



Neurosciences cognitives et pédagogie : analyse critique des quatre piliers de l'apprentissage chez Stanislas Dehaene

Cognitive Neuroscience and Pedagogy: A Critical Analysis of the Four Pillars of Learning in Stanislas Dehaene

AABADLI Badr

Professeur assistant, Didactique du français, Centre Régional des Métiers de l'Éducation et de la Formation Marrakech-Safi, Maroc (CRMEF Marrakech-Safi)

Résumé : Cet article reprend les « quatre piliers de l'apprentissage » popularisés par Stanislas Dehaene. Non pas pour les réciter comme un catéchisme, mais pour les éprouver au contact d'une classe réelle, avec ses bruits, ses résistances et ses surprises. La vidéo de départ n'est pas traitée ici comme un texte à résumer. Elle sert de tremplin : à partir de son intuition centrale, l'analyse dialogue avec les neurosciences cognitives, la psychologie de l'apprentissage, les sciences de l'éducation et les recherches sur la mémoire. L'idée défendue paraît simple, mais elle ne devient vraiment intéressante qu'à condition d'être nuancée. L'attention, l'engagement actif, le feedback lié à l'erreur et la consolidation ne sont pas quatre conseils posés côte à côte : ils fonctionnent comme un équilibre. Quand l'un est bien pensé, il soutient les autres. Quand il est négligé, c'est tout l'apprentissage qui vacille. L'attention aide l'élève à repérer ce qui compte. L'engagement actif l'amène à essayer, à anticiper, à vérifier ses propres hypothèses. L'erreur, accompagnée d'un retour clair, cesse d'être un échec pour devenir une information exploitable. La consolidation, enfin, donne aux apprentissages le temps de s'enraciner, grâce au sommeil, à l'espacement et à l'automatisation progressive. Le cœur de l'article tient dans cette idée, moins évidente qu'elle n'en a l'air : la force du modèle ne vient pas seulement de sa simplicité, mais de la manière dont cette simplicité peut être patiemment travaillée, discutée et traduite en gestes pédagogiques concrets. Réduits à des slogans, les quatre piliers risquent de produire des prescriptions hâtives, voire de nourrir certains neuromythes. Replacés dans une lecture prudente des recherches, ils deviennent au contraire une grille d'analyse solide pour penser l'enseignement, l'évaluation formative, la différenciation et le temps long des apprentissages. À travers une revue narrative de travaux classiques et contemporains, l'article examine ce que ce modèle apporte, ce qu'il ne dit pas, et les conditions dans lesquelles il peut réellement aider les enseignants. L'hypothèse générale est la suivante : ces quatre piliers gagnent à être compris comme une écologie de l'apprentissage. Apprendre, ce n'est pas seulement recevoir une information — c'est orienter son attention, agir, se tromper dans un cadre suffisamment sécurisant, puis stabiliser peu à peu des connaissances que l'on pourra réutiliser.

Mots-clés : Apprentissage ; attention ; engagement actif ; feedback ; erreur ; consolidation ; sommeil ; neurosciences cognitives ; pédagogie ; mémoire

Abstract: This article offers a critical analysis of the four pillars of learning popularized by Stanislas Dehaene: attention, active engagement, error-related feedback and consolidation. Rather than treating this model as a ready-made pedagogical recipe, it examines its scientific foundations and its translation into classroom practice. Drawing on cognitive neuroscience, psychology of learning, educational research and memory studies, the article argues that the four pillars operate as an interdependent ecology: attention selects relevant information, active engagement turns learners into agents of prediction, feedback transforms errors into usable information, and consolidation stabilizes knowledge through sleep, spacing, retrieval and progressive automatization. The analysis also discusses the limits of neuroeducational simplifications, the risk of neuromyths and the need to articulate cognitive principles with didactics, assessment, differentiation and educational equity.

Keywords: learning; attention; active engagement; feedback; error; consolidation; sleep; cognitive neuroscience; pedagogy; memory

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.20677800>

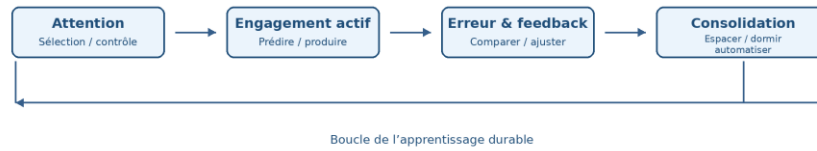


Figure 1. Les quatre piliers comme boucle dynamique de l'apprentissage.

Note méthodologique : ce texte n'est pas une transcription de la vidéo. Il en reprend le fil directeur pour proposer une reconstruction académique et un approfondissement scientifique, à partir de travaux de référence en neurosciences cognitives, en psychologie de l'apprentissage et en sciences de l'éducation.

Tableau 1. Synthèse des quatre piliers.

Pilier	Description
Attention	Sélectionner les informations pertinentes, contrôler son activité mentale et inhiber les distracteurs. Concrètement : rendre visibles les indices utiles, hiérarchiser les consignes et éviter les doubles tâches qui surchargent le traitement cognitif.
Engagement actif	Produire des réponses, faire des prédictions, explorer dans un cadre guidé. Faire expliquer, anticiper, récupérer en mémoire, comparer, résoudre et s'auto-évaluer, pour que l'élève ne reste pas simple spectateur.
Erreur et feedback	Utiliser l'erreur comme signal de mise à jour plutôt que comme faute définitive. Cela suppose des quiz fréquents, des corrections commentées, des critères explicites et des retours suffisamment proches de l'action.
Consolidation	Stabiliser les apprentissages par le sommeil, l'espacement, la récupération active et l'automatisation. Cela demande des révisions programmées, des reprises régulières et une progression spiralaire.

1 Introduction

La formule des « quatre piliers de l'apprentissage » s'est imposée dans les discours éducatifs parce qu'elle possède une qualité rare : elle se retient vite, mais elle oblige, si on la prend au sérieux, à ouvrir des questions beaucoup plus profondes. Dans la vidéo qui sert de point de départ à cette étude, Dehaene présente l'apprentissage comme dépendant de quatre conditions majeures : l'attention, l'engagement actif, le retour d'information et la consolidation. Cette synthèse s'inscrit dans un effort plus large visant à rapprocher sciences du cerveau, psychologie cognitive et pratiques éducatives (Dehaene, 2018 ; 2021).

Pour les enseignants, l'intérêt est immédiat : aider les élèves à se concentrer sur l'essentiel, les faire réfléchir activement, leur donner des retours qu'ils peuvent utiliser, organiser la reprise des connaissances dans le temps. Pour la recherche, l'enjeu n'est pas moindre, car le modèle oblige à relier des domaines souvent étudiés séparément : attention, mémoire, feedback, autorégulation, sommeil, motivation et transfert.

Il reste qu'une idée qui circule beaucoup finit presque toujours par devenir vulnérable. À force d'être répétée, elle risque d'être réduite à quelques mots simples, puis utilisée comme une recette, alors que les recherches montrent des effets réels mais toujours situés — dépendants de l'âge des élèves, du contenu enseigné, du niveau d'expertise, du climat de classe et des objectifs de transfert.

La position adoptée ici est donc volontairement nuancée. La vidéo sert de porte d'entrée, mais ne suffit pas à elle seule. L'objectif est de retrouver le cadre scientifique qui soutient la proposition, d'en préciser la cohérence et d'en discuter les usages. La question directrice peut se formuler ainsi : jusqu'où les quatre piliers permettent-ils de comprendre l'apprentissage humain, sans le simplifier abusivement ?

Le texte se déploie en seize étapes. Il replace d'abord la vidéo dans le parcours intellectuel de Dehaene, puis examine les quatre piliers un à un. Il montre ensuite qu'ils fonctionnent comme une boucle dynamique plutôt que comme des éléments séparés.

Les dernières parties abordent les implications pédagogiques, la différenciation et plusieurs points de vigilance : les neuromythes, le passage du laboratoire à la classe et l'équilibre entre activité de l'élève et guidage enseignant.

2 De la vidéo de vulgarisation au cadre théorique de référence

La vidéo qui motive cette étude relève d'une vulgarisation exigeante : elle cherche à rendre accessibles des résultats scientifiques sans les enfermer dans un langage de spécialiste. Dans ses cours au Collège de France, Dehaene présente quatre facteurs décisifs pour les apprentissages scolaires : l'attention, l'engagement actif, le retour rapide d'information et la consolidation quotidienne. Il ne s'agit pas de quatre recettes, mais de quatre conditions qui influencent la qualité de l'apprentissage.

Cette proposition prend tout son sens lorsqu'on la replace dans l'œuvre de Dehaene. Ses travaux sur la lecture, le calcul, la conscience et le recyclage neuronal défendent une idée constante : l'école s'appuie sur des architectures cérébrales déjà présentes, qu'elle réoriente, spécialise et automatise progressivement. Autrement dit, l'éducation ne part jamais de rien. Elle travaille avec des contraintes biologiques, attentionnelles et mnésiques, auxquelles elle donne une forme culturelle.

Méthodologiquement, ce texte relève d'une revue théorique à visée intégrative. La vidéo sert d'ancrage, puis l'analyse s'élargit aux recherches sur l'attention, le contrôle exécutif, l'apprentissage actif, la curiosité, le testing effect, les « désirable difficultés », l'erreur, le feedback, l'espacement et le sommeil. Le choix a été fait de privilégier des travaux fondateurs, des revues de synthèse et quelques résultats récents particulièrement structurants.

Cette précaution n'est pas un luxe : une vidéo de vulgarisation, même très claire, ne peut pas fonder à elle seule un article scientifique. Elle peut en revanche ouvrir une bonne question — et c'est précisément le rôle qu'elle joue ici : partir d'une formule limpide pour retrouver la complexité des mécanismes qu'elle résume.

L'intérêt académique est double. Il permet d'abord d'évaluer la solidité d'un schéma très présent dans les discours éducatifs. Il montre ensuite ce que peut être une traduction rigoureuse entre sciences cognitives et pédagogie : ni réduction de la classe au cerveau, ni rejet des apports scientifiques, mais mise en relation prudente de plusieurs niveaux d'analyse.

3 Une architecture générale de l'apprentissage : focaliser, agir, ajuster, stabiliser

Pris ensemble, les quatre piliers racontent moins une recette qu'un mouvement. Pour apprendre, il faut d'abord isoler l'information pertinente dans un environnement souvent saturé de signaux. Il faut ensuite agir sur cette information : formuler une hypothèse, essayer, répondre, explorer ou anticiper. Cette activité fait apparaître des écarts entre ce qui était attendu et ce qui est observé. Ces écarts deviennent des erreurs, des surprises ou des signaux de feedback. Enfin, pour que l'apprentissage dure, il doit être repris, réorganisé et intégré à des connaissances plus stables.

On peut résumer cette dynamique en quatre verbes — focaliser, agir, ajuster, stabiliser. Mais cette reformulation rappelle surtout qu'il s'agit de processus articulés, et non de qualités abstraites : l'attention n'est pas seulement le fait d'être calme, l'engagement actif ne se réduit pas à la participation visible, le feedback n'est pas une simple correction, et la consolidation ne correspond pas à un repos passif.

Cette architecture rejoint plusieurs modèles contemporains de la cognition. Elle s'accorde avec l'idée d'un cerveau prédictif, qui anticipe et ajuste ses modèles internes à partir des écarts de prédiction. Elle rejoint les modèles de l'autorégulation, dans lesquels apprendre suppose de se fixer des buts, de surveiller sa performance, d'interpréter les retours et de modifier sa stratégie (Butler & Winne, 1995 ; Panadero, 2017). Elle est enfin cohérente avec les recherches sur la mémoire, qui montrent l'importance du sommeil, de la reprise et de la distribution dans le temps (Cepeda et al., 2006 ; Diekelmann & Born, 2010).

Ramenée dans la classe, cette lecture déplace le regard. Une bonne séance n'est pas seulement celle où le savoir est bien expliqué. C'est celle où l'élève sait vers quoi regarder, quoi faire avec l'information reçue, comment comprendre ses erreurs et quand reprendre ce qui a été appris. L'enseignement devient alors moins une simple exposition du contenu qu'une organisation des conditions qui rendent l'apprentissage possible.

4 Premier pilier : l'attention, condition de l'encodage et du contrôle cognitif

L'attention occupe la place de départ, car aucun apprentissage ne peut vraiment s'installer si l'information pertinente n'a pas été sélectionnée. Les travaux de Posner et Petersen ont montré que l'attention ne renvoie pas à une seule faculté, mais à plusieurs réseaux : l'alerte, qui règle l'état de vigilance ; l'orientation, qui dirige les ressources vers une source d'information ; et le contrôle exécutif, qui aide à arbitrer entre des réponses concurrentes (Posner & Petersen, 1990 ; Petersen & Posner, 2012 ; Fan et al., 2002). Cette distinction, d'abord théorique, devient très utile pour l'école : être attentif ne veut pas simplement dire rester silencieux ou regarder le professeur.

Dans une classe, l'attention joue d'abord le rôle d'un filtre. L'élève reçoit en même temps la voix de l'enseignant, les consignes écrites, les gestes, les affichages, le bruit de fond, les échanges entre pairs et parfois les sollicitations numériques. Apprendre

suppose de savoir quels signaux garder et lesquels laisser de côté. Les travaux sur la cécité attentionnelle le montrent bien : lorsqu'une tâche absorbe l'attention, on peut manquer un événement pourtant visible (Simons & Chabris, 1999). En pédagogie, cela invite à la prudence : ajouter des éléments « attractifs » ne rend pas toujours une activité plus efficace.

Cela aide à distinguer deux difficultés souvent confondues. Dans un premier cas, l'élève a bien traité l'information, mais il ne parvient pas à en organiser le sens. Dans un second cas, plus discret, il n'est pas vraiment entré dans la tâche : son attention n'a pas été orientée vers les bons indices. L'échec ne vient alors pas d'un manque d'intelligence, mais d'un accès insuffisant aux bonnes représentations au bon moment.

Le contrôle exécutif, troisième composante des réseaux attentionnels, joue un rôle particulièrement important dans les apprentissages complexes. Apprendre à lire, résoudre un problème mathématique, rédiger un texte ou comprendre un raisonnement exigent souvent d'inhiber des réponses intuitives mais inadéquates, de maintenir un but en mémoire de travail et d'alterner entre plusieurs opérations. Les fonctions exécutives — inhibition, flexibilité, mise à jour — apparaissent comme des prédicteurs robustes de la réussite scolaire. Dehaene insiste à juste titre sur cette dimension : l'attention n'est pas un prérequis périphérique, elle participe à la structuration même des stratégies d'apprentissage.

Il faut néanmoins éviter un glissement fréquent : faire de l'attention une affaire de discipline pure. Dire qu'elle est centrale ne veut pas dire qu'elle s'obtient seulement par injonction. Elle dépend aussi de la clarté du but, de la qualité du signal, de la charge cognitive, de la durée de la tâche et de la manière dont l'enseignant découpe les étapes. Une consigne courte, hiérarchisée et visible peut parfois soutenir davantage l'attention qu'un long rappel à l'ordre.

L'attention possède aussi une dimension sociale qu'on oublie trop souvent. Les travaux sur la « pédagogie naturelle » montrent que les indices ostensifs d'une situation d'enseignement — regard, prosodie, adresse directe, synchronisation avec l'adulte — modulent puissamment l'orientation de l'attention et la disposition à interpréter l'information comme généralisable (Csibra & Gergely, 2009 ; 2011). Apprendre n'est pas seulement affaire d'objets cognitifs. C'est aussi affaire de relation pédagogique. La qualité de présence de l'enseignant, sa capacité à indiquer ce qui compte et à installer une attention partagée forment déjà des facteurs d'apprentissage.

5 Deuxième pilier : l'engagement actif, ou l'apprenant comme agent de prédiction

Le deuxième pilier s'oppose à une idée encore très présente : l'élève apprendrait principalement parce qu'un contenu lui est correctement exposé. Dans la perspective de Dehaene, apprendre durablement suppose au contraire de faire quelque chose avec l'information — anticiper, essayer, produire une réponse, tester une hypothèse, corriger une stratégie.

La méta-analyse de Freeman et al. (2014) le confirme à grande échelle : dans l'enseignement supérieur, les dispositifs d'apprentissage actif améliorent en moyenne les résultats aux examens et réduisent les taux d'échec par rapport à un enseignement strictement magistral. L'essentiel n'est pas de faire bouger les élèves pour les faire bouger, mais de les amener à manipuler intellectuellement l'information : expliquer, comparer, répondre, résoudre, argumenter.

La psychologie cognitive a aussi montré que produire une réponse, même imparfaite, favorise souvent davantage l'apprentissage que l'étude répétée d'un matériau déjà organisé. Les travaux sur le testing effect indiquent que récupérer activement une information en mémoire — par rappel libre, questions à réponse courte, quiz, auto-interrogation — améliore la rétention ultérieure bien plus que la simple relecture (Roediger & Karpicke, 2006a ; 2006b). L'apprenant progresse parce qu'il tente quelque chose, pas seulement parce qu'il s'expose à un contenu.

La curiosité joue ici un rôle important. Une situation devient vraiment apprenante lorsqu'elle crée un écart entre ce que l'élève croit savoir et ce qu'il découvre devoir comprendre. Un bon enseignement ne donne pas seulement des réponses : il organise aussi des questions, des attentes et des zones de recherche suffisamment cadrées pour que l'élève ait une raison cognitive d'entrer dans la tâche.

Les travaux de Bjork sur les « desirable difficulties » vont plus loin. Certaines difficultés apparentes — rappel différé, variation des contextes, entrelacement des exercices, génération préalable d'une réponse — peuvent ralentir la performance immédiate tout en améliorant la solidité et le transfert des apprentissages à long terme (Bjork & Bjork, 2020). L'engagement actif n'est donc pas synonyme de fluidité. Un dispositif peut sembler plus difficile, plus lent, voire plus frustrant, tout en étant cognitivement meilleur parce qu'il oblige l'apprenant à discriminer, récupérer, comparer et reconstruire.

Une nuance essentielle toutefois. Défendre l'engagement actif ne revient pas à défendre des pédagogies sans guidage. Kirschner, Sweller et Clark (2006) rappellent qu'une découverte trop peu structurée peut surcharger la mémoire de travail, surtout chez les novices. Cette critique ne contredit pas le deuxième pilier : elle l'oblige à être plus précis. L'élève doit être actif, mais dans un cadre lisible, avec des buts clairs, des ressources adaptées et des retours suffisants.

À l'échelle concrète de la classe, les tâches les plus fécondes combinent initiative de l'élève et forte lisibilité pédagogique : prédire avant d'observer, choisir entre plusieurs stratégies, expliquer son raisonnement, se tester régulièrement, comparer des

erreurs fréquentes, résoudre un problème avec un étayage progressif ou reformuler une idée dans ses propres mots. L'activité n'est pas un décor de séance : elle est le lieu même où l'apprentissage se construit.

6 Troisième pilier : l'erreur et le feedback comme moteurs de mise à jour

Le troisième pilier touche à une représentation très profonde de l'école. Dans l'imaginaire scolaire traditionnel, l'erreur est souvent vécue comme une faute, un signe d'insuffisance ou un risque à éviter. Dans une perspective d'apprentissage, elle change de statut : elle devient une information. Elle indique qu'une hypothèse, une stratégie ou une représentation ne fonctionne pas encore, et qu'un ajustement est possible.

Les modèles d'apprentissage fondés sur l'erreur de prédiction éclairent bien ce mécanisme. L'organisme compare ce qu'il attend à ce qui survient réellement ; l'écart sert de signal d'ajustement. Les travaux de Schultz, Dayan et Montague (1997) ont montré que le cerveau code précisément ce type d'écart entre attente et résultat (Schultz et al., 1997 ; Schultz, 2016). L'école ne se limite évidemment pas à l'apprentissage par récompense, mais le principe général reste opérant : sans surprise informative, la mise à jour des représentations reste faible.

C'est le feedback qui transforme l'erreur en occasion d'apprendre. Encore faut-il qu'il ne se limite pas à dire « bon » ou « faux ». Un feedback utile aide l'élève à comprendre où il en est, ce qui est attendu et ce qu'il peut faire pour réduire l'écart. Hattie et Timperley (2007) résument cette logique autour de trois questions : où vais-je ? Comment suis-je en train d'avancer ? Quelle est la prochaine étape ?

Butler et Winne (1995) montrent que le feedback est constitutif de l'activité d'apprentissage elle-même. L'élève s'autorégule lorsqu'il interprète les résultats de son action, ajuste son effort, change de stratégie ou reconfigure sa compréhension de la tâche. Le meilleur feedback n'est donc pas toujours le plus long ni le plus évaluatif : c'est celui qui augmente la capacité de l'élève à se corriger lui-même. Les recherches récentes confirment d'ailleurs que ses effets dépendent fortement de sa nature, de son timing, du niveau des apprenants et du type de tâche (Wisniewski et al., 2020).

Plusieurs conséquences pratiques en découlent. Un feedback arrive utilement lorsqu'il reste proche de l'action ; trop tard, il devient souvent un simple verdict. Il gagne à porter sur la tâche, la stratégie ou les critères de réussite plutôt que sur la valeur globale de l'élève. Dire à un élève qu'il est « brillant » ou « faible » l'aide rarement à savoir quoi modifier. Lui montrer l'étape à retravailler est beaucoup plus formateur.

Le rapport à l'erreur s'en trouve profondément déplacé. Il ne s'agit pas de laisser les élèves se tromper indéfiniment, ni de célébrer toute erreur en elle-même. Il s'agit de la rendre visible, analysable et révisable. Cela suppose un climat de sécurité cognitive : si l'erreur expose à la honte, l'élève évitera de prendre le risque d'essayer ; si elle est traitée comme une information sur la compréhension en cours, elle peut devenir un levier de progrès.

Il reste à distinguer entre « bonne » et « mauvaise » erreur. Une erreur utile est située dans la zone de développement de l'élève : elle révèle une hypothèse plausible mais incomplète, ou une stratégie partiellement efficace. Une erreur totalement opaque, produite dans une tâche trop difficile ou sans repères suffisants, risque d'engendrer confusion et découragement. Le troisième pilier, comme le second, présuppose une ingénierie fine de la difficulté.

Dans le quotidien de la classe, ce pilier conduit à privilégier les quiz fréquents à faible enjeu, les exercices autocorrectifs, les brouillons annotés, les erreurs typiques commentées, les comparaisons de procédures et l'évaluation formative continue. Le message, au fond, est moins banal qu'il n'en a l'air : on n'apprend pas parce qu'on ne se trompe jamais ; on apprend parce qu'on peut comprendre ses erreurs et les retravailler.

7 Quatrième pilier : consolidation, sommeil, espacement et automatisation

Le quatrième pilier rappelle une chose souvent oubliée : apprendre a besoin de durée. Même lorsque l'élève a été attentif, actif et correctement accompagné dans ses erreurs, l'acquisition reste fragile si elle n'est pas reprise. Consolider, c'est permettre à une trace récente de devenir plus stable, plus accessible et mieux reliée à ce que l'on sait déjà.

Les recherches sur le sommeil ont profondément renouvelé cette question. Une littérature abondante montre que le sommeil favorise la consolidation de différentes formes de mémoire, en particulier lorsque les apprentissages récents doivent être stabilisés, réorganisés ou rendus disponibles pour de nouveaux apprentissages (Walker & Stickgold, 2006 ; Diekelmann & Born, 2010 ; Rasch & Born, 2013). Le modèle de l'active system consolidation soutient que certaines oscillations cérébrales pendant le sommeil lent facilitent la réactivation et la redistribution de traces mnésiques initialement dépendantes de l'hippocampe vers des réseaux néocorticaux plus durables.

Transposés au champ éducatif, ces travaux ont deux implications fortes. D'abord, apprendre plus ne signifie pas simplement s'exposer plus longtemps au même contenu dans une même séance. Ensuite, le calendrier compte. Dormir après avoir appris, revoir une notion plus tard, réactiver une connaissance à distance : tout cela fait partie de l'apprentissage, même si cela se voit moins qu'une explication magistrale ou qu'un exercice réussi sur le moment.

La consolidation ne dépend cependant pas du seul sommeil. Les travaux sur la pratique distribuée montrent de façon très robuste que l'espace des reprises améliore la rétention à long terme par rapport à la répétition massée (Cepeda et al., 2006). Revoir une notion plusieurs fois, à des intervalles suffisamment espacés, produit des effets supérieurs à une seule séance intensive, même réussie sur le moment. La performance immédiate n'est donc pas un bon indicateur de durabilité.

À cette logique de l'espace s'ajoute celle de la récupération. Les recherches de Dunlosky et al. (2013) classent la pratique de rappel et la distribution des apprentissages parmi les techniques les plus efficaces et les plus transférables pour améliorer l'étude autonome. La récupération n'est pas seulement un mode d'engagement actif — elle est aussi un mécanisme de consolidation. Se souvenir renforce la mémoire du souvenir lui-même. Une pédagogie de la consolidation doit donc intégrer des retours fréquents sur les acquis antérieurs, plutôt que d'enchaîner linéairement des contenus nouveaux.

Il reste à mentionner l'automatisation. Consolider ne signifie pas seulement retenir plus longtemps ; cela signifie aussi rendre certaines procédures plus fluides, moins coûteuses en attention et plus disponibles pour des tâches complexes. L'apprentissage de la lecture, du calcul ou de l'orthographe l'illustre bien : lorsque des opérations de bas niveau deviennent automatisées, elles libèrent des ressources exécutives pour la compréhension, le raisonnement ou la résolution de problèmes. La consolidation produit donc non seulement de la stabilité, mais de la disponibilité.

Les implications pédagogiques sont nettes : prévoir des révisions espacées, réactiver régulièrement les notions antérieures, alterner les types d'exercices, préserver le rôle du sommeil et se méfier des illusions de maîtrise créées par la familiarité immédiate. Une notion n'est pas vraiment acquise parce qu'elle a été « vue » ; elle le devient lorsqu'elle a été reprise, rappelée et utilisée dans plusieurs contextes.

8 Les quatre piliers comme boucle dynamique

L'un des contresens les plus tentants consiste à traiter les quatre piliers comme une liste à cocher. Leur intérêt est pourtant ailleurs : ils interagissent. Une attention mal orientée réduit la qualité de l'engagement actif. Un engagement trop faible produit peu d'erreurs vraiment informatives. Un feedback pauvre laisse se consolider des représentations fragiles. Symétriquement, une consolidation solide libère de l'attention pour de nouveaux apprentissages.

On peut donc parler d'une boucle. L'attention donne accès à une représentation de travail ; l'engagement actif produit une réponse ou une anticipation ; le feedback indique ce qui doit être ajusté ; la consolidation stabilise ce qui a été corrigé. Plus tard, cette connaissance consolidée servira de base à de nouvelles focalisations attentionnelles et à de nouvelles hypothèses.

Cette lecture systémique évite plusieurs pièges. Un cours très interactif mais mal structuré peut produire beaucoup d'activité et peu d'apprentissage. Un cours très clair mais sans reprise ultérieure peut donner une impression de compréhension qui disparaît vite. Un feedback trop abondant peut même devenir contre-productif s'il empêche l'élève d'apprendre à se corriger lui-même. Les piliers ne valent que par leur articulation.

Cette approche conduit aussi à penser l'apprentissage en termes de scénarisation. Une séance efficace n'active pas les quatre piliers dans un ordre rigide, mais elle ménage des moments où chacun joue un rôle identifiable. Une entrée de séance peut viser la focalisation attentionnelle et la réactivation d'acquis antérieurs ; un cœur de séance peut organiser la prédiction, la résolution et l'explicitation ; une phase intermédiaire peut distribuer du feedback ; un travail ultérieur peut assurer la consolidation par rappel espacé. Les piliers deviennent des fonctions de conception pédagogique.

L'approche systémique invite aussi à sortir d'une opposition stérile entre neurosciences et didactiques. Les quatre piliers ne disent pas comment enseigner chaque contenu particulier, mais ils éclairent les conditions générales dans lesquelles une situation didactique a plus ou moins de chances de produire un apprentissage durable. Ils ne remplacent ni l'analyse du savoir ni l'expertise disciplinaire ; ils apportent un niveau supplémentaire de compréhension sur la manière dont les apprenants traitent, modifient et stabilisent l'information.

9 Conséquences pour la conception pédagogique et l'ingénierie de classe

Prendre les quatre piliers au sérieux modifie la manière de préparer une séquence. On ne se demande plus seulement « Quel contenu vais-je exposer ? », mais aussi « Où l'attention des élèves doit-elle se porter ? Quelle activité intellectuelle vont-ils produire ? Quel retour recevront-ils ? Quand et comment ce savoir sera-t-il repris ? » Cette série de questions rapproche la préparation de cours d'une véritable ingénierie des conditions d'apprentissage.

Cela ne signifie pas que l'exposé magistral doit disparaître. Il peut être très utile pour cadrer une notion, modéliser un raisonnement ou stabiliser une synthèse. Mais il gagne à être ponctué de questions, de rappels, de prédictions, de comparaisons ou de courtes auto-explications. Une activité dite « active » n'a de valeur que si elle produit une vraie activité mentale, et pas seulement une impression de participation.

L'évaluation change aussi de statut. Elle n'est plus seulement le moment où l'on mesure un résultat ; elle devient un outil de guidage. Les quiz à faible enjeu, les exercices réguliers, les vérifications de compréhension et les erreurs commentées permettent de faire apparaître ce que les élèves ont réellement compris, puis de nourrir la suite de l'enseignement.

La planification temporelle doit elle aussi être repensée. Une progression uniquement linéaire, dans laquelle chaque notion est traitée une fois puis abandonnée, est en tension directe avec le quatrième pilier. Il devient préférable d'adopter des progressions spirales, avec retours programmés, réactivations régulières et entrelacement raisonné des savoirs.

La formation des enseignants peut tirer profit de cette grille. Elle permet de penser conjointement des gestes professionnels souvent abordés séparément : donner une consigne, capter l'attention, questionner la classe, commenter une erreur, organiser les devoirs, programmer les révisions, gérer le rythme d'une séance. Le mérite du modèle tient à cette transversalité. Il ne dicte pas une méthode unique ; il fournit des principes de design transférables à des contextes pédagogiques variés.

10 Différenciation, développement et équité : pour qui les piliers fonctionnent-ils ?

Une théorie générale de l'apprentissage n'a de valeur éducative que si elle aide à penser la diversité réelle des élèves. Or les quatre piliers ne fonctionnent pas de manière identique à tous les âges, ni avec tous les niveaux d'expertise.

Le niveau de connaissances antérieures est une variable décisive. Un novice a besoin d'une attention fortement guidée, d'une activité ciblée et d'un feedback très fréquent ; un apprenant avancé peut tolérer davantage d'exploration autonome et bénéficier d'erreurs plus complexes. L'engagement actif doit donc être différencié : la même tâche ouverte peut stimuler un élève expert et désorienter un novice. De même, la consolidation ne prendra pas la même forme selon que l'on cherche à automatiser une procédure de base ou à favoriser le transfert d'un concept abstrait.

Les enjeux d'équité sont majeurs. Certains élèves disposent moins que d'autres des codes implicites de l'école : savoir écouter une consigne longue, organiser son travail à la maison, dormir dans de bonnes conditions, réviser efficacement, comprendre ce qui est attendu sans que cela soit dit. Les quatre piliers ne doivent pas servir à renvoyer l'échec à l'élève. Ils invitent au contraire à rendre l'environnement scolaire plus explicite, plus structuré et plus juste.

L'attention aux différences ne doit pas non plus conduire au psychologisme excessif. Les catégories scolaires comme « manque d'attention », « manque de motivation » ou « manque de mémoire » résument souvent de manière imprécise des difficultés qui relèvent d'une conception inadéquate des tâches. Une activité trop longue, trop dense ou insuffisamment consolidée peut produire l'apparence d'un déficit individuel. Le modèle permet ici un déplacement utile : au lieu de pathologiser trop vite l'élève, il interroge la qualité du milieu d'apprentissage.

11 Limites, controverses et précautions d'usage

Si utile qu'elle puisse être, la théorie des quatre piliers ne doit pas devenir une doctrine. Sa première limite tient au passage du laboratoire à la classe. Beaucoup de résultats mobilisés proviennent de tâches contrôlées, brèves, conçues pour isoler un mécanisme. Une salle de classe, au contraire, est un milieu dense : les objectifs y sont multiples, les interactions constantes, les contenus culturellement situés et les apprentissages étalés dans le temps.

La deuxième limite concerne les neuromythes. Dès qu'un discours sur le cerveau entre dans le monde scolaire, il peut être simplifié, commercialisé ou transformé en promesse trop séduisante. Les travaux de Howard-Jones (2014) et de Dekker et al. (2012) ont montré que ces croyances restent fréquentes. Les quatre piliers n'échappent pas automatiquement à ce risque : mal utilisés, ils peuvent devenir des étiquettes ; bien compris, ils restent des concepts à manier avec prudence.

Une troisième controverse concerne l'engagement actif. La littérature en sa faveur est robuste, mais elle ne doit pas être assimilée à une apologie de la découverte sans guidage. La charge cognitive impose des limites fortes, surtout pour les novices. Comme le rappellent Kirschner, Sweller et Clark (2006), l'activité n'est bénéfique que lorsqu'elle est suffisamment contrainte pour éviter le bruit cognitif inutile.

Il convient aussi de souligner que les piliers décrivent des conditions générales de l'apprentissage, mais non la spécificité des savoirs. Apprendre à décoder, à démontrer, à rédiger, à interpréter un texte littéraire ou à modéliser un phénomène physique n'engage pas exactement les mêmes formes d'attention, d'activité, d'erreur et de consolidation. Les didactiques disciplinaires rappellent à juste titre que la nature de l'objet de savoir modifie la structure de la tâche.

Enfin, la théorie ne suffit pas à résoudre la question des finalités éducatives. Optimiser l'apprentissage n'indique pas ce qu'il faut apprendre, ni dans quel horizon culturel, civique ou éthique. Une école pourrait, en principe, mobiliser très efficacement les quatre piliers au service d'objectifs étroits ou contestables. Un cadre neurocognitif doit toujours être articulé à une réflexion plus large sur les finalités de l'éducation. Les sciences cognitives peuvent informer les conditions d'efficacité ; elles ne déterminent pas à elles seules la valeur des contenus et des fins.

12 Discussion : vers une écologie de l'apprentissage

Une fois ces réserves posées, la thèse des quatre piliers garde une vraie force. Elle oblige à penser l'apprentissage comme un processus à plusieurs niveaux : sélectionner l'information, agir sur elle, interpréter les erreurs, stabiliser les acquis et organiser un environnement pédagogique capable de soutenir ces opérations. Peu de modèles de vulgarisation conservent, dans une formule aussi simple, une telle densité.

On peut comprendre les quatre piliers comme une écologie de l'apprentissage. Le mot « écologie » rappelle que l'apprentissage naît d'une relation entre un apprenant et un milieu : un milieu plus ou moins lisible, actif, informatif, favorable à la reprise. Cette idée évite deux erreurs opposées : tout attribuer à l'élève, ou tout attribuer à la méthode.

Cette perspective invite aussi à redéfinir la réussite. Réussir du premier coup n'est pas toujours le signe d'un apprentissage solide. Un élève peut réussir par imitation, par indice superficiel ou par mémoire de court terme. Symétriquement, un élève qui hésite, se trompe, corrige puis réussit plus tard peut être en train de construire un apprentissage beaucoup plus robuste.

Les quatre piliers conduisent aussi à mieux articuler enseignement et étude. L'école ne peut plus être pensée comme le lieu de la compréhension, tandis que la maison serait le lieu de la répétition. Si la consolidation est constitutive de l'apprentissage, alors l'institution doit intégrer explicitement des temps de reprise, d'auto-test et de réactivation, au lieu de déléguer silencieusement cette part essentielle à des inégalités familiales de ressources.

Cette écologie de l'apprentissage suggère enfin un programme de recherche et d'action pour la formation des enseignants. Il ne s'agirait pas de leur demander d'être des neuroscientifiques, mais de leur fournir des principes robustes pour interpréter ce qui se passe quand un élève semble ne pas apprendre. A-t-il traité le bon signal ? A-t-il véritablement produit une activité cognitive ? A-t-il reçu une information exploitable sur ses erreurs ? A-t-il eu l'occasion de reprendre et de consolider ? Ces questions, posées systématiquement, offrent une alternative féconde aux diagnostics flous et aux oppositions idéologiques.

13 Illustrations par scénarios pédagogiques

Pour rendre le modèle plus concret, partons de situations ordinaires. Prenons d'abord une règle de grammaire. Une démarche cohérente avec les quatre piliers pourrait commencer par quelques exemples contrastés, choisis pour faire apparaître les indices importants. Les élèves seraient ensuite invités à formuler une hypothèse, à classer des cas ou à expliquer une différence. Le feedback viendrait clarifier les critères et corriger les erreurs fréquentes. Puis, dans les jours suivants, de courts rappels espacés permettraient d'installer la règle dans la durée.

Dans un problème de mathématiques, la même logique s'applique autrement. Il faut d'abord aider les élèves à repérer les informations utiles, puis les amener à choisir une stratégie, à représenter la situation, à comparer des méthodes. Les erreurs de raisonnement deviennent des indices sur les obstacles rencontrés. Enfin, des problèmes proches mais présentés dans d'autres contextes permettent de consolider la procédure et d'éviter qu'elle reste liée à un seul habillage.

Dans l'apprentissage de la lecture, la question de l'attention est particulièrement décisive. Les recherches mobilisées par Dehaene insistent sur le fait que l'enfant doit apprendre à focaliser son traitement sur les unités pertinentes du code écrit. Une pédagogie cohérente avec les quatre piliers cherchera à rendre saillantes les correspondances graphème-phonème, à faire produire activement des décodages, à fournir des retours rapides sur les erreurs de fusion ou d'identification, puis à consolider par des reprises fréquentes et régulières.

Les environnements numériques offrent un terrain intéressant pour tester les quatre piliers. Ils peuvent amplifier certains leviers — personnalisation du rythme, feedback immédiat, répétition distribuée, visualisation des erreurs — mais aussi créer de nouveaux distracteurs et renforcer des formes d'activité superficielles. Un exercice numérique bien conçu réduit le bruit visuel, suscite l'engagement actif, fournit un retour interprétable et reprogramme des reprises espacées. Un environnement saturé d'animations et de récompenses extrinsèques peut en revanche simuler l'activité sans favoriser l'apprentissage profond.

Les devoirs aussi peuvent être relus à travers cette grille. Des devoirs longs, peu guidés et corrigés trop tard mobilisent faiblement les quatre piliers. Des tâches plus courtes, centrées sur la récupération active, accompagnées de critères explicites et réinvesties au cours suivant, sont beaucoup plus cohérentes avec ce que l'on sait de l'apprentissage.

14 Formation des enseignants, pilotage des établissements et perspectives de recherche

Dans la formation initiale, cette grille peut servir l'analyse de pratiques. Les futurs enseignants peuvent apprendre à relire une séance non seulement en termes de gestion de classe ou de progression disciplinaire, mais aussi en termes de mécanismes cognitifs sollicités. Une vidéo de classe, par exemple, peut être analysée selon quatre axes : quels signaux orientent l'attention ? Quelles actions cognitives les élèves réalisent-ils ? Quel type de retour reçoivent-ils ? Quels dispositifs de reprise sont prévus ?

Au niveau des établissements, le modèle peut guider des choix organisationnels. Les emplois du temps, la place des évaluations, le statut des devoirs, l'articulation entre enseignement présentiel et numérique, ou la politique de soutien aux élèves en difficulté peuvent être pensés en termes de qualité de l'apprentissage plutôt qu'en termes purement administratifs.

Pour la recherche, plusieurs pistes restent ouvertes. Nous disposons de nombreuses données sur chacun des piliers pris séparément, mais moins d'études sur leur combinaison dans des dispositifs complets d'enseignement. Il faudrait aussi mieux comprendre quels élèves bénéficient le plus de tel type de feedback ou de tel rythme d'espacement. La consolidation réelle des apprentissages, au-delà de la réussite immédiate, reste difficile à mesurer en contexte scolaire.

Une autre piste concerne la place du collectif. Les quatre piliers sont souvent formulés dans un langage centré sur l'apprenant individuel, alors que la classe est un espace social. L'attention peut être co-réglée, l'engagement actif médiatisé par les pairs, le feedback distribué dans des interactions horizontales, et la consolidation renforcée par des routines collectives. Les recherches futures gagneraient à articuler davantage la perspective neurocognitive avec les travaux sur l'apprentissage collaboratif et les normes interactionnelles.

Le modèle des quatre piliers ne vaut pas seulement comme résumé de connaissances existantes : il peut jouer le rôle d'un programme de travail. Il invite les chercheurs à mieux connecter mécanismes cognitifs et situations éducatives réelles, et les praticiens à transformer les résultats de recherche en principes de conception plutôt qu'en slogans. C'est peut-être là sa contribution la plus durable.

15 Des résultats expérimentaux aux apprentissages complexes : portée et limites de l'inférence

Une question méthodologique traverse tout l'article : jusqu'où peut-on passer des résultats expérimentaux à des apprentissages complexes, socialement situés et culturellement construits ? Les sciences cognitives ont produit des résultats solides sur l'attention, la récupération active, le feedback et la consolidation. Mais ces résultats portent souvent sur des tâches assez contrôlées. L'école, elle, vise aussi des objets plus épais : comprendre un texte historique, construire une démonstration, interpréter une œuvre, développer une compétence professionnelle ou former un jugement.

Cela ne signifie pas que les quatre piliers perdent leur pertinence à grande échelle. Cela signifie plutôt qu'ils fonctionnent comme des contraintes de fond, dont les effets sont médiatisés par la structure des disciplines, la culture scolaire et les interactions sociales. L'effet bénéfique de la récupération active est bien établi sur des contenus factuels ; mais lorsqu'il s'agit de rédaction argumentative ou de créativité, la récupération doit être pensée autrement — sous forme de mobilisation d'idées, de schémas ou de critères de qualité. De même, l'attention ne s'organise pas de la même manière selon qu'on lit un texte littéraire, qu'on exécute un geste professionnel ou qu'on apprend une langue étrangère.

La difficulté est encore plus nette lorsqu'on s'intéresse au transfert. Beaucoup de recherches évaluent la performance sur des tâches proches de celles qui ont servi à l'apprentissage. Or l'enjeu éducatif est souvent de transférer une connaissance à une situation nouvelle. Les quatre piliers aident indirectement ce transfert, mais aucun, pris isolément, ne le garantit. Le transfert dépend aussi de la capacité à abstraire les invariants, à comparer des cas, à nommer les principes et à désancrer progressivement une procédure de son contexte initial.

Cette discussion rejoint une distinction essentielle : performance et apprentissage ne sont pas toujours la même chose. Dans une tâche simple, réussir immédiatement peut refléter ce qui a été appris. Dans une tâche complexe, c'est plus ambigu. Un élève peut réussir grâce à un guidage très local sans pouvoir réinvestir la même connaissance. Symétriquement, une situation plus difficile sur le moment peut produire un apprentissage plus durable.

Une limite plus discrète concerne les effets cumulatifs. Beaucoup d'études observent un mécanisme sur une courte durée, alors que l'école construit des trajectoires longues. Le feedback le plus utile n'est pas seulement celui qui corrige une erreur aujourd'hui ; c'est celui qui, répété dans le temps, construit chez l'élève des habitudes métacognitives de contrôle. L'espacement n'est pas seulement une technique ponctuelle ; c'est aussi un principe d'organisation curriculaire. L'attention n'est pas seulement une ressource instantanée ; elle peut être éduquée par des routines, des attentes stables et une culture partagée de la concentration.

Les apprentissages complexes mobilisent aussi des dimensions affectives, identitaires et sociales que le modèle ne formalise qu'indirectement. La disponibilité attentionnelle, la prise de risque dans l'erreur, la persévérance dans la consolidation et la qualité de l'engagement actif dépendent fortement du sentiment de compétence, des attentes de l'enseignant, du climat de classe et des normes de participation. La bonne posture consiste sans doute à considérer les quatre piliers comme un noyau fonctionnel, qu'il faut articuler avec des théories motivationnelles, socioculturelles et didactiques.

Un élève apprend ce qu'est une preuve, un commentaire, une traduction, une démarche scientifique ou un exposé oral à travers des pratiques situées, des formats institutionnels et des interactions répétées. Les quatre piliers interviennent dans ce processus, mais ils n'en épuisent pas la richesse. L'inférence légitime consiste à dire non pas que les sciences cognitives prescrivent

directement la pédagogie, mais qu'elles éclairent des conditions générales sans lesquelles aucune pédagogie ne peut durablement réussir.

16 Les quatre piliers au-delà de l'école obligatoire

Le modèle, manié avec prudence, ne concerne pas seulement l'école primaire ou secondaire. Il reste très pertinent dans l'enseignement supérieur, la formation professionnelle et l'auto-apprentissage. Dans ces contextes, les apprenants sont souvent plus autonomes, mais cette autonomie peut masquer des stratégies peu efficaces : relire sans se tester, surligner massivement, réviser à la dernière minute, confondre familiarité et maîtrise.

Dans le supérieur, le premier pilier invite à soigner la conception des supports. Des diapositives trop chargées, des textes non hiérarchisés, des cours en visioconférence sans repères visuels — tout cela peut affaiblir l'encodage avant même que la compréhension ne commence. Fournir de l'information ne suffit pas : il faut aussi organiser son accès.

Le deuxième pilier est tout aussi important. Beaucoup d'étudiants croient apprendre parce qu'ils assistent à un cours ou lisent un document. Or la maîtrise conceptuelle se construit davantage lorsqu'on résume sans support, se teste, compare des cas, reformule une théorie ou résout un problème nouveau.

Le troisième pilier, dans la formation professionnelle, prend une dimension particulièrement concrète. Dans les métiers, l'erreur peut coûter cher, ce qui pousse parfois à la prévenir par un guidage très strict. Pourtant, la compétence experte suppose d'apprendre à diagnostiquer, corriger et anticiper ses erreurs. Les dispositifs de simulation, de debriefing et d'analyse de pratiques sont efficaces lorsqu'ils transforment les écarts observés en objets de réflexion et d'ajustement.

Le quatrième pilier est probablement celui que les apprenants adultes négligent le plus. Beaucoup misent sur des efforts intenses mais concentrés. Or la consolidation a besoin d'un calendrier : réactiver à J+1, J+7, J+21 ; varier les formes de rappel ; revenir sur les acquis dans plusieurs contextes ; préserver le sommeil avant et après les périodes d'apprentissage importantes.

L'auto-apprentissage constitue enfin un terrain privilégié. À l'ère numérique, chacun peut accumuler des vidéos, des cours et des tutoriels. Mais la vraie question est ailleurs : mon environnement m'aide-t-il à rester attentif ? Suis-je en train de produire des réponses ou seulement de consommer du contenu ? Quel retour ai-je sur mes erreurs ? Quand vais-je reprendre ce que j'apprends aujourd'hui ? Ces questions transforment les quatre piliers en outil métacognitif.

On comprend dès lors que la proposition de Dehaene dépasse largement le cadre de la pédagogie scolaire. Elle offre un langage commun pour penser l'apprentissage à travers les âges de la vie. Les contraintes du cerveau apprenant ne disparaissent ni avec l'entrée à l'université ni avec l'expérience professionnelle. Ce qui change, ce sont les objets, les contextes, les degrés d'autonomie et les finalités ; les mécanismes généraux, eux, continuent de jouer.

17 Conclusion

À partir d'une intervention de vulgarisation de Stanislas Dehaene, cet article a montré que les « quatre piliers de l'apprentissage » forment un cadre accessible mais plus riche qu'il n'y paraît. L'attention oriente le traitement de l'information ; l'engagement actif fait de l'élève un producteur d'hypothèses ; l'erreur, lorsqu'elle est accompagnée d'un feedback exploitable, permet de corriger les représentations ; la consolidation inscrit les acquis dans la durée par le sommeil, l'espacement, la récupération et l'automatisation. Ensemble, ces quatre dimensions décrivent le passage d'une simple exposition au savoir à une appropriation durable.

La force du modèle de Dehaene tient moins à l'originalité isolée de chaque pilier qu'à leur articulation. La vidéo a eu le mérite de rendre cette articulation claire et mémorisable. Le travail académique consiste ensuite à en redéployer la complexité, à préciser ses conditions de validité et à en tirer des implications pédagogiques mesurées.

Ainsi compris, les quatre piliers ne sont pas un catéchisme neuroéducatif. Ils invitent à penser l'apprentissage comme un processus à la fois cognitif, temporel, social et pédagogique. Leur intérêt principal est qu'ils déplacent le regard : au lieu de se demander seulement comment transmettre un contenu, on interroge les conditions qui permettent à l'élève de l'apprendre réellement — c'est-à-dire de rendre l'information lisible, d'organiser l'activité intellectuelle, de traiter l'erreur comme une ressource et de prévoir des reprises espacées.

Cette écologie de l'apprentissage suggère un programme de recherche et d'action pour la formation des enseignants. Il ne s'agirait pas de leur demander d'être des neuroscientifiques, mais de leur fournir des principes robustes pour interpréter ce qui se passe lorsqu'un élève semble ne pas apprendre.

Annexe analytique. Grille opérationnelle pour l'observation des situations d'apprentissage

Pour rendre le modèle plus utilisable, on peut le transformer en questions d'observation. Pour l'attention : qu'est-ce qui indique à l'élève ce qui est important ? Quels distracteurs sont présents ? Les consignes sont-elles hiérarchisées ? Pour l'engagement

actif : l'élève reconnaît-il seulement une réponse ou doit-il en produire une ? Doit-il prédire, expliquer, comparer, classer, récupérer en mémoire ? Pour le feedback : à quel moment sait-il si sa réponse est pertinente ? Le retour porte-t-il sur la tâche, la stratégie ou seulement sur une note ? Pour la consolidation : le contenu sera-t-il repris ? À quel intervalle ? Sous quelle forme ?

Cette grille a deux avantages. Elle évite d'abord de transformer les piliers en catégories vagues. Elle permet ensuite d'observer une séquence à plusieurs niveaux : ce que l'enseignant avait prévu, ce que les élèves font réellement et ce qu'ils gardent à distance. En formation, elle aide à comparer des séances très différentes sans les réduire à l'opposition trop simple entre « traditionnel » et « innovant ».

Cette annexe rappelle enfin que les quatre piliers ne parlent pas seulement de l'élève. Ils décrivent aussi la qualité de l'environnement éducatif. Là où l'école échoue, ce n'est pas toujours parce que l'apprenant manque d'attention, d'effort ou de mémoire : c'est parfois parce que l'institution ne lui offre pas un milieu assez lisible, actif, informatif et durable. C'est dans cette perspective que le modèle conserve sa portée critique.

Tableau 2. Grille opérationnelle pour la pratique enseignante.

Moment	Question centrale	Signes observables	Réponse pédagogique
Avant / pendant la tâche	Les élèves traitent-ils le bon signal ?	Identification des informations pertinentes, reformulation de la consigne	Simplifier le support, segmenter la consigne, mettre en évidence les unités critiques
Début / cœur de séance	Les élèves produisent-ils une activité cognitive ?	Prédiction, justification, récupération en mémoire, choix de stratégie	Question de rappel, comparaison, prédiction, explication écrite ou orale
Pendant / juste après l'action	Le retour est-il exploitable ?	L'élève comprend ce qui est juste et ce qu'il peut faire ensuite	Retour sur la procédure, le critère manquant ou l'étape à retravailler

REFERENCES

- [1] Allen, L. R., & Kelly, B. B. (Eds.). (2015). *Transforming the Workforce for Children Birth Through Age 8: a Unifying Foundation*. National Academies Press.
- [2] ApendemosJuntos / BBVA. (2025). V.O. Les quatre piliers de l'apprentissage. Stanislas Dehaene, neuroscientifique [Vidéo]. YouTube.
- [3] Bavelier, D., Green, C. S., Pouget, A., & Schrater, P. (2012). Brain plasticity through the life span: learning to learn and action video games. *Annual Review of Neuroscience*, 35, 391–416.
- [4] Bellhäuser, H., Schmitz, B., & Renkl, A. (2023). Daily automated feedback enhances self-regulated learning. *npj Science of Learning*, 8, Article 24.
- [5] Bjork, R. A., & Bjork, E. L. (2020). Desirable difficulties in theory and practice. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 9(4), 475–479.
- [6] Brown, P. C., Roediger, H. L. III, & McDaniel, M. A. (2014). *Make It Stick: the Science of Successful Learning*. Harvard University Press.
- [7] Butler, D. L., & Winne, P. H. (1995). Feedback and self-regulated learning: a theoretical synthesis. *Review of Educational Research*, 65(3), 245–281.
- [8] Cepeda, N. J., Pashler, H., Vul, E., Wixted, J. T., & Rohrer, D. (2006). Distributed practice in verbal recall tasks: a review and quantitative synthesis. *Psychological Bulletin*, 132(3), 354–380.
- [9] Csibra, G., & Gergely, G. (2009). Natural pedagogy. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(4), 148–153.
- [10] Csibra, G., & Gergely, G. (2011). Natural pedagogy as evolutionary adaptation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 366(1567), 1149–1157.
- [11] Dehaene, S. (2015a). Attention and executive control. Collège de France.
- [12] Dehaene, S. (2015b). Active engagement, curiosity and error correction. Collège de France.
- [13] Dehaene, S. (2015c). Learning consolidation and the importance of sleep. Collège de France.
- [14] Dehaene, S. (2018). *Apprendre ! Les talents du cerveau, le défi des machines*. Odile Jacob.
- [15] Dehaene, S. (2021). *How We Learn: why Brains Learn Better Than Any Machine... for Now*. Penguin.
- [16] Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015). Illiterate to literate: behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(4), 234–244.
- [17] Dekker, S., Lee, N. C., Howard-Jones, P., & Jolles, J. (2012). Neuromyths in education: prevalence and predictors of misconceptions among teachers. *Frontiers in Psychology*, 3, Article 429.
- [18] Dieckmann, S., & Born, J. (2010). The memory function of sleep. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 114–126.

- [19] Dunlosky, J., Rawson, K. A., Marsh, E. J., Nathan, M. J., & Willingham, D. T. (2013). Improving students' learning with effective learning techniques. *Psychological Science in the Public Interest*, 14(1), 4–58.
- [20] Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the efficiency and independence of attentional networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(3), 340–347.
- [21] Fan, J., McCandliss, B. D., Fossella, J., Flombaum, J. I., & Posner, M. I. (2005). The activation of attentional networks. *NeuroImage*, 26(2), 471–479.
- [22] Freeman, S., et al. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *PNAS*, 111(23), 8410–8415.
- [23] Green, C. S., & Bavelier, D. (2012). Learning, attentional control, and action video games. *Current Biology*, 22(6), R197–R206.
- [24] Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The power of feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81–112.
- [25] Howard-Jones, P. A. (2014). Neuroscience and education: myths and messages. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(12), 817–824.
- [26] Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work. *Educational Psychologist*, 41(2), 75–86.
- [27] Panadero, E. (2017). A review of self-regulated learning: six models and four directions for research. *Frontiers in Psychology*, 8, Article 422.
- [28] Paller, K. A., Creery, J. D., & Schechtman, E. (2020). Memory and sleep: how sleep cognition can change the waking mind for the better. *Annual Review of Psychology*, 72, 123–150.
- [29] Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual Review of Neuroscience*, 35, 73–89.
- [30] Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25–42.
- [31] Roediger, H. L. III, & Karpicke, J. D. (2006a). Test-enhanced learning. *Psychological Science*, 17(3), 249–255.
- [32] Roediger, H. L. III, & Karpicke, J. D. (2006b). The power of testing memory. *Perspectives on Psychological Science*, 1(3), 181–210.
- [33] Schultz, W. (2016). Dopamine reward prediction error coding. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 18(1), 23–32.
- [34] Schultz, W., Dayan, P., & Montague, P. R. (1997). A neural substrate of prediction and reward. *Science*, 275(5306), 1593–1599.
- [35] Shonkoff, J. P., & Phillips, D. A. (Eds.). (2000). *From Neurons to Neighborhoods*. National Academies Press.
- [36] Simons, D. J., & Chabris, C. F. (1999). Gorillas in our midst: sustained inattention blindness for dynamic events. *Perception*, 28(9), 1059–1074.
- [37] Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement Learning: an Introduction* (2nd ed.). MIT Press.
- [38] Walker, M. P., & Stickgold, R. (2006). Sleep, memory, and plasticity. *Annual Review of Psychology*, 57, 139–166.
- [39] Wisniewski, B., Zierer, K., & Hattie, J. (2020). The power of feedback revisited. *Frontiers in Psychology*, 10, Article 3087.