

Viennot, L. et Décamp, N. 2019. Concept et critique : lignes enchevêtrées des dynamiques d'apprentissage en physique ; In J.C.S. Lévy et Salomon Ofman: *L'avenir de la complexité et du désordre*, Paris : Editions Matériologiques, pp. 142-152.

Concept et critique : lignes enchevêtrées des dynamiques d'apprentissage en physique

Laurence Viennot et Nicolas Décamp
PRES SPC, Université Paris Diderot, LDAR

corr. laurence.viennot@univ-paris-diderot.fr

L'objectif d'attractivité et l'accent mis par les textes officiels sur les compétences vont *de facto* avec un allègement des contenus enseignés et un appauvrissement de leur structuration conceptuelle. Ce contexte accentue la nécessité de développer une attitude critique chez étudiants et enseignants. Mais peut-on raisonnablement envisager un développement sur ce plan sans assurer une base conceptuelle minimale à ceux que l'on forme? Des éléments de réponse à cette question sont fournis par une série d'études qui mettent en jeu des situations physiques variées. Les enquêtes reposent sur des entretiens approfondis - notamment auprès d'enseignants en fin d'études. Une cartographie des parcours intellectuels observés fait apparaître des développements conceptuels et critiques imbriqués, et des effets de seuil. Sur cette base, les orientations officielles actuelles et la forme que pourraient prendre des interventions de formation seront discutées.

Introduction

Les injonctions actuellement adressées à l'enseignement des sciences, et de la physique en particulier, sont multiples. Il s'agit d'attirer les étudiants vers les sciences, pour éloigner le spectre de la déflation des effectifs observée dans de nombreux pays lors de la décennie précédente. L'initiation des élèves à la nature de la science, au raisonnement scientifique, à l'investigation, ne sont pas moins soulignées comme objectifs incontournables. En facteur commun à toutes ces exigences, celle d'une formation à l'esprit critique s'inscrit comme une constante dans les instructions officielles. Cette liste peut sembler banale mais tout dépend des accents mis sur tel ou tel des items évoqués. Or la nécessité de former le plus grand nombre de citoyens à la science, et le constat de l'évolution rapide des savoirs a mené nombre d'instances décisionnaires, notamment en Europe, à réduire les exigences conceptuelles pour accentuer la nécessité de développer « les compétences », dont, bien sûr, la pensée critique. Ainsi le dernier rapport d'orientation de l'enseignement scientifique émis par la Commission Européenne¹ préconise de ...” to develop the competencies for problem- solving and innovation, as well as analytical and critical thinking that are necessary to empower citizens to lead personally fulfilling, socially responsible and professionally-engaged lives”. Ce contexte renforce l'intérêt d'évaluer dans quelle

¹ European Commission, *Science Education for Responsible Citizenship*, Report EUR 26893 EN, chair Hellen Hazelkorn Brussels, 2015.

mesure le développement d'une compétence telle que l'analyse critique peut se faire sans l'établissement concomitant d'une structuration conceptuelle minimale.

D'ailleurs, dès 2013, l'arrivée dans les cursus universitaires scientifiques d'une nouvelle génération d'étudiants, déjà largement formée dans la ligne ainsi définie, a été en France l'occasion de constats préoccupants: « (...) ils (*les élèves en fin d'études secondaires*) voient la physique comme désordonnée et anarchique »².

Cette question des liens entre analyse critique et compréhension conceptuelle n'est pas nouvelle. Un débat (« The critical debate ») a notamment opposé McPeck³ et Ennis⁴ au sujet d'un éventuel découplage entre aptitudes critique et domaine abordé. Willingham⁵ prend fermement parti lorsqu'il affirme 'Critical thinking is not a set of skills that can be deployed at any time, in any context'. Mais nous nous intéressons ici non pas à une éventuelle *co-occurrence* de plusieurs compétences intellectuelles dans une population donnée, en lien ou non avec divers contextes, mais à leur *développement* pour un individu donné dans un contexte donné.

En matière d'analyse critique, nous nous centrons sur la détection d'énoncés auto-contradictaires ou violant des lois de la physique admises par ailleurs, ainsi qu'à la caractérisation d'explications très incomplètes présentées plus ou moins implicitement comme suffisantes pour comprendre un phénomène.

Les études présentées ici concernent des échantillons restreints d'étudiants (entre 6 et 14) en fin de licence ou en master MEEF⁶, interrogés en entretiens individuels longs (entre 1h et 1h30), à chaque fois à propos d'un sujet différent de physique. Il s'agit, pour l'essentiel, de phénomènes physiques qui, tout en restant accessibles, ne présentent pas un caractère d'évidence pour la population concernée. Le scénario de ces entretiens est structuré par une démarche de type enseignement interactif et progressif⁷, mais leur but est le recueil d'indices susceptibles d'éclairer notre question de recherche : quels sont les éventuels liens entre les composantes conceptuelle et critique des dynamiques intellectuelles des étudiants lors de ce type d'interaction.

Une étude emblématique : la datation au carbone 14

² L. Villain, «On the linking between secondary teaching and higher education in physics and chemistry», *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 2013, p. 2011-2016.

³ J. McPeck, «*Critical thinking and education* », New York, NY: St Martin's Press, 1981.

⁴ R. H. Ennis, «The degree to which critical thinking is subject specific: Clarification and needed research», in S. Norris (ed.), *The generalizability of critical thinking: Multiple perspective on an educational ideal* , New York, NY: Teachers College Press, 1992, p.21–37.

⁵ D. T. Willingham, «Critical thinking why is it so hard to teach? », *American Educator*, 2007, p.1–19.

⁶ Le Master 'MEEF' concerne les métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation.

⁷ L. Viennot & C. de Hosson, «From a Subtractive to Multiplicative Approach, A Concept-driven Interactive Pathway on the Selective Absorption of Light», *International Journal of Science Education*, 37(1), 2015, p. 1-30.

Parmi les travaux que nous avons consacrés à ce thème, une étude à propos de la datation au carbone 14⁸ servira d'ancrage pour structurer des résultats au caractère encore exploratoire.

¹⁴C : l'enquête

Cette recherche porte sur les réactions d'étudiants aux explications très incomplètes que l'on trouve couramment à ce sujet. Il est bien connu qu'un organisme mort voit son taux de carbone 14 décroître par désintégration radioactive. Celle-ci est modélisée par une fonction exponentielle $N = N_0 \exp(-t/\tau)$ qui, exprime le nombre d'atomes N de radio-carbone (¹⁴C) présents dans un organisme mort en fonction du temps et de leur nombre N₀ au moment de la mort, connaissant la demi-vie τ du radio-carbone (5730 ans). Savoir cela ne règle pourtant pas le problème puisqu'il faut connaître la concentration de radiocarbone dans l'organisme au moment de la mort pour déduire d'un comptage actuel le temps de désintégration écoulé. Du fait des échanges directs ou indirects entre l'organisme vivant et l'air, cette concentration, lit-on souvent, est celle de l'atmosphère, laquelle n'a pas varié depuis la mort de l'organisme en question. Il n'est pas nécessaire d'être un expert du sujet pour s'interroger alors : n'y a-t-il pas de décroissance radioactive pour le carbone 14 dans l'atmosphère ? De proche en proche les questions s'enchaînent, ou plutôt devraient s'enchaîner, pour une compréhension minimale du sujet. Les autres éléments de réponses nécessaires sont listés ci-dessous (leur compréhension détaillée n'est pas nécessaire pour un lecteur non physicien) :

- Le processus de formation du radiocarbone
- Le processus de désintégration radioactive du radiocarbone
- Comment l'égalité des nombres correspondants de noyaux de radio carbone impliqués par seconde dans ces deux processus génère un état stationnaire du rapport [¹⁴C/¹²C] dans atmosphère.
- La constance du nombre total de noyaux (radiocarbone + azote)
- L'effet multiplicatif des populations existantes de noyaux de radiocarbone et d'azote, sur, respectivement, la destruction et la formation de noyaux ¹⁴C
- Comment cette structure multiplicative explique la proportion stable du radiocarbone par rapport au carbone ordinaire dans l'atmosphère

On note en particulier qu'un point crucial est de savoir comment se compensent le processus de désintégration, évidemment présent dans l'atmosphère, et celui de formation du carbone 14 (à partir d'atomes d'azote bombardés en haute atmosphère par des neutrons dits « cosmiques ») pour assurer la stabilité du taux de carbone 14 dans l'atmosphère. Là aussi, poser ou ne pas poser cette question signe une attitude critique, ou non.

Le scénario des entretiens consistait à présenter aux étudiants une série de 5 textes trouvés sur internet, constituant des explications de moins en moins incomplètes, c'est-à-dire mentionnant successivement un nombre croissant des informations nécessaires (voir liste ci-dessus). Pour chacun de

⁸N. Décamp & L. Viennot, «Co-development of conceptual understanding and critical attitude: analysing texts on radiocarbon dating », *International Journal of Science Education* 37, 2015, p. 2038-2063.

ces textes, l'étudiant était invité à dire s'il était satisfait par l'explication ou bien souhaitait plus d'information. L'enquêteur fournissait enfin une explication « complète », que nous avons élaborée nous-mêmes faute de l'avoir trouvée en ligne.

Une cartographie des dynamiques intellectuelles des étudiants a été effectuée à la fois du point de vue conceptuel (non détaillé ici) et sur le plan de l'analyse critique. Ce dernier aspect a été rattaché, plus largement, à un ensemble d'indicateurs groupés sous le label composite « métacognitif-critique-affectif » (*MCA*). Cela tient à ce que poser une question du type de celles soulevées ci-dessus suppose de repérer que l'on n'a pas compris, ainsi qu'une certaine idée de ce que c'est que réfléchir en science - deux aspects métacognitifs. Cela procède aussi d'une frustration, ce qui implique une recherche de satisfaction intellectuelle⁹ et demande, pour l'exprimer, une certaine assurance ou estime de soi - autant d'aspects affectifs. Parmi ces indicateurs '*MCA*' : le degré d'accord, la nature des questions cruciales (par exemple 'Pourquoi les taux de désintégration et de formation sont – ils les mêmes ?') ou anecdotique (par exemple : 'Comment marche le détecteur ?'), le degré de satisfaction/frustration intellectuelle (par exemple : 'Je voulais une réponse, cela ne m'apporte rien de plus !'), les critiques et autocritiques.

¹⁴C : critique différée et anesthésie experte du jugement

Le principal résultat de cette étude est que, pour activer leur potentiel de critique, la plupart des étudiants consultés ont eu besoin d'atteindre un seuil de compréhension situé au-delà d'une simple nécessité logique. Une fois ce seuil atteint, plus ou moins rapidement selon les personnes, une attitude faite d'accord, de satisfaction discrète, et de questionnement sur des points accessoires bascule vers une expression de frustration, de questions cruciales, de critiques et d'autocritiques. La recherche de souvenirs scolaires fait place à une quête pressante de compréhension. Ce déclenchement de l'attitude critique évoque un changement de phase depuis une attitude conciliante vis-à-vis de textes pourtant très incomplets vers une 'crise critique' excluant tout accord et retardant toute expression de satisfaction intellectuelle. Ce type de dynamique intellectuelle, qui répond dans la suite au label 'critique différée', est majoritaire chez les participants de cette étude.

Nous observons aussi, de manière très minoritaire (dans deux cas sur 10), une passivité critique durable, quelle que soit l'incomplétude de l'explication analysée. Ces étudiants connaissaient fort bien le sujet en arrivant. Ils étaient en permanence ravis de leurs propres réponses ("Je suis très content de mes réponses"). Peut-être pour cette raison ont-ils négligé de regarder les textes pour ce qu'ils étaient, à savoir extrêmement incomplets ? Il se peut qu'ils aient inconsciemment complété ce qu'ils y lisaient.

⁹ L. Viennot, «Teaching rituals and students' intellectual satisfaction», *Physics Education* 41, 2006, p.400-408; S. Mathé, & L. Viennot, «Stressing the coherence of physics: Students journalists' and science mediators' reactions», *Problems of education in the 21st century* 11(11), 2009, p.104-128; I. Feller, P. Colin & L. Viennot, «Critical analysis of popularisation documents in the physics classroom. An action-research in grade 10», *Problems of education in the 21st century* 17(17), 2009, p.72-96.

Ce syndrome rejoint celui d' 'analyse experte du jugement ' déjà observé dans une étude antérieure¹⁰. Il est ici minoritaire, mais notre échantillon s'y trouvait peu exposé, car le sujet, relativement délicat, n'était pas du tout maîtrisé au départ par la plupart des participants à notre étude. Tel n'est pas le cas dans l'étude dont le résumé suit.

L'anesthésie experte: la chute 'libre' depuis un ballon à hélium

On se trouve dans un cas bien différent avec une enquête mettant en jeu un ballon à hélium¹¹. Le support de l'étude est un texte de vulgarisation proposé sur le site EDUSCOL pour la formation d'élèves de seconde à l'extraction critique d'information. Il s'agit de record du monde de chute libre. Le héros, peut-on lire, a été monté à l'altitude de 40000m dans un ballon à hélium. La suite de l'histoire est une chute d'abord 'libre' (vu l' 'absence d'atmosphère', comme le précise bien le texte¹²) puis progressivement freinée par l'air. 23 doctorants de physique et 6 enseignants en service ont été individuellement interrogés sur les questions qu'ils aimeraient poser à des élèves de Seconde « pour les aider tirer le meilleur parti de ce texte ». Malgré leur expertise en principe largement suffisante, aucun ne mentionna le fait qu'un ballon à hélium ne peut parvenir ni se maintenir en un lieu où il n'y a pas d'air. Ce cas peut être rangé, selon nous, sous la rubrique 'anesthésie experte' du jugement. On peut penser que la passivité critique des personnes interrogées tient au moins en partie au fait que ce qui manque dans le texte est inconsciemment rajouté par ceux qui se doutent bien, contrairement aux élèves de Seconde, qu'il reste un peu d'air à cette altitude (en fait : quelques millièmes d'atmosphère) et que ce peu d'air peut effectivement être négligé pour l'étude du début de la chute alors qu'il est crucial pour la compréhension de l'équilibre du ballon.

La critique différée : l'exemple de la couverture de survie

Un autre exemple, plus récent, permet d'enrichir le support expérimental de l'idée de 'critique différée'¹³.

Le thème est celui de la couverture de survie, mince film de Mylar argenté d'un côté et doré de l'autre, utilisée en particulier pour se protéger du froid. Dans cette éventualité, de quel côté doit-on la

¹⁰ Cette étude concerne l'hypothèse habituelle et absurde selon laquelle une montgolfière se trouve en situation isobare. Voir note précédente : Viennot 2006. Voir aussi L. Viennot, *En physique pour comprendre*, Collection Grenoble Sciences, Les Ullis : EDP Sciences, 2011, p. 86.

¹¹ L. Viennot, «Les promesses de l'Enseignement Intégré de Science et Technologie (EIST): de la fausse monnaie? », *Spirale* 52, 2013, p.51-68.

¹² Le texte est le suivant : 'Record du monde de vitesse en chute libre (...) Il atteindra l'altitude de 40 000 mètres en trois heures environ, à bord d'une nacelle, elle aussi pressurisée, et tirée par un ballon gonflé à l'hélium. La durée du saut est évaluée à six minutes vingt-cinq secondes. En l'absence de pression atmosphérique, Fournier dépassera la vitesse du son (1067 kilomètres/heure) trente secondes environ après son départ en position verticale. Il sera ensuite progressivement freiné dans sa chute par la densification de l'air.'

¹³ L. Viennot & N. Décamp, «Co-development of conceptual understanding and critical attitude: toward a systemic analysis of the survival blanket », *European Journal of Physics* 37(1), 2016, p. 015702

mettre ? Ici se présente une idée préconçue selon laquelle, puisque le côté argent est plus réflecteur que le côté doré, il faut le mettre à l'intérieur pour que la chaleur soit mieux renvoyée vers la personne à protéger. Une quasi-unanimité (19/20) se fit sur ce point chez des doctorants à qui l'on avait demandé de dire et justifier de quel côté on devait mettre une couverture de survie pour se protéger du froid. Les raisons fournies convergent sur le pouvoir réflecteur de l'argent :

- Pour me renvoyer la chaleur.
- Le rayonnement infra-rouge sera renvoyé vers moi.
- La chaleur vient de l'intérieur.
- Pour me renvoyer le rayonnement que j'émetts.
- Le côté réfléchissant vers l'extérieur ne servirait à rien puisque l'énergie vient de l'intérieur.

La Croix Rouge française répercute ce point de vue dans le mode d'emploi des couvertures de survie qu'elle distribue :

- Placer la surface dorée à l'extérieur pour isoler du froid, de l'humidité, de la pluie.

Les textes ou instructions d'emploi trouvés sur internet, qu'ils soient d'origine française ou anglo-saxonne, s'alignent unanimement sur cette analyse, ainsi :

-Du fait de sa température, un corps humain est émetteur de rayonnement thermique dans le domaine de l'infrarouge (proche de 10 micromètres). Pour lutter contre l'hypothermie, la surface dorée doit être à l'extérieur¹. Ainsi, le rayonnement infrarouge intérieur est conservé, (...).
http://fr.wikipedia.org/wiki/Couverture_de_survie.

Il faut un regard aiguisé pour trouver, avec la note présente dans la citation précédente, la mention d'une expérience qui 'semble prouver' le contraire¹⁴.

On peut donc s'attendre à une passivité critique importante, due cette fois à une idée préconçue fortement ancrée. Il y a pourtant de bonnes raisons de douter de la préconisation usuelle, raisons qui ont fait le thème d'une expérience conduite sur la base d'entretiens longs avec 7 étudiants en master MEEF 2.

En effet, mettre l'argent à l'intérieur c'est, du même coup, mettre l'or à l'extérieur. Or l'or est plus émissif que l'argent, un fait illustré en début d'entretien par des mesures effectuées avec un radiomètre infrarouge sur des morceaux de couverture de survie collés dans un sens ou dans l'autre sur un bouilloire pleine d'eau bouillante. En conséquence, la cible conceptuelle de la première partie des entretiens consacrés à ce thème était de parvenir à un doute, et à l'idée qu'il fallait trouver un compromis entre les avantages respectifs de mettre l'argent à l'intérieur (il est plus réflexif) ou à l'extérieur (il est moins émissif). Les arguments destinés à ébranler les certitudes initiales des étudiants étaient introduits progressivement par l'enquêtrice.

¹⁴ Le texte en est le suivant : une étude, menée par Planète Sciences (<http://www.planete-sciences.org>) semble prouver qu'il serait préférable, pour conserver la chaleur, de placer la surface dorée vers l'intérieur.

Le résultat d'une double analyse - là encore conceptuelle et critique - des dynamiques intellectuelles des étudiants fait apparaître, comme pour l'étude sur le carbone 14, que la plupart des étudiants ont besoin d'atteindre un seuil de compréhension pour s'exprimer de manière critique vis-à-vis de leur point de vue initial et des documents courants. Les résistances à l'abandon de l'idée initiale sont fortes, les allers et retours fréquents, les remises en questions marquantes ('c'est moi qui ai dit ça?').

Un cas (sur 7) fait pourtant exception à ce tableau de 'critique différée' caractérisée. Il s'agit d'une étudiante qui, sans compétence initiale sur le thème des échanges thermiques et radiatifs a pu mettre très vite à profit l'expérience initiale montrant le relativement fort pouvoir émissif de l'or. 'Je suis coincée' avouera-t-elle rapidement. Ce cas confirme qu'il était possible de s'interroger dès le début avec les informations disponibles, même sans avoir l'explication complète. Celle-ci, fournie en deuxième partie de l'entretien, est d'ailleurs relativement complexe. Fondée sur une modélisation du problème à l'aide de quatre résistances aux transferts énergétiques, elle fera apparaître que la réponse au problème posé est conditionnelle : en cas de temps froid et sec, il faut mettre l'argent à l'extérieur, et l'inverse en cas de temps pluvieux et venteux¹⁵.

La remarque de cette étudiante signe, selon nous un cas limite de 'critique différée', celui, justement, où le déclenchement critique est précoce et n'attend pas la maîtrise conceptuelle du sujet.

De manière non surprenante nous ne trouvons pas ici d' 'anesthésie experte' du jugement étant donné la complexité du thème traité qui a pris de court tous les participants à l'étude.

Récapitulation et remarques finales

A travers l'analyse qui précède, il paraît difficile de soutenir l'hypothèse d'un découplage entre développement de la compréhension conceptuelle et évolution de l'attitude critique. Mais il importe de détailler ce constat pour échapper à l'évidence.

Un premier aspect de nos résultats est qu'ils ne se formulent pas en termes d'un esprit critique qui serait là ou non chez une personne donnée à une date donnée. Il s'agirait plutôt d'activer, ou non, un potentiel critique. L'aptitude à formuler une question critique à propos d'une explication semble, pour beaucoup d'étudiants, conditionnée à un certain avancement de leur compréhension du problème traité. Du moins peut-on interpréter ainsi les cas fréquents de 'critique différée', c'est à dire le décalage souvent observé entre le début d'une interaction à visée conceptuelle avec un enquêteur et le déclenchement d'un questionnement critique chez l'étudiant(e) consulté(e).

Mais cet effet de seuil n'est pas lié à un problème trivial de logique, puisque nous avons donné des exemples où l'information reçue d'emblée suffisait pour s'interroger. On observe en effet que, là où la plupart des sujets interrogés restaient bloqués sur leur conception initiale, une personne accepte de

¹⁵ Voir référence en note 13 pour plus de détails sur l'analyse physique du problème

formuler à ce sujet une ‘critique précoce’, ceci sur la base d’une information restreinte. Le partage des sujets observés entre ‘critique précoce’ et ‘critique différée’ renvoie très probablement à des aspects psycho- et méta-cognitifs, tels que la capacité d’auto-analyse, une certaine vision de la science et de l’apprentissage scientifique, une estime de soi, une revendication à comprendre, une recherche de satisfaction intellectuelle.

Cette imbrication entre les lignes de développement intellectuel sur les plans conceptuel et critique tient donc à des facteurs complexes dont l’étude nous semble devoir être approfondie. Mais déjà, en termes d’objectifs d’enseignement et de formation, il apparaît qu’un choix appuyé sur une vision excessivement bipolaire – concepts *ou* critique, connaissances *ou* compétences¹⁶ – serait bien contestable au vu des recherches rapportées ici.

Un autre volet de nos résultats concerne l’ ‘ anesthésie experte du jugement’, pour laquelle le lien entre développement conceptuel et attitude critique prend un statut plus paradoxal. En effet une compréhension notable du thème traité s’accompagne alors d’une sorte d’aveuglement sur la valeur de l’explication analysée. Ce syndrome ne concerne probablement pas seulement les auteurs de livres d’enseignement ou de vulgarisation, même si une multiplicité d’exemples pourrait le laisser penser¹⁷. Il est susceptible d’apparaître dans une situation d’expertise *relative*, c’est-à-dire quand le sujet traité paraît familier à la personne en situation d’évaluer une explication. Il n’est pas très éloigné de celui consistant à ne pas remettre en question une explication du moment qu’elle amène à des éléments de conclusion corrects.

Prendre conscience de ces phénomènes nous semble une nécessité d’importance majeure pour la formation scientifique à tout niveau. La catégorisation que nous proposons pour les différents types de dynamiques intellectuelles observés en cours d’interaction formatrice est certes susceptible d’être affinée. Mais elle peut déjà fournir des points de repère dans une formation à l’analyse critique et nous semble, à ce titre, devoir être explicitée et illustrée tout particulièrement auprès de futurs enseignants.

¹⁶ Voir par exemple la référence citée en note 1

¹⁷ L. Viennot, «L’explication écho : forme privilégiée du rapprochement entre vulgarisation et enseignement», *Spirale* 48, 2011, p.85-101.

