

TRAVAUX SUR LE SYSTÈME NERVEUX ET DIDACTIQUE DES MATHÉMATIQUES, LE CAS DU CONCEPT DE « REPRÉSENTATION » ET DE L'ÉNACTION

| MAHEUX* JEAN-FRANÇOIS

Résumé | La recherche en neurologie soulève des questions en éducation. Peut-on mettre au service de notre discipline des travaux en imagerie cérébrale ? J'examine comment la théorie de l'énaction, basée entre autres sur l'étude du système nerveux, informe mon travail en soutenant une déconstruction de concepts/phénomène. Parlant de « représentation », je propose qu'un élément essentiel concerne le positionnement épistémologique.

Mots-clés : enaction, imagerie cérébrale, épistémologie, interdisciplinarité, déconstruction post-moderne

Abstract | Research in neurology raise educational questions. How can we use brain imaging research in our discipline? I examine how the enaction theory, based in part on the study of the nervous system, informs my work by supporting a deconstruction of concepts/phenomena such as that of “representations”. I argue that an essential element concerns the epistemological positioning.

Keywords: Enaction, brain imaging, epistemology, interdisciplinarity, port-modern deconstruction

I. FAIRE DES PONTS ENTRE NEUROSCIENCE ET DIDACTIQUE

Les avancées en neurosciences, notamment en lien avec les mécanismes du système nerveux, suscitent un intérêt grandissant dans divers domaines de l'éducation (Howard-Jones, 2010), y compris à propos de l'apprentissage des mathématiques par exemple (e.g. Dehaene, 2011). De Smedt et al. (2011) offrent une discussion intéressante de la manière dont on souhaiterait que les deux champs s'enrichissent mutuellement, et des difficultés à y parvenir. En 2016, un numéro de la revue ZDM est consacré au thème *Cognitive Neuroscience and Mathematics Learning*, une suite du numéro de 2010 du même titre. Une critique majeure soulevée dans ce numéro est que la vaste majorité des études auxquelles on s'intéresse sont toujours menées sur des adultes, et toujours dans des environnements contrôlés. Les tâches utilisées sont aussi très loin de ce qui est vécu en contexte de classe, ce qui « limite » (le mot est faible) l'applicabilité des observations aux contextes éducatifs. C'est aussi l'objet de la réflexion de Leikin (2018) par exemple, et celle du ICIM Study Group 21 sur le thème *Neuroscience and Mathematics Education/Cognitive Science* (Schwank et Gardes, 2024), qui répète pourtant le souhait qu'une meilleure compréhension des « processus mentaux » par les neurosciences puisse être utilisée « avec succès » pour l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques (p. 415).

Malgré ces prudenances de plusieurs, d'autres affirment haut et fort l'existence d'implications directes de thèses ou d'observations en neuroscience sur le quotidien de l'enseignement, allant jusqu'à parler de « neurodidactique » des sciences ou des mathématiques (e.g. Masson, 2007), s'exposant alors à des critiques aiguës (par exemple celle de Barallobres [2018] par rapport aux travaux de Masson). Naturellement, des questions se posent relativement à la « rigueur » dont il convient de faire preuve quand on fait des parallèles, qu'on tire des conclusions, ou qu'on formule des conseils sur la base de travaux provenant d'une autre discipline. Mais la tension vient aussi en partie de nos ambitions comme

* UQAM / LEAM – Canada – jfmaheux@mail.com

chercheurs. La didactique des mathématiques a toujours eu des préoccupations à l'égard des « retombées pratiques » de ses avancées (e.g., Lunkenbein, 1995 ; Proulx, 2007). On a souligné des limites par rapport à ce que l'on peut dire ou faire (e.g., Kilpatrick, 1981 ; Brousseau, 1994), mais plusieurs travaillent toujours dans l'espoir d'apporter des solutions aux besoins de la pratique. La question des retombées est au cœur de la proposition que je vais développer dans les pages suivantes à l'aide d'un cas : le concept de « représentation » et les travaux autour de ce qu'on appelle l'énaction.

II. LA QUESTION ÉPISTÉMOLOGIQUE

Je voudrais d'une part avancer que la difficulté de joindre neuroscience et didactique des mathématiques n'est un problème que pour certains, et qu'il l'est pour des raisons épistémologiques. L'argument est pour ainsi dire déjà fait. Je l'ai écrit plus haut : une des principales difficultés adressées aux études en neuroscience vis-à-vis de leur apport potentiel pour l'enseignement des mathématiques est dans la distance évidente entre les contextes. La recherche en neuroscience se fait dans des laboratoires, généralement avec des adultes et autour de tâches simples. On a donc un problème de représentativité (de l'étude, de ses résultats). Même chose si on situe plutôt la limite sur le terrain instrumental. En effet, une seconde difficulté fort importante à formuler concerne la manière dont les résultats d'études neuroscientifiques sont le fruit d'un filtrage énorme au niveau de l'information captée par les instruments. Ce filtrage donne une dimension arbitraire et implique d'inévitables biais qui donnent des raisons de douter de la signification et de l'exemplarité de ce qui est mesuré. Est-ce que telle microvariation de signal sur telle microfréquence de telle microzone du système nerveux est un bon signal de ce qui intéresse le chercheur ? Est-ce représentatif de ce qui se passe ? Même du point de vue des neurosciences, ces questions se posent, et font partie de limites évidentes, pour les collègues neuroscientifiques, des études réalisées. Il n'est pas évident, cependant, que ces nuances se traduisent et sont considérées quand les champs se croisent.

Le problème de la représentativité est une question épistémologique, car elle interroge la validité des connaissances que l'on tire d'un échantillon ou d'une expérience pour généraliser à un ensemble plus large. Le souci de représentativité s'inscrit dans une perspective épistémologique qui se préoccupe de la portée des conclusions que l'on peut tirer à partir de situations particulières. En effet, lorsqu'il s'agit de produire des connaissances générales à partir de cas spécifiques, la question se pose de savoir dans quelle mesure ces situations, échantillons ou contextes étudiés sont représentatifs d'une réalité plus large. L'enjeu central réside dans l'équilibre entre la fidélité des observations faites en contexte et la tentation d'en faire des généralisations.

En sciences humaines et sociales, mais également en didactique des mathématiques, cette problématique se manifeste dans les tentatives d'extrapoler les résultats de recherches sur des groupes ou des contextes restreints à des pratiques pédagogiques plus universelles. De telles généralisations reposent cependant sur la conception que l'on se fait de la réalité ou de la vérité. En cherchant à établir des résultats généralisables, on présuppose, consciemment ou non, l'existence d'une vérité objective que l'on peut découvrir et modéliser par des observations représentatives. Ce cadre suppose que les phénomènes étudiés peuvent être mesurés de manière fiable, et que ces mesures permettent de dégager des lois, etc. La recherche de représentativité trahit un engagement envers un réalisme qui considère plus ou moins négligeables la complexité et la variabilité des phénomènes et, par exemple, leur nature dynamique et culturellement située.

D'autres adoptent une posture différente par rapport au monde et à l'observation, mettant par exemple l'accent sur la construction contextuelle de tout savoir. D'autres encore refusent même ces approches (qu'on pourrait dire post-structuralistes) et défendent une action plus engagée, plus assumée, que celle de la quête de « savoirs ». C'est dans une telle optique que se situe notre travail au

Laboratoire Épistémologie et Activité Mathématiques (LEAM). Il illustre à une des manières dont des liens pourraient être tissés entre la recherche en didactique des mathématiques et en neuroscience.

III. LE CAS DE L'ÉNACTION ET DU CONCEPT DE REPRÉSENTATION

1. *Quelques mots sur l'énaction*

Quand les travaux de recherche d'une discipline ont pour fonction *d'inspirer* le travail dans une autre, la question de la transférabilité ne se pose plus. C'est la rigueur interne à chacune des disciplines concernées qui permet d'apprécier la valeur des travaux réalisés. Mais qu'est-ce que « inspirer » peut vouloir dire, concrètement ? J'en présente une illustration autour du concept de « représentation », et du cas de l'énaction.

L'énaction, développée par les biologistes Humberto Maturana et Francisco Varela, est une approche en sciences cognitives. Contrairement à d'autres qui considèrent la cognition comme un processus interne, l'énaction propose que la connaissance émerge de l'engagement actif de l'organisme avec son milieu. Cette approche a été développée en bonne partie sur la base de travaux en neuroscience. Maturana réalise par exemple une étude intitulée *Directional movement and horizontal edge detectors in the pigeon retina* (Maturana et Frenk, 1963) dans lequel il est expliqué comment les cellules ganglionnaires font plus que de simplement transmettre des informations lumineuses au cerveau. Varela, de son côté, dépose à Harvard une thèse intitulée *Insect retinas: information processing in the compound eye* (Varela, 1970) où, à l'aide de mesures fines de l'activité dans le système nerveux, il montre comment le cerveau ne fait pas que « traiter l'information » visuelle, par exemple pour construire une représentation de ce qui est vu. Ses observations suggèrent plutôt que le système nerveux est impliqué dans une activité globale par laquelle ce qui est vu « émerge » à travers l'interaction constante entre des processus internes et l'environnement. Un récent article de Varela et al. (2001) récapitule et illustre ce type de travaux de manière relativement accessible, et met bien en valeur la façon dont le phénomène de plasticité, par exemple, s'articule avec l'apparente spécialisation de certaines régions du cerveau (j'y reviendrai) :

The emergence of a unified cognitive moment relies on the coordination of scattered mosaics of functionally specialized brain regions. Here we review the mechanisms of large-scale integration that counterbalance the distributed anatomical and functional organization of brain activity to enable the emergence of coherent behaviour and cognition. Although the mechanisms involved in large-scale integration are still largely unknown, we argue that the most plausible candidate is the formation of dynamic links mediated by synchrony over multiple frequency bands.

De telles observations contribuent à la formulation de la théorie de l'énaction, dont l'un des chevaux de bataille concerne la question de la représentation.

2. *Brousseau et le concept de représentation*

Particulièrement intéressant pour nous, le concept de « représentation » occupe une place de choix dans la recherche en didactique des mathématiques. Brousseau (2004) en offre une excellente analyse dans un texte qui présente des échos très forts avec les questions que nous nous posons concernant les neurosciences, mais par rapport à la psychologie :

Pour réussir à jeter un pont entre les chercheurs qui étudient directement « la représentation » avec les instruments habituels de la psychologie cognitive et ceux qui l'approchent avec d'autres instruments théoriques, cet article doit relever le défi de souligner ces différences épistémologiques (p. 242).

En effet, le concept de représentation, y compris celui de « représentation mentale », repose sur l'hypothèse de l'existence du triplet a) chose représentée, b) chose le représentant, et c) forme de correspondance (car la représentation peut être de différent type). Brousseau souligne la dimension épistémologique et les implications pratiques qui peuvent s'y rattacher. Une posture réaliste ou empiriste donne à la représentation un rôle (et une nature) qui ultimement « désarment l'action de l'enseignant en renvoyant à des lois d'apprentissage [...] et] vident à l'avance les processus didactiques de leur substance » (p. 245). On voit bien là certaines craintes formulables à l'égard des neurosciences, face auxquelles on pourrait formuler le même type de craintes. Brousseau explique ensuite comment une épistémologie différente, celle de la théorie des situations didactiques, définit le concept de représentation de manière située, et comme « construction » déterminée par la fonction qu'on lui donne. Il s'inspire des différents sens qu'on peut prêter au mot « représentation » pour distinguer des situations, des tâches et des rôles qui conduisent à s'attarder à l'activité du sujet et non à la représentation elle-même. Une véritable déconstruction de la notion de représentation qui, on pourrait l'argumenter, devient un prétexte pour s'attarder aux processus didactiques.

L'analyse que fait Brousseau illustre aussi très bien sa posture épistémologique à l'égard des résultats de la recherche. Rappelons d'abord cette position concernant les retombées de la didactique des mathématiques sur la pratique :

...les fonctions sociales assignées à ce domaine de recherche sont décrites comme des défis mortels auxquels [le chercheur] est confronté. L'obligation de remplir immédiatement une fonction sociale, de se présenter selon les canons et les pratiques d'une science établie, de déterminer des orientations pour l'éducation, de proposer des solutions pratiques pour tous les problèmes des divers niveaux scolaires et universitaires et de toutes les institutions en présence, se plier au développement que d'autres sciences hasardent en direction de l'enseignement, etc. La didactique est l'objet d'attentes démesurées et de critiques excessives. [...] l'avenir de la didactique en tant que moyen socioculturel d'amélioration de l'enseignement est lié à l'émergence d'une conception plus professionnelle du métier d'enseignant (p. 2-4 de la version en ligne).

La conception « plus professionnelle » dont il est question s'oppose à une vision « technicienne » où l'enseignant aurait principalement pour fonction de bien mettre en œuvre des activités éprouvées. L'enseignant comme professionnel est d'avantage critique et réflexif, il dispose de moyens de concevoir, d'apprécier et d'ajuster ses enseignements. Or, le modèle que présente Brousseau à propos des enjeux de la représentation répond précisément à cela. Il ne s'agit pas de tirer de la psychologie des recettes d'enseignement, mais de se servir de la problématisation du concept de représentation, appuyée entre autres sur des travaux en sociologie et en psychologie, pour mettre en lumière des manières de concevoir, d'apprécier et d'ajuster des enseignements.

Dans l'exemple qu'il donne autour du codage, Brousseau insiste ainsi sur les nombreuses variations qui ont été expérimentées, et sur la nécessité d'adapter les activités aux contextes de la classe où les fait vivre. Il n'offre pas une méthode, mais des principes : on cherche à confronter les élèves à certaines tensions pour faire naître un besoin, etc. Ces principes sont des principes didactiques, enracinés dans le travail et les cadres du didacticien. Et le modèle n'est pas là pour garantir le succès de l'enseignement, mais pour en exposer les possibilités. Ceci passe par une sorte de réinvention, donc, du concept de représentation : une conceptualisation didactique de cet objet qui elle-même permet et soutient l'activité professionnelle de l'enseignant à son propos.

3. *La représentation du point de vue de l'énaction*

C'est un peu dans le même type de démarche que situent nos travaux au LEAM. Le concept de représentation fait l'objet d'importantes discussions dans les écrits en énaction, servant même à clarifier la posture épistémologique qui fonde cette théorie. Des études empiriques du système nerveux ont

conduit Maturana et Varela à rejeter complètement l'hypothèse selon laquelle les organismes vivants, dont l'humain, fonctionnent à l'aide de représentations (e.g., Varela, 1996)¹. Dans leur approche, la connaissance du monde n'est pas une question de traitement de l'information (modèle qui imprègne l'idée de représentation) : la cognition est plutôt envisagée comme une forme de « faire » soulignant l'importance des interactions sensori-motrices. Ils s'appuient sur des études comme celles de Hubel et Wiesel (1956), qui ont observé l'activité électrique de neurones dans le cortex visuel primaire de chats en réponse à des stimuli (des lignes dont l'orientation ou la taille varie). Ces travaux, importants dans la démonstration de la plasticité du système nerveux, montrent aussi la présence d'interactions significantes dans le cortex visuel lui-même. Pour faire simple, d'une part, on réalise que, si certaines régions *ont tendance* à réagir davantage à certains stimuli, il n'y a pas vraiment de neurones dédiés à des fonctions précises. D'autre part, on apprend qu'une partie de l'activité cognitive impliquée dans la reconnaissance de motifs s'effectue *avant* l'activation du cortex préfrontal et du cortex pariétal. Des travaux subséquents montrent qu'une partie du travail se fait même *dans les yeux*, au niveau des cellules ganglionnaires de la rétine (e.g., Maturana et Frenk, 1963, cité plus haut). C'est donc en réaction à de telles observations que Maturana et Varela développent une alternative à la notion de représentation, et, nécessairement, à la manière dont on définit généralement le « savoir » et la « connaissance » (voir l'excellente explication du lien donnée dans Brousseau, 2004). Pour eux, toute connaissance est action et toute action est connaissance : il n'y a pas d'accumulation de connaissances (e.g., dans le cerveau) mises en œuvre face à des situations, mais l'activation d'une myriade de processus qui se coordonnent en continu, entre eux et avec l'environnement, de telle sorte qu'émerge « un monde de signification »².

Je me limite à une évocation très rapide de l'énaction, sans doute trop rapide même pour qu'on puisse l'apprécier. Je ne m'attarderai pas non plus à discuter des nombreux travaux en didactique des mathématiques qui ont été réalisés en s'appuyant sur cette théorie. Le lecteur curieux consultera l'article de Goodchild (2014) et les écrits de Thom Kieren, Brent Davis, Andy Begg, Elain Simmt, Alf Coles, David Reid, Jo Towers, Sandy Dawson, Maria Dolores Lozano, Heinz Steinbring, et d'autres encore incluant, dans le monde francophone, Jérôme Proulx ou Sophie René de Cotret (e.g., 1999). Il me semble plus pertinent de revenir sur la manière dont cette mise à l'écart du concept de représentation, basée donc sur des travaux en sciences cognitives, a influencé notre travail. Mais juste avant, notons d'abord que d'autres avant nous ont relevé l'importance de ce point. Kieren (1995), par exemple, distingue un regard « représentationniste » de l'enseignement des mathématiques de celui mis de l'avant par l'énaction et souligne :

a student is not seen as making correct representations in their heads and then responses for the teacher [...] The student is observed as involved in the community of mathematics in which (s)he exists with fellow students and the teacher. This means that maintaining and participating in the inter-action is key to learning (p. 14)

Dans cet extrait (et le texte, que je recommande fortement), Kieren met fort bien la table à ce qui suit. On voit aussi très bien dans ses travaux comment l'énaction sert d'inspiration à un travail didactique qui n'a rien à voir avec ce qui serait « l'application » simpliste de résultats en neuroscience à l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques. Kieren explique que l'énaction nous conduit à *regarder* les élèves, l'enseignant et les situations de classe d'une certaine manière. En particulier ici : de le voir non pas comme des individus qui répondent à des questions sur la base de représentations mentales, mais plutôt comme des membres d'une communauté mathématique en interaction. S'y révèle une posture épistémologique bien différente de celles voulant que la recherche en neuroscience donne

¹ Ils rejoignent en cela d'autres travaux par exemple en théorie du langage, mais je n'en parlerai pas ici. Voir par exemple Maheux et Proulx (2012).

² Proulx (2008) présente très bien la posture épistémologique de l'énaction en la contrastant avec celle du constructivisme.

des réponses aux problèmes de l'enseignement, et une posture bien différente aussi en ce qui a trait à la nature de la connaissance et de l'activité mathématiques en classe. L'espace me manque pour en discuter plus à fond, mais Kieren le fait assez bien dans son propre texte.

IV. ÉNATION ET REPRÉSENTATIONS DANS NOS TRAVAUX

C'est en poussant plus loin l'idée mise de l'avant par Kieren par exemple que Proulx et moi avons développé au LEAM la théorie du « faire | mathématique », dans laquelle nous proposons de mettre de côté les concepts de savoir et de connaissance pour nous concentrer sur l'activité mathématique elle-même. Nous avons d'abord abordé ceci (e.g., Proulx et Maheux, 2012) en posant la question : peut-on imaginer une didactique des mathématiques dans laquelle on ne tient pas pour acquis que les élèves agissent sur la base de représentations (mentales) ou de connaissance (qui seraient stockées dans leur cerveau) ?

D'emblée, il ne s'agit donc pas, ici encore, d'appliquer à la didactique des mathématiques (ou à l'enseignement) des résultats de recherche en neuroscience, mais de se servir de tels résultats pour questionner nos approches, et pour ouvrir à d'autres possibilités. La proposition initiale d'une didactique qui se contente de parler de ce que *font* (visiblement) les élèves et les enseignants a été mise en œuvre dans différentes études. Nous avons d'une part clarifié certains aspects méthodologiques (Maheux et Proulx, 2014a), parallèlement mis à l'épreuve dans certaines études. Proulx s'est ainsi intéressé au cas du calcul mental, et a montré comment on pouvait s'attarder aux stratégies énoncées par les élèves pour faire avancer notre discipline de différentes manières, et ce, sans avoir formulé d'hypothèses sur ce que « savent » les élèves, ou la manière dont ils se « représentent » différentes choses (e.g., Proulx, 2015). Ses écrits ont entre autres mis de l'avant la manière dont les stratégies énoncées peuvent enrichir les analyses conceptuelles et a priori. Il a aussi, par exemple, contribué à développer un modèle permettant de caractériser l'action collective, modèle intéressant pour distinguer des dynamiques de classe (McGarvey et al., 2015).

Ces avancées ont le potentiel d'apporter aux enseignants des moyens d'enrichir, de raffiner, de revoir ou même de changer leurs pratiques. Mais il est important encore une fois d'en situer la visée : il ne s'agit pas d'applications de travaux en neuroscience, ni même de contributions prétendant régler des problèmes de la pratique. Un peu comme les conceptualisations développées par Brousseau, les distinctions et les modèles de Proulx pourraient venir permettre et soutenir une activité professionnelle de l'enseignant préoccupé par le développement de stratégies, par exemple. La déconstruction du concept de représentation à l'aide de travaux en neuroscience nous met au défi d'aborder différemment ce qui se passe en classe, et c'est comme didacticiens des mathématiques que nous élaborons ces nouvelles approches.

Dans le même souffle, Proulx et moi nous sommes aussi intéressés à la résolution de problème, autre thème important en didactique des mathématiques. Ceci nous a conduits questionner le concept de résolution de problème, dont l'interprétation courante est également « représentationniste » : l'existence (objective ou subjective) d'un problème à résoudre, et de sa solution. Un regard en termes de faire | mathématique conduit plutôt à parler de « problématisation » continue à partir d'énoncés que l'on transforme de manière plus ou moins assurée (Maheux et Proulx, 2014b). Une approche reprise pour examiner la résolution de problème collective également (Gandell et Maheux, 2019). Ces études visent dans un premier temps à développer un nouvel éclairage sur le sujet. Cet éclairage pourrait amener à revoir les visées généralement associées à la résolution de problème en mathématique, et à apprécier de manière différente le travail des élèves dans ce contexte. La conception d'un nouveau « modèle », très différent de celui de Polya par exemple, pourrait également venir outiller la pratique.

Quoi qu'il en soit, remarquons que c'est donc bien « de l'intérieur » de la didactique des mathématiques que nous avons souhaité apprécier la pertinence des leçons tirées des études en sciences cognitives. Et surtout pas en faisant reposer la validité de nos propos sur le poids des « évidences » mesurées dans les études sur le système nerveux. Exemple supplémentaire : un autre thème sur lequel nous nous penchons depuis un moment est celui de la « transposition didactique ». On devine assez rapidement comment cette notion repose sur l'idée de représentation à différentes échelles : représentation sociale, collective, dans l'activité, individuelle, etc. Mais comment parler de la « circulation du savoir » si on met de côté le concept même de savoir, de connaissance et de représentation ? Une façon d'y arriver : s'intéresser de manière primordiale aux *traces*, que l'on peut considérer comme vecteurs de certaines activités. Plutôt que de parler de « transposition », on réfléchit en termes de « propagation mathématique » (voir Maheux, 2023), une approche qui permet de rendre compte de la circulation des idées ou des pratiques tant à l'échelle sociohistorique que dans la classe. La manière dont les recherches en neuroscience informent ce travail n'ont pas fait l'objet d'une explicitation, mais le fait de considérer l'activité et ses traces comme faisant partie de l'environnement avec lequel le système nerveux interagit rend le lien assez évident. L'explosion depuis quelques années du nombre d'études en neurologie invite naturellement à vouloir aller puiser à la source, pour ainsi dire : est-ce que de nouveaux résultats sur la manière dont nous interprétons les traces de l'activité pourraient nourrir cette conceptualisation, et peut-être même mener à regarder de façon différente ce qui se dit ou s'écrit en classe de mathématiques ? Sans doute que oui !

...En même temps, et je conclus là-dessus, un obstacle majeur reste présent. Maturana et Varela sont de grands vulgarisateurs de la recherche en neuroscience. Ils ont su parler des travaux et de leurs résultats, identifier ceux qui sont le plus évocateurs, traduire les observations en termes de questionnements et inventer de nouvelles hypothèses, étant eux-mêmes directement impliqués dans ces recherches. Pour nous didacticiens, étrangers à ce champ de recherche³, lire et faire sens du dernier article publié dans le *Journal of Neuroscience Research* n'est pas chose évidente. Juger de la qualité et de la portée de tel papier dépasse généralement nos compétences. Ainsi, je lisais récemment une étude fascinante intitulée *Sensorimotor synchronization and neural entrainment to imagined rhythms in individuals with proficient imagery ability* (Whitton et al., 2024). L'étude semble démontrer que les distractions auditives ont un effet plus grand que les distractions visuelles lors de tâches demandant des associations/coordinations, mais aussi que les structures associées à l'imagerie visuelle semblent pouvoir soutenir le travail de celles associées à l'auditif, et ce, même en l'absence de stimuli visuels. La notion « d'imagerie rythmique » discutée dans l'article est évidemment séduisante. Surtout quand on pense aux travaux en didactique proposant de s'attarder au rythme, ou même d'en utiliser en classe avec les élèves (e.g., Bautista et Roth, 2012 ; Chahine et Montiel, 2023). Je peux cependant difficilement juger de la qualité de l'étude de Whitton et al. (2024). Néanmoins, leur travail peut m'inspirer comme didacticien, me faire réaliser que la dimension « sonore » d'une activité semble rarement prise en compte dans nos analyses, qu'il pourrait s'agir d'une « variable didactique » intéressante à solliciter, et ainsi de suite (on parle ici de « distractions sonores » : pas question ici d'élèves sourds, pour qui on sait que l'aspect langagier amène des défis en lien avec les mathématiques).

³ Un collègue me suggère d'utiliser le mot « touristes », qui donne une image intéressante de la manière dont nous découvrons / explorons ces champs de recherche pour lesquels nous ne sommes pas formés !

V. EN GUISE DE CONCLUSION

La présence de points de contact entre les sciences cognitives et la didactique des mathématiques est évidente et inévitable. Mais il m'est impossible de ne pas partager les conclusions de Brousseau (2004) quand il écrit :

Il me semble difficile, voire illégitime, contraire à l'éthique, dans son principe, d'importer directement en didactique des prescriptions, des suggestions ou même de simples concepts issus des sciences cognitives, directement, c'est-à-dire sans les intégrer spécifiquement dans une analyse du système didactique (p. 274)

Alors quoi ? Il y a bientôt 10 ans de cela, Bowers (2016) écrit « there are no current examples of neuroscience motivating new and effective teaching methods », un constat toujours valide à mon avis, et continue en affirmant « [I] argue that neuroscience is unlikely to improve teaching in the future » (p. 600). Son argument repose sur l'impossibilité d'appliquer (autrement que naïvement, fausement ou de façon injustifiée) aux problèmes d'enseignement et d'apprentissage des observations en neuroscience, car ils ont des objets fondamentalement différents. Une exception, suggère-t-il, serait dans le paradigme médical : la mise au point, sur la base d'études en neuroscience, d'implants ou de médicaments aidant les apprenants à voir, à entendre, ou à se concentrer... voilà qui peut, en effet, aider certains élèves à apprendre ! Mais, explique-t-il, ce n'est pas du tout ce type de contribution auxquelles on pense en « neuroéducation », où généralement on vise plutôt à justifier l'adoption d'approches pédagogiques. Et c'est là où, selon Bowers, on se fourvoie.

Dans le cadre de ce texte, j'ai voulu mettre en lumière une autre manière dont la recherche en neuroscience pourrait contribuer à la didactique des mathématiques⁴. En nous invitant à questionner nos modèles, nos épistémologies et les choses que nous tenons pour acquies, les avancées en neuroscience peuvent nous provoquer comme didacticiens des mathématiques. Et c'est en y réagissant *en tant que didacticiens des mathématiques* que nous pouvons faire progresser notre champ à travers ces travaux. C'est aussi ce que veut dire Brousseau (2004), je pense, quand il s'oppose à ce qui « [vide] les processus didactiques de leur substance » (p. 245, cité plus haut). C'est aussi le cœur de la réaction de Barallobres (2018).

Évidemment, les didacticiens des mathématiques n'ont pas l'exclusivité en ce qui a trait à l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques. Certainement, la médecine peut changer bien des choses. La sociologie ou la politique, par exemple, peuvent aussi venir en transformer les conditions à un point tel que certaines questions disparaissent et d'autres deviennent dominantes. Le meilleur exemple de ceci est sans doute celui donné par les outils technologiques, dont le développement exponentiel semble annoncer un véritable raz-de-marée dans les années à venir. Est-ce à dire que les travaux en intelligence artificielle devraient dicter l'adoption de nouvelles approches pédagogiques ? Comme didacticiens des mathématiques, nous serons sans doute très prochainement confrontés à des écologies nouvelles. Beaucoup des choses que nous tenons pour certaines ou évidentes risquent d'être bousculées⁵. C'est en s'y intéressant d'un point de vue didactique que nous pourrions continuer de faire notre différence : certainement pas en réglant les problèmes de la pratique, mais peut-être en contribuant, comme l'écrivait Brousseau, à nourrir l'exercice professionnel du métier d'enseignant. Il en va de même pour l'apport potentiel des avancées en neuroscience.

⁴ Je pourrais parler de la contribution possible de la didactique des mathématiques aux neurosciences, mais ce n'est pas tant ce qui nous intéresse comme didacticiens... Bowers (2016) évoque quelques pistes.

⁵ Il y aurait probablement beaucoup à apprendre d'études sur la manière dont les développements technologiques (en particulier la calculatrice, puis l'ordinateur portable) ont globalement affecté l'éducation mathématique d'une part, et notre discipline de l'autre. Des travaux en ce sens existent déjà.

RÉFÉRENCES

- Barallobres, G. (2018). Réflexions sur les liens entre neurosciences, mathématiques et éducation. *McGill Journal of Education*, 53(1), 169-188.
- Bautista, A. et Roth, W. M. (2012). The incarnate rhythm of geometrical knowing. *The Journal of Mathematical Behavior*, 31(1), 91-104.
- Bowers, J. S. (2016). The practical and principled problems with educational neuroscience. *Psychological Review*, 123(5), 600-612. <https://doi.org/10.1037/rev0000025>
- Brousseau, G. (1994). Perspectives pour la didactique des mathématiques. Dans M. Artigue, R. Gras, C. Laborde, P. Tavnnot et N. Balacheff (dir.), *Vingt ans de didactique des mathématiques en France. Hommage à Guy Brousseau et Gérard Vergnaud* (p. 51-66). La pensée sauvage.
- Brousseau, G. (2004). Les représentations : étude en théorie des situations didactiques. *Revue des sciences de l'éducation*, 30(2), 241-277. <https://doi.org/10.7202/012669ar>
- Chahine, I. et Montiel, M. (2023). Teaching modeling in algebra and geometry using musical rhythms: Teachers' perceptions on effectiveness. *Journal of Mathematics Education*, 8(2), 126-138.
- de Smedt, B., Ansari, D., Grabner, R. H., Hannula-Sormunen, M., Schneider, M. et Verschaffel, L. (2011). Cognitive neuroscience meets mathematics education: It takes two to tango. *Educational research review*, 6(3), 232-237.
- Dehaene, S. (2011). *The number sense: How the mind creates mathematics*. Oxford University Press.
- Gandell, R. et Maheux, J.-F. (2019). Problematising: The lived journey of a group of students doing mathematics. *Constructivist Foundations*, 15(1), 50-60.
- Goodchild, S. (2014). Enactivist theories. Dans S. Lerman (dir.), *Encyclopedia of mathematics education*. Springer.
- Howard-Jones, P. (2010). *Introducing neuroeducational research: Neuroscience, education and the brain from contexts to practice*. Routledge.
- Hubel, D. H. et Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction, and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of Physiology*, 160(1), 106-154.
- Kilpatrick, J. (1981). The reasonable ineffectiveness of research in mathematics education. *For the Learning of Mathematics*, 2(2), 22-29.
- Kieren, T. (1995). *Teaching mathematics (in-the-middle): Enactivist views on learning and teaching mathematics* [Conférence plénière]. Queen's/Gage Canadian National Mathematics Leadership Conference for Teachers, Queens University, Kingston, Ontario.
- Leikin, R. (2018). *How can cognitive neuroscience contribute to mathematics education? Bridging the two research areas* [Lecture]. 13th International Congress on Mathematical Education.
- Lunkenbein, D. (1995). Qu'est-ce que la didactique des mathématiques. *Instantanés mathématiques*, 32(1), 6-17. https://www.amq.math.ca/wp-content/uploads/instantanes-math/Vol_XXXII_no_1_1995_Septembre_pages_6_17.pdf
- Maheux, J.-F. et Proulx, J. (2014a). Vers le faire mathématique : essai pour un nouveau positionnement en didactique des mathématiques (Débat : article original). *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives. Revue internationale de didactique des mathématiques*, 19, 17-52.

- Maheux, J.-F. et Proulx, J. (2014). De résoudre un problème à problématiser mathématiquement : Vers une nouvelle approche de l'activité mathématique de l'élève. *Éducation et francophonie*, 42(2), 24-43.
- Maheux, J.-F. (2023). *Transposition didactique ou propagation mathématique ?* [Communication] Colloque de l'ACFAS 2022. <https://jfmaheux.uqam.ca/publications/Maheux2023PropagationACFAS.pdf>
- Masson, S. (2007). Enseigner les sciences en s'appuyant sur la neurodidactique des sciences. Dans P. Potvin, M. Riopel et S. Masson (dir.), *Enseigner les sciences : regards multiples* (p. 308-321). MultiMondes. <https://static1.squarespace.com/static/510c0d84e4b0cdc785fa72c5/t/5117946ae4b04c436edbdee1/1360499818520/Masson2007.pdf>
- Maturana, H. R. et Frenk, S. (1963). Directional movement and horizontal edge detectors in the pigeon retina. *Science*, 142(3594), 977-979.
- McGarvey, L. M., Davis, B., Glanfield, F., Martin, L., Mgombelo, J., Proulx, J., Simmt, E., Thom, J. et Towers, J. (2015). Collective learning: Conceptualizing the possibilities. Dans T. G. Bartell, K. N. Bieda, R. T. Putnam, K. Bradfield et H. Dominguez (dir.), *Proceedings of 37th Annual Conference of PMENA, 5-8 novembre 2015, Michigan State University, USA* (p. 1333-1342). <https://www.pmena.org/pmenaproceedings/PMENA%2037%202015%20Proceedings.pdf>
- Proulx, J. (2007). Les recherches en didactique des mathématiques : perspectives personnelles sur les perspectives d'avenir. Dans N. Bednarz (dir.), *Actes du 40e colloque du GDM2007, 4-8 juin 2007, Université du Québec à Rimouski, Canada* (p. 229-238).
- Proulx, J. (2008). Some differences between Maturana and Varela's theory of cognition and constructivism. *Complicity: An International Journal of Complexity and Education*, 5(1).
- Proulx, J. et Maheux, J.-F. (2012). De la connaissance et du faire : vers un nouveau positionnement en didactique des mathématiques. Dans *Actes du 44e Colloque du GDM2012, 23-25 mai 2012, Université Laval, Québec, Canada* (p. 100-116).
- Proulx, J. (2015). Calcul mental et stratégies : un regard en termes de potentialités. Dans C. Sabena et B. Di Paola (dir.), *Actes de la 67e rencontre de la CIEAEM, 20-24 juillet 2015, Aoste, Italie* (p. 341-345). https://sites.unipa.it/grim/CIEAEM_67_Proceedings_QRDM_Issue_25_Suppl.2.pdf
- René de Cotret, S. (1999). Perspective bio-cognitive pour l'étude des relations didactiques. Dans F. Conne et G. Lemoyne (dir.), *Le cognitif en didactique des mathématiques* (p. 103-120). PUM.
- Schwank, I. et Gardes, M. L. (2024). Neuroscience and mathematics education/cognitive science. Dans J. Wang (dir.), *Proceedings of the 14th International Congress on Mathematical Education, 11-18 juillet 2021, Shanghai, Chine* (volume I, p. 413-416).
- Varela, F. J. (1996). *Invitation aux sciences cognitives*. Seuil.
- Varela, F., Lachaux, J. P., Rodriguez, E. et Martinerie, J. (2001). The brainweb: Phase synchronization and large-scale integration. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(4), 229-239.
- Whitton, S. A., Sreenan, B., Luo, C. et Jiang, F. (2024). Sensorimotor wynchronisation and neural entrainment to imagined rhythms in individuals with proficient imagery ability. *Journal of Neuroscience Research*, 102(9), Article e25383.