

## ÉLAGAGE SYNAPTIQUE : DES NEUROSCIENCES AUX CHOIX PÉDAGOGIQUES ! TROISIÈME ÉPISODE D'UNE SÉRIE DE HUIT ÉPISODES SUR LE MODÈLE PRÉSENCE

\*Cherine Fahim, Ph.D<sup>1,2</sup>

1. Département de psychologie, Unité de psychologie clinique et de la santé, Université de Fribourg,
2. Endoxa Neuroscience, Château de Vaumarcus, Suisse

\*Auteure correspondante : Dre Cherine Fahim cherine.fahimfahmy@unifr.ch

Citation : Fahim, C. (2025). Élagage synaptique : de la biologie aux choix pédagogiques inclusifs.

*Cortica*, 4(2) 1-8. <https://doi.org/10.26034/cortica.2025.8562>

Cet éditorial soutient que l'élagage synaptique, orchestré par la myélinisation dépendante de l'expérience (Faust et al., 2021 ; Huttenlocher, 1979 ; Sakai, 2020), peut devenir l'un des principes organisateurs des neurosciences de l'éducation (Goldberg, 2022 ; Jolles & Jolles, 2021 ; Leisman, 2022). L'élagage synaptique désigne le processus par lequel les connexions neuronales peu utilisées sont éliminées sous l'effet des interactions entre le jeune et son environnement. Le développement cérébral obéit ainsi à deux dynamiques antagonistes et complémentaires : une surproduction de synapses ( $\approx 1$  à 3 ans), suivie d'une élimination sélective (le « *pruning* ») médiée notamment par les cellules gliales (Neniskyte & Gross, 2017 ; Riccomagno & Kolodkin, 2015). Autrement dit, l'organisme supprime sélectivement les synapses formées en excès afin de stabiliser les circuits les plus sollicités et les plus efficaces.

### Fondements mécanistiques : de Hebb à la potentialisation / dépression à long terme

Parce qu'il est dépendant de l'activité, l'élagage relie expériences d'apprentissage et architecture cérébrale : ce qui est répété et régulé s'inscrit, tandis que ce qui est peu sollicité s'estompe via la potentialisation et la dépression à long terme (Long Term potentiation (LTP)/ Long Term Depression (LTD)) (Abraham & Bear, 1996 ; Castellucci & Robitaille, 1999 ; Malenka & Bear, 2004). Ce principe, formulé dès Hebb, éclaire la manière dont les pratiques pédagogiques façonnent la dynamique corticale au fil du développement (Brown & Milner, 2003 ; Hebb, 1976).

## Fenêtres développementales et cadre opérationnel

Deux fenêtres sensibles justifient une réponse éducative adéquate : la petite enfance, qui capte les régularités sensorielles et sociales, et l'adolescence, période de raffinement des fonctions exécutives et de la prise de décision (Gogtay et al., 2004 ; Johnson, 2001 ; Malenka & Bear, 2004 ; Mount & Monje, 2017). En comprenant ces concepts, les éducateurs peuvent promouvoir des activités défiantes mais soutenues (zone proximale de développement (Vygotsky, 1978))), offrant des progrès tangibles. Loin d'un simple vernis théorique, l'élagage propose un cadre opérationnel (Dubinsky et al., 2013 ; Shukla et al., 2025) : le cerveau surproduit, puis stabilise ce qui est utilisé et utile, tandis que la microglie agit comme des « jardinières » des réseaux (Neniskyte & Gross, 2017).

**Question directrice.** Dans cet éditorial, nous répondons à : Pourquoi l'élagage synaptique est central en neurosciences de l'éducation ? Nous présentons ensuite deux hypothèses actuelles et, en conclusion, cinq engagements systémiques.

## Importance pour la neuroéducation (modèle PRESENCE)

Au cœur du développement, l'élagage affine des réseaux formés en excès pour stabiliser ceux qui servent le mieux les fonctions cognitives, socio-émotionnelles et motrices. Parce qu'il dépend de l'activité et donc de l'expérience, il constitue un pont entre pratiques éducatives et organisation des circuits : ce que l'on fait, répète, ressent et régule laisse une trace dans l'efficacité synaptique. Ces dynamiques ne suivent pas une trajectoire unique : leur rythme et leur intensité varient selon les individus et les contextes neurodéveloppementaux (neurodiversité). D'où la nécessité d'environnements différenciés et sécurisants. Dans le modèle PRESENCE, deux périodes sensibles se distinguent : une première taille durant l'enfance, puis une seconde vague à l'adolescence, en parallèle d'une myélinisation qui se prolonge jusque chez l'adulte (Gogtay et al., 2004 ; Johnson, 2001).

## De Hebb aux « jardinières gliales »

Les bases de l'élagage reposent sur la règle hebbienne (« neurones qui s'activent ensemble, se lient ensemble ») et sur la LTP/LTD. Au-delà du « fil électrique » neuronal, la microglie joue un rôle actif : elle reconnaît et élimine sélectivement des synapses moins efficaces pour optimiser les réseaux. Des anomalies de ce jardinage synaptique sont associées à des conditions neurodéveloppementales (p. ex., trouble du spectre de l'autisme ou trouble du déficit de l'attention

avec ou sans hyperactivité), ce qui appuie des environnements pédagogiques à charge sensorielle calibrée et soutenant la régulation émotionnelle (Koyama & Ikegaya, 2015 ; Ugarte et al., 2023).

### **Usage, expérience et myélinisation adaptative**

Le développement typique combine surproduction initiale puis élimination sélective. Durant l'enfance, l'abondance des contacts facilite la capture des régularités sensori-motrices et sociales ; l'adolescence orchestre une nouvelle « taille » orientée vers l'intégration exécutive et la décision, avec des trajectoires régionales différencierées (p. ex. cortex préfrontal plus tardif). Ces reconfigurations sont décrites par la cartographie dynamique corticale et les études de maturation de la substance grise/blanche. Retenons qu'usage, expérience et myélinisation adaptative constituent la clé de voûte : l'activité façonne non seulement la force synaptique mais aussi la myéline ; des travaux récents montrent une myélinisation dépendante de l'expérience qui améliore vitesse et synchronisation inter-régions. Cette plasticité à double niveau (synapses + myéline) confère au milieu éducatif un réel pouvoir (pratique distribuée, feedback, autorégulation, mouvement) (Galván, 2010 ; Goldberg, 2022).

### **Hypothèse 1 — Stress, sécurité émotionnelle et iniquités d'apprentissage**

À l'inverse, stress, insécurité émotionnelle et iniquité d'apprentissage constituent un talon d'Achille pour l'élagage, la plasticité, l'apprentissage et la mémoire (McLaughlin et al., 2014 ; Ruge et al., 2024). Le stress toxique (répété, sans adulte régulateur) perturbe l'homéostasie des circuits en périodes sensibles, altère la connectivité synaptique et la maturation fronto-limbique, avec des coûts durables pour l'apprentissage et la santé mentale. Tandis que des relations stables et soutenantes amortissent la physiologie du stress et orientent favorablement la sélection des circuits (Shonkoff & Garner, 2012 ; Meaney & Szyf, 2005 ; Zhang et al., 2018). Ces constats plaident pour des pédagogies “trauma-informed” et une culture scolaire sécurisante.

### **Hypothèse 2 — Neurodiversité : trajectoires multiples, réponses nuancées**

Ces mécanismes éclairent la doctrine hebbienne et la microglie « jardinière » : des altérations de ce jardinage s'associent à des trajectoires neurodéveloppementales atypiques, ce qui renforce l'argument d'une pédagogie ajustée aux profils neurodivergents. Parce que l'élagage dépend des régularités d'entrée (sensorielles, sociales, attentionnelles), des profils (p. ex., TSA, TDAH) peuvent présenter des patterns de connectivité et de pruning atypiques. Plutôt que d'uniformiser les circuits, la neuroéducation vise à adapter les expériences (dosage sensoriel, routines claires,

explicitation sociale, entraînement exécutif, temps de récupération), afin d'offrir à chaque cerveau l'opportunité de stabiliser ses réseaux efficaces (Mordelt & de Witte, 2023).

### **Appel à l'action : cinq engagements systémiques**

Nous appelons à cinq engagements systémiques :

1. Répétition espacée et feedback précis pour ancrer l'apprentissage.
2. Sécurité émotionnelle et compétences d'autorégulation explicites.
3. Pédagogies multisensorielles dosées pour prévenir la surcharge.
4. Entraînement progressif des fonctions exécutives, surtout au secondaire.
5. Sommeil et mouvement comme cofacteurs de plasticité.

Transformer l'école à la lumière de l'élagage synaptique, c'est reconnaître que ce que nous répétons, régulons et vivons dans des liens soutenants sculpte durablement l'architecture des circuits, et donc l'équité des apprentissages.

### **Implications pratiques pour l'école (développement détaillé)**

1. Cycle surproduction - sélection : profusion synaptique précoce pour capter les régularités, puis « taille » à l'adolescence au service des fonctions exécutives ; trajectoires régions spécifiques (p. ex. préfrontal vs sensorimoteur).
2. Plasticité à double étage : l'activité module la myéline ; la myélinisation dépendante de l'expérience améliore vitesse et synchronisation, prolongeant l'optimisation jusque chez l'adulte ; d'où l'importance d'environnements structurés, rythmés et sécurisants.
3. Répétition avec variation et espacement pour favoriser LTP/LTD et consolidation.
4. Apprivoiser le stress : un stress chronique/toxique (trop intense, répété, durable, sans adulte régulateur) perturbe la connectivité fronto-limbique; à l'inverse, des relations stables et soutenantes favorisent une sélection synaptique propice; privilégier climat relationnel sécurisant et outils d'auto-régulation dès la maternelle.
5. Valoriser la neurodiversité : ajuster dosage sensoriel, routines explicites, guidage des habiletés sociales, entraînement exécutif progressif, temps de récupération.
6. Réguler la charge émotionnelle (sécurité relationnelle, respiration, pauses actives) pour éviter le « verrouillage » fronto-limbique.

- 
7. Multisensoriel dosé : intégrer corps et perception tout en prévenant la surcharge chez les élèves hypersensibles ; fonctions exécutives : objectifs proches, auto-parler guider, feedback spécifique durant la fenêtre adolescente.
  8. Bouger et dormir : activité physique et hygiène de sommeil soutiennent plasticité synaptique et myélinisation. Ces choix s'accordent avec le modèle PRESENCE (réseaux, double élagage, synchronisation, plasticité) et offrent des leviers concrets pour une école inclusive.

### **Implications concrètes pour la classe (récapitulatif)**

- Répétition espacée & variation : consolidation par LTP/LTD (pratique distribuée, feedback fréquent, transfert de contexte).
- Régulation du stress : routines prévisibles, respiration/pauses actives, alliances éducatives, limiter l'hyper-réactivité limbique.
- Multisensoriel dosé : intégrer corps et perception en évitant la surcharge chez les hypersensibles.
- Fonctions exécutives à l'adolescence : objectifs proches, étayage de l'auto-parler, feedback spécifique.
- Sommeil & mouvement : hygiène de vie au service de la plasticité et de la myélinisation.

Ces principes s'alignent avec le modèle PRESENCE (Prédisposition génétique/épigénétique, Réseaux de neurones, Élagage synaptique durant l'enfance, Synchronisation cérébrale, Élagage synaptique durant l'adolescence, Neuroplasticité & Neurogenèse, Conscience, Et libre arbitre) et outillent une éducation fondée sur les neurosciences, à la fois (1) au niveau du contenu (enseigner le fonctionnement cérébral) et (2) au niveau de la conception pédagogique (intégrer les neuro-mécanismes de l'apprentissage).

### **Références**

1. Abraham, W. C., & Bear, M. F. (1996). Metaplasticity: the plasticity of synaptic plasticity. *Trends in neurosciences*, 19(4), 126–130. [https://doi.org/10.1016/s0166-2236\(96\)80018-x](https://doi.org/10.1016/s0166-2236(96)80018-x)
  2. Brown, R. E., & Milner, P. M. (2003). The legacy of Donald O. Hebb: more than the Hebb synapse. *Nature reviews. Neuroscience*, 4(12), 1013–1019. <https://doi.org/10.1038/nrn1257>
-

3. Castellucci, V. F., & Robitaille, R. (1999). The chemical synapse: mechanisms of transmission and modulation. *Canadian journal of physiology and pharmacology*, 77(9), 631–633. <https://doi.org/10.1139/cjpp-77-9-631>
4. Dubinsky, J. M., Roehrig, G., & Varma, S. (2013). Infusing Neuroscience into Teacher Professional Development. *Educational researcher* (Washington, D.C. : 1972), 42(6), 317–329. <https://doi.org/10.3102/0013189X13499403>
5. Galván A. (2010). Neural plasticity of development and learning. *Human brain mapping*, 31(6), 879–890. <https://doi.org/10.1002/hbm.21029>
6. Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., Nugent, T. F., 3rd, Herman, D. H., Clasen, L. S., Toga, A. W., Rapoport, J. L., & Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(21), 8174–8179. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>
7. Goldberg H. (2022). Growing Brains, Nurturing Minds-Neuroscience as an Educational Tool to Support Students' Development as Life-Long Learners. *Brain sciences*, 12(12), 1622. <https://doi.org/10.3390/brainsci12121622>
8. Faust, T. E., Gunner, G., & Schafer, D. P. (2021). Mechanisms governing activity-dependent synaptic pruning in the developing mammalian CNS. *Nature reviews. Neuroscience*, 22(11), 657–673. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00507-y>
9. Hebb D. O. (1976). Physiological learning theory. *Journal of abnormal child psychology*, 4(4), 309–314. <https://doi.org/10.1007/BF00922529>
10. Huttenlocher P. R. (1979). Synaptic density in human frontal cortex - developmental changes and effects of aging. *Brain research*, 163(2), 195–205. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(79\)90349-4](https://doi.org/10.1016/0006-8993(79)90349-4)
11. Johnson, M. H. (2001). Functional brain development in humans. *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 475–483. <https://doi.org/10.1038/35081509>
12. Jolles, J., & Jolles, D. D. (2021). On Neuroeducation: Why and How to Improve Neuroscientific Literacy in Educational Professionals. *Frontiers in psychology*, 12, 752151. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.752151>

- 
13. Leisman G. (2022). Neuroscience in Education: A Bridge Too Far or One That Has Yet to Be Built: Introduction to the "Brain Goes to School". *Brain sciences*, 13(1), 40. <https://doi.org/10.3390/brainsci13010040>
14. Malenka, R. C., & Bear, M. F. (2004). LTP and LTD: An embarrassment of riches. *Neuron*, 44(1), 5–21. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.09.012>
15. McLaughlin, K. A., Sheridan, M. A., & Lambert, H. K. (2014). Childhood adversity and neural development: deprivation and threat as distinct dimensions of early experience. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 47, 578–591. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.10.012>
16. Mordelt, A., & de Witte, L. D. (2023). Microglia-mediated synaptic pruning as a key deficit in neurodevelopmental disorders: Hype or hope?. *Current opinion in neurobiology*, 79, 102674. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2022.102674>
17. Neniskyte, U., & Gross, C. T. (2017). Errant gardeners: glial-cell-dependent synaptic pruning and neurodevelopmental disorders. *Nature Reviews Neuroscience*, 18(11), 658–670. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.110>
18. Paus, T. (2005). Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(2), 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.12.008>
19. Mount, C. W., & Monje, M. (2017). Wrapped to adapt: Experience-dependent myelination. *Neuron*, 95(4), 743–756. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.07.009>
20. Sakai J. (2020). Core Concept: How synaptic pruning shapes neural wiring during development and, possibly, in disease. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(28), 16096–16099. <https://doi.org/10.1073/pnas.2010281117>
21. Shonkoff, J. P., & Garner, A. S. (2012). The lifelong effects of early childhood adversity and toxic stress. *Pediatrics*, 129(1), e232–e246. <https://doi.org/10.1542/peds.2011-2663>
22. Shukla, S., Shukla, P., Gore, R., Mishra, B. N., Katiyar, A. K., & Singh, V. (2025). Mapping the Neuroeducation Landscape: A Bibliometric Analysis (2020-2025). *Annals of neurosciences*, 09727531251355822. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/09727531251355822>

- 
23. Ugarte, G., Piña, R., Contreras, D., Godoy, F., Rubio, D., Rozas, C., Zeise, M., Vidal, R., Escobar, J., & Morales, B. (2023). Attention Deficit-Hyperactivity Disorder (ADHD): From Abnormal Behavior to Impairment in Synaptic Plasticity. *Biology*, 12(9), 1241. <https://doi.org/10.3390/biology12091241>
24. Vygotsky, L. S. (1978). Mind in society: The development of higher psychological processes (Vol. 86) Harvard university press.
25. Zhang, T. Y., Keown, C. L., Wen, X., Li, J., Vousden, D. A., Anacker, C., Bhattacharyya, U., Ryan, R., Diorio, J., O'Toole, N., Lerch, J. P., Mukamel, E. A., & Meaney, M. J. (2018). Environmental enrichment increases transcriptional and epigenetic differentiation between mouse dorsal and ventral dentate gyrus. *Nature communications*, 9(1), 298. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02748-x>