peut avoir à son tour différentes conséquences : a. la révision de la prédiction et donc du modèle du monde ; b. le fait d'ignorer l'input et de le considérer comme erroné ou non fiable. Les conséquences dépendent entre autres du niveau d'incertitude/confiance associé à la prédiction initiale et de celui associé à l'input. La révision de la prédiction et sa mise à jour qui font suite au constat d'une erreur de prédiction se traduisent dans un nouvel état du cerveau, donc sont l'équivalent d'un apprentissage.

Cette description est au cœur d'un modèle du fonctionnement du cerveau, utilisé en neurosciences pour expliquer certaines formes d'apprentissage, notamment mais pas uniquement perceptifs, l'expérience des illusions visuelles et auditives, certains aspects de la prise de décision et d'autres comportements encore. C'est l'un des modèles les plus explorés et importants dans les neurosciences contemporaines et existe sous plusieurs formes (Overbye et al. 2019, Overbye et al. 2020, Nave et al. 2020).

Si on se base sur ce modèle, on peut affirmer que l'erreur - ou mieux : le processus qui va de la formulation d'une prédiction à sa comparaison avec des inputs et au constat de l'erreur de prédiction) est un moteur d'apprentissage car la modification des représentations initiales dépend du constat d'une erreur ou incohérence entre prédictions et input (la correction suite à une erreur de prédiction est un mécanisme d'apprentissage utilisé par le cerveau, mais ce n'est pas le seul).

Ainsi, selon ce modèle :

- le cerveau génère en permanence des prédictions ;
- la comparaison avec la réalité génère un signal d'erreur, le cas échéant ;
- le modèle interne est modifié de manière à minimiser le signal d'erreur ;
- la prédiction future est plus ajustée à la réalité ;
- une fois que l'erreur est nulle, l'apprentissage cesse.

Les trois ingrédients fondamentaux de ce type d'apprentissage sont alors :

- l'anticipation ou prédiction, basée sur le modèle interne,
- le sentiment d'incertitude/confiance,
- la correction, feedback ou retour de la part du monde externe.

La perception de l'erreur a une signature cérébrale caractéristique

Dans des situations de laboratoire, par exemple, les chercheurs soumettent des volontaires à des tâches perceptives relativement difficiles : ils doivent presser un bouton pour indiquer la direction vers laquelle pointe un certain stimulus à l'écran, mais ce stimulus est entouré de distracteurs. Souvent, lorsque les volontaires commettent des erreurs on voit apparaître, simultanément à la mauvaise réponse donnée, une activité cérébrale caractéristique, une onde électrique avec un pic négatif (notamment du côté du cortex de la partie supérieure du cerveau). Puisque cette onde est associée avec le fait de commettre des erreurs, elle est appelée « error-related negativity », ERN (Fu et al. 2019, Tamnes et al. 2013).

Cette activité est quasi-simultanée avec le fait de commettre une erreur (elle suit l'erreur à une distance d'à peine 100 ms), et elle précède même le fait de s'en rendre compte consciemment (la sensation de l'erreur n'arrive que 200 ms après). Qu'est-ce qui est donc signalé ? Le fait que, entre l'action accomplie et ce qu'on voulait accomplir, il y a eu un décalage. La sensation d'avoir commis une erreur, plus tardive, s'associe à un autre pic dans la courbe d'activité électrique enregistrée via EEG, un pic cette fois positif appelé EP, positivité de l'erreur.

Après avoir commis une erreur, et après que la ERN s'est manifestée, les réponses à la tâche deviennent plus lentes, signe que le cerveau est en train de prendre en compte le risque d'erreur et d'adapter le comportement en conséquence.

Les régions cérébrales responsables pour ce signal d'erreur sont probablement localisées dans le cortex cingulaire, qui détecte l'erreur et le signale à d'autres parties du cerveau.

Comme toutes les autres régions cérébrales, ces régions se développent au cours de la vie. En particulier, le signal d'ERN change entre enfance et adolescence : les grands adolescents, comme les adultes, ont un signal plus fort par rapport aux enfants.

Un signal ERN fort peut être associé à de meilleures performances scolaires (Hirsh & Inzlicht 2010) mais peut aussi s'associer à une plus grande anxiété face à l'erreur (Hajcak 2012).

Du labo à la classe ?

Ce type de modélisation permet de fournir des explications satisfaisantes de nombreux phénomènes et comportements observés au niveau macroscopique (comportement, perception, décision). Cependant, il peut être risqué d'en extrapoler des considérations de type pédagogique.

Premièrement, le modèle décrit ci-dessous s'applique uniquement à certaines formes d'apprentissage, ce qui signifie qu'il existe d'autres modalités d'apprentissage qui n'ont pas le même type de fonctionnement.

Deuxièmement, le modèle se limite à décrire la manière dont le cerveau traite des inputs et modifie ses représentations à un niveau implicite (sans intervention nécessaire de la conscience) et microscopique (au niveau de populations de neurones).

Par conséquent, lorsqu'il s'agit de fournir des indications pédagogiques concernant la manière de favoriser les apprentissages scolaires, il est important de se tourner vers les études empiriques (qui permettent d'observer rigoureusement l'efficacité de différentes modalités d'intervention) et notamment d'études qui ont lieu dans des situations réelles d'apprentissage (en classe) plutôt que dans les conditions épurées du laboratoire.

Nous pouvons néanmoins extraire des considérations générales, par ailleurs supportées par des études empiriques, concernant la place de l'erreur dans la classe.

L'erreur dans la classe

Dans des situations d'apprentissage, scolaire, commettre des erreurs n'a pas de conséquences dramatiques, ni négatives ! Il est donc important d'amener les élèves à bien distinguer entre situations où les enjeux sont élevés - et commettre une erreur peut avoir des conséquences graves - et des situations où les enjeux sont faibles - et le fait de commettre une erreur et de se corriger permet juste de modifier ses représentations préalables et apprendre quelque chose de nouveau.

Il est également important d'amener les élèves à comprendre que les erreurs font naturellement partie des situations nouvelles, inconnues et que la familiarisation et l'apprentissage ont pour effet de réduire ces erreurs, progressivement. Si une situation nouvelle apparaît trop facile pour l'élève, alors il ne s'agit pas d'une situation d'apprentissage. Le ressenti du défi et la sortie de la zone de confort sont donc des conditions auxquelles s'exposer pour apprendre.

Carol Dweck, la scientifique à l'origine de la théorie du *growth mindset* ou esprit de croissance, invite à célébrer les erreurs et à amener les élèves à accueillir positivement les défis et la sortie de la zone de confort.

Elle invite cependant à ne pas se limiter à mettre les élèves dans la condition de commettre des erreurs, mais de porter ceux-ci au centre de la discussion, de manière positive, de manière à :

- montrer que les erreurs font vraiment partie du processus de croissance et d'apprentissage, pour tous ;
- faire réfléchir à comment on s'est rendu compte d'une erreur et de ce que l'on a appris de l'erreur ;
- dédramatiser les erreurs et de rendre les élèves à l'aise pour en parler (Dweck 2010).

L'apprentissage avec correction de l'erreur et l'engagement actif

Le fait d'émettre des prédictions et de les corriger est consubstantiel à certaines formes d'apprentissage est parfois utilisé pour expliquer les résultats positifs obtenus par des stratégies pédagogiques dites « actives ». Ces stratégies se caractérisent par un engagement actif de l'apprenant qui est appelé à répondre à des questions, formuler des hypothèses, discuter en groupe, argumenter, ...

Une méta-analyse publiée en 2014 a analysé 225 études, publiées et non publiées, comparant pédagogies actives et leçons traditionnelles, pour des étudiants de niveau universitaire. Les interventions de pédagogie active étaient très hétérogènes, variant considérablement en intensité et en mise en œuvre, et comprenant des approches aussi diverses que :

- la résolution occasionnelle de problèmes en groupe,
- des feuilles de travail ou des tutoriels complétés en classe,
- l'utilisation de systèmes de réponse (*clickers*) avec ou sans enseignement par les pairs,
- et des cours en atelier.

Les mesures utilisées ont concerné les notes et des inventaires de concepts, ou d'autres évaluations. En moyenne, les performances des élèves ayant reçu une forme d'enseignement actif se sont révélées être supérieures (d'un peu moins d'une demi déviation standard) par rapport à l'enseignement magistral. Cet effet positif s'est manifesté pour toutes les disciplines analysées : mathématiques, biologie, chimie, informatique, ingénierie, géologie, physique, psychologie (Freeman et al. 2014).

D'autres formes d'apprentissage actif consistent à tester (ou à se tester) afin de mieux mémoriser. Ces techniques actives de mémorisation sont contrastées avec des techniques plus passives d'étude (en fait, des techniques qui ne demandent pas de remobilisation active des traces en mémoire) qui consistent à relire un texte plusieurs fois (Dunlosky et al. 2013).

L'engagement actif et l'apprentissage par l'erreur sont donc aussi fortement connectés à l'idée de feedback correctif. En effet, un nouvel apprentissage peut se produire à partir de l'engagement actif et de l'erreur qui peut s'ensuivre uniquement si l'erreur est corrigée. Naturellement, le feedback doit être bienveillant et encourager plutôt que décourager le fait de prendre des risques.

Références

Synthèses

- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(23), 8410-8415.
- Hattie, J. (2008). *Visible learning: A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement*. Routledge.
- Wisniewski, B., Zierer, K., & Hattie, J. (2020). The power of feedback revisited: A meta-analysis of educational feedback research. *Frontiers in Psychology*, 10, 3087.

Livres

- Dehaene, S. (2020). *How we learn: The new science of education and the brain*. Penguin UK.
- Dweck C. S. (2006). *Mindset: The new psychology of success*. New York, NY: Random House.

Articles

- Dunlosky, J., Rawson, K. A., Marsh, E. J., Nathan, M. J., & Willingham, D. T. (2013). Improving students' learning with effective learning techniques: Promising directions from cognitive and educational psychology. *Psychological Science in the Public interest*, 14(1), 4-58.
- Fu, Z., Wu, D. A. J., Ross, I., Chung, J. M., Mamelak, A. N., Adolphs, R., & Rutishauser, U. (2019). Single-neuron correlates of error monitoring and post-error adjustments in human medial frontal cortex. *Neuron*, 101(1), 165-177.
- Hajcak, G. (2012). What we've learned from mistakes: Insights from error-related brain activity. *Current Directions in Psychological Science*, 21(2), 101-106.
- Hirsh, J. B., & Inzlicht, M. (2010). Error-related negativity predicts academic performance. *Psychophysiology*, 47(1), 192-196.
- Meyniel, F., Sigman, M., & Mainen, Z. F. (2015). Confidence as Bayesian probability: From neural origins to behavior. *Neuron*, 88(1), 78-92.
- Nave, K., Deane, G., Miller, M., & Clark, A. (2020). Wilding the predictive brain. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 11(6), e1542.
- Overbye, K., Walhovd, K. B., Paus, T., Fjell, A. M., Huster, R. J., & Tamnes, C. K. (2019). Error processing in the adolescent brain: Age-related differences in electrophysiology, behavioral adaptation, and brain morphology. *Developmental cognitive neuroscience*, 38, 100665.
- Overbye, K., Bøen, R., Huster, R. J., & Tamnes, C. K. (2020). Learning from mistakes: how does the brain handle errors. *Frontiers for Young Minds*, 8, 80.
- Tamnes, C. K., Walhovd, K. B., Torstveit, M., Sells, V. T., & Fjell, A. M. (2013). Performance monitoring in children and adolescents: a review of developmental changes in the error-related negativity and brain maturation. *Developmental cognitive neuroscience*, 6, 1-13.

Auteurs

Elena PASQUINELLI

Relecture scientifique

Relecture scientifique par Florent MEYNIEL, chercheur du laboratoire UNICOG, Neurospin, CEA, spécialisé en neurosciences cognitives. Il s'intéresse plus particulièrement à la compréhension du calcul et des rôles de l'incertitude dans le cerveau.

Date de publication

Septembre 2024

Licence

Ce document a été publié par la Fondation *La main à la pâte* sous la licence Creative Commons suivante : Attribution + Pas d'utilisation commerciale + Partage dans les mêmes conditions.



Le titulaire des droits autorise l'exploitation de l'œuvre originale à des fins non commerciales, ainsi que la création d'œuvres dérivées, à condition qu'elles soient distribuées sous une licence identique à celle qui régit l'œuvre originale.

Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes

75006 Paris

01 85 08 71 79

contact@fondation-lamap.org

www.fondation-lamap.org

