

Au magasin des explications en sciences physiques : comment choisir ?

L'exemple des piles

Laurence Viennot et Nicolas Décamp

Résumé

Cet article s'intéresse au processus de transposition d'explication en physique, nécessaire pour adapter un savoir expert aux nécessités de l'enseignement. Il est proposé de rationaliser l'analyse critique comparative des explications disponibles pour un phénomène donné, via une liste de critères de qualité. Le thème des piles permet d'illustrer cette démarche et d'en discuter les mérites et les limites, notamment pour la formation d'enseignants.

Introduction

Les explications qu'un enseignant peut proposer à ses élèves pour un phénomène donné sont loin d'être uniques. En effet, un savoir expert doit être aménagé pour être enseigné et cette transposition peut s'effectuer de diverses manières, même pour un type de public donné. Il s'agit alors de conduire une analyse critique comparative des explications disponibles. Ce texte se veut une contribution à l'objectif d'outiller un tel effort d'analyse critique, ici sur le seul terrain des explications en sciences physiques. Après un bref inventaire des obstacles qui entravent couramment le jugement critique, en particulier sur ce thème, une démarche d'analyse multi-critères est proposée et illustrée sur un thème particulier : les piles. Une discussion de cette approche et de sa valeur en formation d'enseignants clôt l'article.

Des obstacles pour l'analyse critique

On pourrait croire que bien connaître un sujet de physique est une condition nécessaire et suffisante pour conduire une bonne analyse critique d'explications dans ce domaine. Or il s'avère que les choses sont moins simples, à en croire une série d'études sur les réactions critiques d'enseignants mis en présence de textes explicatifs hautement contestables [1, 2].

Ainsi, des personnes qui connaissent bien un domaine peuvent se révéler très insensibles aux failles parfois majeures d'explications courantes à ce propos. Un exemple emblématique est celui de la "montgolfière isobare". Cette explication très commune analyse les conditions d'équilibre de l'engin sur la base d'une hypothèse en contradiction flagrante avec le principe de base de l'hydrostatique : la pression serait la même en tout point intérieur ou extérieur à la montgolfière, à savoir "la pression atmosphérique" à l'altitude en question. Cela facilite grandement le calcul de la poussée d'Archimède qui mène d'ailleurs à un résultat très acceptable, mais cela ne laisse aucune chance ni à la sustentation de l'objet, qui requiert un gradient de pression, ni au gonflement de l'enveloppe. L'indifférence quasi unanime que génère cette argumentation auto-contradictoire ne repose pas sur le fait que les personnes consultées ne connaissent pas la loi de l'hydrostatique. Leur absence de critique (malgré ce qu'ils savent) pourrait venir du fait que ces lecteurs indulgents corrigent inconsciemment l'explication, en traduisant par exemple "même pression" par "pression approximativement égale". Cet exemple de tolérance dans la critique, probablement partiellement fondée sur l'expertise, est loin d'être isolé.

Cela dit, il reste vrai qu'un minimum de connaissance du domaine peut se révéler nécessaire pour mener une critique pertinente. Le sentiment d'incompétence est ainsi l'une des barrières le plus souvent exprimées par des enseignants débutants consultés en entretiens : "Qui suis-je pour critiquer ce que des personnes compétentes ont élaboré...". Mais il peut très bien arriver que le minimum de connaissance requis pour alerter le jugement critique soit en fait très bas, et qu'alors notre autocensure rime avec paralysie abusive. Ainsi un texte auto-contradictoire, ou bien une explication tautologique devraient pouvoir être mis en cause sans compétence spécialisée, alors qu'on observe souvent le contraire. Dans ce cas de retard à l'expression critique, nous attendons d'en savoir plus avant d'émettre la moindre critique sur un texte contestable, dont une faille pourrait pourtant nous sauter aux yeux sans plus d'information. On peut à ce propos définir l'objectif de formation suivant : celui de pouvoir émettre une critique pertinente "dès que possible". Une telle mise en action rapide du jugement ne dispense pas de creuser le sujet, mais au contraire permet de faire le point pour définir le chemin qui reste à parcourir vers une meilleure compréhension.

Bien évidemment un facteur aggravant, dans tous les cas, est celui de l'habitude. Lorsque nous avons depuis des années reçu et prodigué telle ou telle explication, même hasardeuse, il devient difficile d'y jeter un regard neuf. Un autre facteur paralysant en matière de critique est le fait qu'une explication parvienne à un résultat correct via un développement mathématique sans erreur, la faille résidant dans la modélisation. C'est, entre autres, le cas de la montgolfière isobare.

En bref, les raisons de laisser inactif notre jugement critique ne manquent pas et, s'il est utile de les connaître, cela ne saurait suffire pour avancer sur ce plan. Entre autres préconisations, quelques outils pratiques seraient bien utiles. La suite de ce texte est une proposition de contribution sur ce plan.

Une analyse critique multi-critères pour les explications en physique

La proposition présentée ici part de l'idée qu'une grille de critères d'évaluation pourrait être utile pour stimuler et organiser une analyse critique comparative d'explications. Initialement centrés sur les failles éventuelles d'explications courantes, les travaux cités plus haut [2] suggèrent une liste détaillée de type de failles manifestes (illustrées par une quarantaine d'exemples), telle l'oubli d'une variable pertinente ou l'assimilation sans contrôle de petites valeurs de variables à des valeurs nulles. Sont aussi caractérisés des facteurs de risque pouvant induire une mauvaise compréhension, tel l'usage sans précaution d'une métaphore. Quelques critères essentiels de cette liste sont repris ici pour illustrer notre approche. Mais s'agissant d'un choix d'explication en classe, la détection des failles éventuelles d'une argumentation ne peut constituer l'alpha et l'oméga des critères de décision. En effet, pour transposer une argumentation explicative experte à une audience novice, la simplicité d'une explication et son adaptation au capital conceptuel déjà acquis par cette audience sont des critères de toute première importance. On pourrait donc envisager, au moins à un tout premier niveau d'analyse, de fonder une approche critique d'explication (E) sur les critères suivants :

E aboutit-elle à une mise en relation *correcte* de certaines grandeurs et/ou phénomènes physiques ?

E comporte-elle une *incohérence interne explicite* ?

E viole-t-elle explicitement une loi physique acceptée (*incohérence externe explicite*) ?

E *suggère-t-elle une incohérence interne ou externe* ?

E est-elle *complète* du point de vue de l'argumentation logique ?

E est-elle *simple* pour l'audience considérée ?

Comme on vient de le souligner, une telle liste résulte nécessairement d'un choix, elle n'est pas forcément complète ni adaptée à tous les supports. Ainsi la présence d'images appelle la mise en œuvre de critères relatifs aux pièges habituels de l'iconographie [2], non mentionnés ici. Il faut aussi souligner d'emblée que répondre aux questions d'une telle grille peut se révéler délicat, ou encore que ces questions empiètent l'une sur l'autre. C'est le cas pour un oubli de variable, comme lorsqu'on affirme sans considération de sa forme qu'un objet fait de matériau plus dense que l'eau ne peut flotter. Cette faille peut être qualifiée d'incomplétude logique (on n'a pas dit ce qu'il en est des objets en matériau plus dense que l'eau avec vide intérieur ou de forme adaptée à la flottaison) aussi bien que de contradiction flagrante d'un fait d'observation courante (on laisse penser que les bateaux en acier ne flottent pas). L'incomplétude logique, c'est-à-dire l'absence d'un argument pourtant nécessaire pour assurer la validité d'un raisonnement, peut elle-même prendre plusieurs formes. Elle peut résider dans un maillon logique manquant au sein d'une argumentation, comme lorsqu'on s'appuie sans justification sur la constance dans le temps de la composition atmosphérique en carbone 14 pour expliquer le procédé de datation du même nom [3]. Nous suggérons de retenir ici ce type de cas, comme devant être prioritairement détecté. En revanche, si l'on s'attachait à tous les prérequis d'une argumentation qui ne sont pas rappelés dans un texte explicatif, il n'existerait pas d'explication complète, et ce critère serait dès lors peu opérationnel. Du moins peut-on parler d'explication *plus ou moins* complète sur le plan logique. Bref, il faut garder à l'esprit qu'une telle liste de critères n'appelle pas de réponse tranchée, et n'est là que pour susciter la réflexion. Sans doute ceci est-il particulièrement vrai pour le critère de simplicité, dont l'appréciation est fortement dépendante du vécu personnel et des acquis conceptuels des personnes constituant la cible de l'explication.

L'exemple des piles

Voyons comme un tel outil de réflexion peut s'appliquer à un sujet délicat : les piles. A cette fin, considérons deux explications candidates pour une pile Daniell, dont la Figure 1 rappelle les éléments constitutifs et le fonctionnement dans le cas d'une pile en décharge [4].

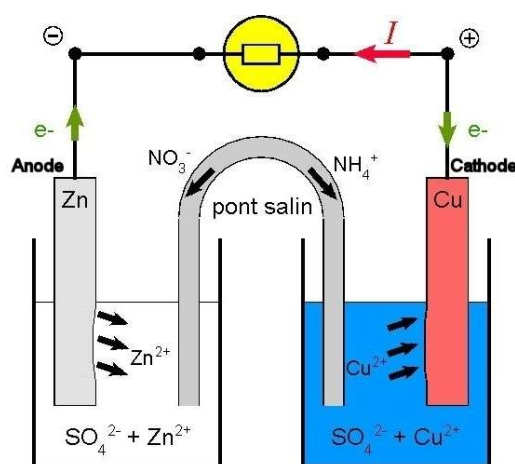


Figure 1. Une pile Daniell en situation de décharge

Explication E1

En circuit ouvert, l'électrode en zinc est à un potentiel négatif par rapport à l'électrode en cuivre. En circuit fermé sur des résistors, les électrons circulent dans le fil de conduction externe de l'électrode en zinc à l'électrode en cuivre, tandis que des ions Zn^{2+} passent en

solution et des ions Cu^{2+} se recombinent sur l'électrode en cuivre à des électrons qui arrivent du conducteur externe. L'énergie nécessaire à la circulation des charges est de nature chimique.

La tension U aux bornes de la pile est fonction de l'intensité I du courant qu'elle débite : $U = E - rI$ où E est la "force électromotrice" de la pile et r la résistance interne de la pile. [4]

Cette explication utilise des éléments d'information exacts. Les phrases qui la constituent sont en effet correctes. Mais elle ouvre un espace d'interrogation que l'allusion à l'énergie 'de nature chimique' ne comble pas. Comment en effet se fait-il que les cations des solutions présentes au sein de la pile se déplacent vers une électrode positive, en contradiction apparente avec ce que l'on sait des lois de l'électrostatique ?

Il est certes de règle de fournir, à l'appui de EI , des éléments sur l'origine de l'énergie en question.

Une explication typique dans ce registre est la suivante [4] (Maxicours.com). Après une présentation de chaque demi pile et du couple redox impliqué, la conclusion est que "Cette réaction ($\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})} + \text{Zn}_{(\text{s})} \rightarrow \text{Cu}_{(\text{s})} + \text{Zn}^{2+}_{(\text{aq})}$) est la réaction spontanée qui a lieu entre les ions cuivre et le zinc. Elle libère de l'énergie. C'est l'énergie chimique liée à cette réaction qui est exploitée par la pile et récupérée en partie sous la forme d'énergie électrique."

Mais, encore une fois, comment se fait-il que les cations des solutions présentes au sein de la pile se déplacent vers une électrode positive?

On a parlé à ce propos de "champ électromoteur", ainsi Bruhat [5] : "La caractéristique essentielle d'un générateur est de faire régner, par des mécanismes divers, un champ électromoteur" (p. 251), champ dont la fonction est explicitée par un schéma reproduit en Figure 2.

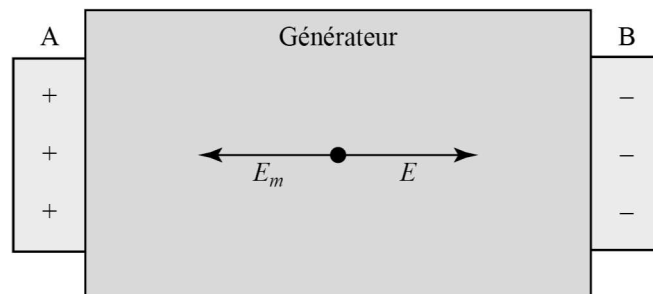


Figure 2. Schéma illustrant le champ électrique (E) et le champ électromoteur (E_m) au sein d'un générateur, selon Bruhat [5, p. 251].

L'allusion à des "mécanismes divers" est fort sibylline. Il arrive aussi que l'on applique à la pile une définition de la force électromotrice comme "travail de force non conservative par unité de charge" [6], ce qui n'est guère plus éclairant, d'autant qu'aucune charge, dans une pile, ne fait le tour du circuit.

On est donc devant une apparente incohérence dans la mesure où une personne non avertie pourrait croire que les charges positives circulent dans la pile en "remontant" le potentiel, puisqu'elles vont vers une électrode "positive". Or cette incohérence n'est pas levée par les justifications classiquement apportées quant à l'origine de ce phénomène. Et d'ailleurs, même si l'on admet que le problème est réglé, d'un point de vue énergétique, pour les ions Cu^{2+} et Zn^{2+} , qu'en est-il des ions NH_4^+ et NO_3^- qui circulent dans le pont salin? Pourquoi eux se déplacent-ils comme on nous l'indique, c'est-à-dire dans un sens apparemment paradoxal?

Serait-ce que, comme le suggérait un étudiant interrogé par Garnett et Treagust [7, p.1091], les anions et les cations ont changé de signe de charge?

En bref, cette explication ne comporte pas d'erreur factuelle. Elle est simple. Mais elle comporte un manque important concernant la circulation des charges au sein de la pile, manque qui laisse place à une impression d'incohérence. Un rapprochement avec le cas de la circulation des charges dans un électrolyseur n'est pas non plus pour rassurer un non-spécialiste, puisque cette fois ce sont les anions qui se dirigent vers l'électrode positive.

On peut donc proposer pour cette explication un diagnostic de qualité résumé par la Table 1.

Table 1. Analyse multicritères de l'explication E_1

Question/critère	Réponse à cette question	Contribution du critère à la qualité de l'explication
E_1 aboutit-elle à une mise en relation <i>correcte</i> de certaines grandeurs et/ou phénomènes physiques ?	Oui	+
E_1 comporte-elle une <i>incohérence interne explicite</i> ?	Non	+
E_1 viole-t-elle explicitement une loi physique acceptée (<i>incohérence externe explicite</i>) ?	Non	+
E_1 suggère-t-elle une <i>incohérence interne ou externe</i> ?	Oui	-
E_1 est-elle <i>complète</i> du point de vue de l'argumentation logique ?	Non	-
E_1 est-elle <i>simple</i> ?	Oui	+

Explication E2

Une seconde explication s'offre à la comparaison. La voici [8, p. 75] :

Chacun des métaux constituant une électrode impose un saut de potentiel entre cette électrode et la solution à son contact (Fig. 3). On a ainsi, du côté du zinc

$$V_{\text{électrode Zn}} - V_{\text{sol1}} = \Delta V_{\text{Zn}}$$

et du côté du cuivre

$$V_{\text{électrode Cu}} - V_{\text{sol2}} = \Delta V_{\text{Cu}}$$

De plus $\Delta V_{\text{Cu}} > \Delta V_{\text{Zn}}$

En situation de décharge, les électrons du conducteur externe vont de l'électrode Zinc vers l'électrode Cuivre, qui est à un potentiel supérieur. Au sein de la pile, les cations se dirigent également vers l'électrode Cuivre, ce qui peut surprendre. Le nœud de l'affaire est la discontinuité (à l'échelle macroscopique) du potentiel entre chaque électrode et la solution à son contact. La relation $\Delta V_{\text{Cu}} > \Delta V_{\text{Zn}}$ permet qu'entre les bornes Zn et Cu, la différence de potentiel soit de signe différent selon que l'on considère les électrodes ($V_{\text{électrode Cu}} > V_{\text{électrode Zn}}$) ou les solutions à leur contact ($V_{\text{sol2}} < V_{\text{sol1}}$).

La tension U aux bornes de la pile est fonction de l'intensité I du courant qu'elle débite : $U = E - rI$ où E est la "force électromotrice" de la pile et vaut $E = \Delta V_{Cu} - \Delta V_{Zn}$; r est la résistance interne de la pile.

Notons que si on impose aux deux électrodes une différence de potentiel supérieure à $\Delta V_{Cu} - \Delta V_{Zn}$, comme pour une pile en recharge, les charges positives internes à la pile vont aller dans le sens opposé au cas de la pile en décharge, sans qu'il y ait là d'incohérence avec la relation $\mathbf{E} = -\text{grad } V$.

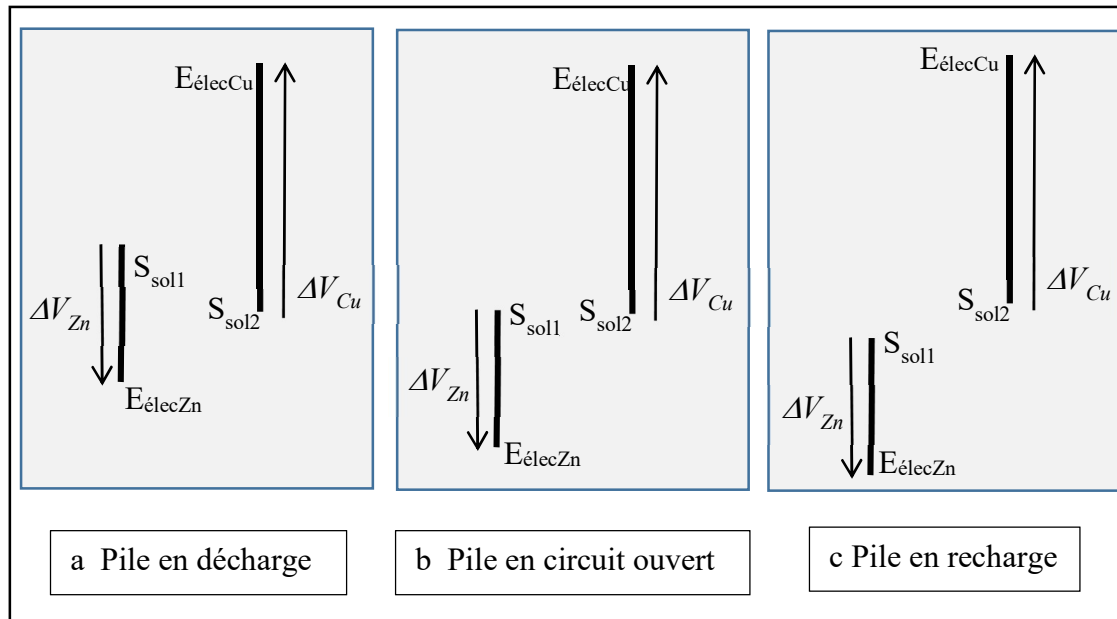


Figure 3. Valeurs respectives du potentiel électrique au niveau des bornes de la pile, sur l'électrode (points E) ou dans la solution au contact (points S).

Cas a, pile en décharge. Le potentiel en S_{sol1} est supérieur au potentiel en S_{sol2} , les cations se déplacent en direction de la borne cuivre ($V_{S_{\text{sol1}}} > V_{S_{\text{sol2}}}$).

Cas b, pile en circuit ouvert. Les potentiels en S_{sol1} et en S_{sol2} sont égaux, il n'y a pas de déplacement (d'ensemble) de charges.

Cas c, pile en recharge. Le potentiel en S_{sol1} est inférieur au potentiel en S_{sol2} , les cations se déplacent en direction de la borne zinc ($V_{S_{\text{sol2}}} > V_{S_{\text{sol1}}}$).

Le détail des chutes ohmiques dans la solution aqueuse 1 ($ZnSO_4$), le pont salin (NH_4NO_3), et la solution aqueuse 2 ($CuSO_4$) n'est pas représenté sur ces schémas.

Comme pour l'explication EI , rien n'est dit sur l'origine électrochimique des sauts de potentiels en cause. En revanche le mystère des circulations d'ions positifs au sein de la pile est levé. Une fois admise l'existence de ces sauts de potentiel entre électrodes et solutions à leur contact, la loi de l'électrostatique ($\mathbf{E} = -\text{grad } V$) s'applique partout sans encombre. Il n'y a plus déconnexion entre l'extérieur de la pile, qui relèverait de l'électricité, et l'intérieur qui relèverait seulement de la chimie, comme c'est le cas en explication E1.

Table 2. Analyse multicritères de l'explication E_2

Question/critère	Réponse à cette question	Contribution du critère à la qualité de l'explication
E_2 aboutit-elle à une mise en relation <i>correcte</i> de certaines grandeurs et/ou phénomènes physiques ?	Oui	+
E_2 comporte-elle une <i>incohérence interne explicite</i> ?	Non	+
E_2 viole-t-elle explicitement une loi physique acceptée (<i>incohérence externe explicite</i>) ?	Non	+
E_2 suggère-t-elle une <i>incohérence interne ou externe</i> ?	Non	+
E_2 est-elle <i>complète</i> du point de vue de l'argumentation logique ?	Non, mais plus complète que E_1 Il manque les mêmes prérequis électrochimiques mais le mouvement des cations dans la pile cesse d'apparaître comme une exception aux lois de l'électrostatique.	-
E_2 est-elle <i>simple</i> ?	Moins que E_1 mais pas beaucoup moins.	+

Avec les Tables 1 et 2, on obtient une sorte de tableau de bord sur lequel fonder un choix, en fonction des bénéficiaires supposés de l'explication (soi-même, un élève de lycée ou un étudiant d'université, ...).

On peut souligner d'abord qu'il n'est pas simple de mettre en œuvre cette grille d'analyse. La réponse à la question que pose chaque critère n'est pas nécessairement univoque ni binaire. C'est particulièrement le cas du critère de complétude. Comme annoncé plus haut, toute explication commence quelque part et ses prérequis, dès lors qu'ils ne sont pas rappelés, désignent une incomplétude. Ici, le détail des mécanismes électrochimiques au niveau des électrodes, non discuté ici, n'est rappelé dans aucune des deux explications, qui sont donc équivalentes de ce point de vue: ce point n'est donc pas discriminant. En revanche, le défaut de justification quant aux charges positives qui semblent remonter les potentiels fait la différence entre E_1 et E_2 sur le plan de la complétude. E_2 paraît *plus* complète que E_1 . Par ricochet, E_2 évite de *suggérer* une incohérence et apparaît donc comme plus satisfaisante. Là aussi, une réponse binaire se révèle inappropriée, car il n'y a pas d'incohérence explicite dans E_1 .

On observe aussi toute la marge de manœuvre que laisse l'évaluation de la simplicité d'une explication. Un jugement sur cet aspect restera très marqué, sans doute, par le vécu personnel d'un enseignant et ce qu'il suppose difficile pour ses élèves. Ici, l'explication E_1 semble a priori simple du point de vue des éléments conceptuels mis en œuvre : attraction et répulsion d'un électron par des bornes positives ou négative, et source d'énergie désignée sinon expliquée. De son côté, E_2 est simple puisqu'un seul concept structure l'explication – le potentiel électrique - l'impasse explicative se centrant, comme pour E_1 , sur les discontinuités (à l'échelle macroscopique) de cette grandeur entre électrode et solution. Mais la (petite) formalisation

algébrique qui amène à comprendre aussi bien la recharge que la décharge d'une pile peut amener la conclusion que $E2$ est plus complexe que $E1$.

En bref, renseigner les Tables 1 et 2 ne relève pas d'un classement tranché et indiscutable, l'idée est seulement que la liste des critères envisagés peut stimuler et organiser l'analyse critique. D'ailleurs libre à chacun d'établir la liste qui lui semble la plus propice à cet effet.

À l'heure du choix

Il n'est pas dans l'esprit de cet article de déboucher sur la prescription d'un choix entre explications, ici $E1$ ou $E2$, autrement dit la démarche proposée ne prétend pas fournir un algorithme de décision. Par principe, tout choix d'explication à usage scolaire ou universitaire doit prendre en compte non seulement la population visée et les concepts en principe déjà maîtrisés, mais aussi les liens que l'on souhaite faire apparaître, le temps disponible, etc. Ce texte veut avant tout illustrer une démarche, à savoir une analyse des avantages et des inconvénients d'un texte explicatif sur la base d'une liste de critères, visant à *éclairer* une décision. Celle-ci prendra le plus souvent la forme d'un compromis sauf dans le cas où *tous* les critères désigneraient comme préférable l'une des explications examinées. Bien entendu le même travail d'analyse pourra parfois simplement conduire à enrichir une explication utilisée de longue date. Mais ici, des deux explications analysées, seule l'explication $E2$ permet d'intégrer les potentiels standards des deux couples dans une analyse respectant les lois de l'électricité, de localiser la chute ohmique ($-rI$) et de faire comprendre que cette chute ohmique est liée, comme celle qui a lieu à l'extérieur de la pile, à une circulation de porteurs de charge.

Le dilemme qui se présente ici, comme souvent, peut se résumer de façon lapidaire : cohérence (à la faveur d'une plus grande complétude) ou simplicité ? Des stagiaires consultés en entretien individuel à ce propos, sur ce thème physique ou sur d'autres, révèlent souvent leur difficulté à trancher entre ces deux bénéfices lorsque ceux-ci apparaissent incompatibles. On a pu observer, lors d'enquêtes auprès d'enseignants stagiaires (MEEF 2, voir [2]), qu'une explication pouvait être jugée très insatisfaisante voire incohérente et être pourtant retenue pour un usage en classe, au motif d'une plus grande simplicité. Ce n'est donc pas nécessairement un défaut d'analyse critique qui explique un tel choix. Mais lorsque ce dilemme est, comme ici, mis à plat via une analyse explicite, les avis se révèlent partagés. "C'est une simplicité trompeuse", ou encore "J'ai l'impression que lorsqu'on simplifie on perd complètement le sens de ce qu'on essaie d'expliquer" : ces commentaires (recueillis à propos du thème de l'ascension capillaire [1, 2]) traduisent une conscience réelle des termes du débat, qui peut aller jusqu'au malaise : "Je vais utiliser cette explication (reconnue problématique) mais je me déteste" dira l'un des stagiaires interrogés à ce propos, avant d'ailleurs de revenir vers un choix de plus grande cohérence.

Parmi les arguments du débat, il y a bien sûr l'idée qu'on ne peut pas tout dire d'emblée à des novices en sciences, et que l'on pourra revenir ensuite sur le sujet, dans une démarche spiralee. Toute la question reste alors celle du bilan bénéfices/coût, à chaque étage de la dite spirale. Il s'agit par exemple de savoir si l'on a vraiment besoin de passer par l'étape d'une montgolfière isobare, ou si la possibilité d'extension d'une analyse à une situation voisine de la pile en décharge ou en circuit ouvert, ici la pile en recharge, ne mérite pas qu'on s'y attarde. Du côté des coûts, il faut aussi compter, à écouter les enseignants en formation, la crainte que leurs collègues, voire les futurs examinateurs de leurs élèves, désapprouvent une explication inhabituelle : "Si je donne l'explication X mais que c'est l'explication Y qui est attendue à l'examen, alors cela va défavoriser mes élèves..." Il n'est pas anodin, à ce propos, que l'explication $E2$ dont nous explicitons les caractères ne se trouve actuellement dans aucun manuel du secondaire en France. On l'a dit, la démarche proposée ici ne fournit aucun algorithme de décision. Mais les enseignants stagiaires consultés se rejoignent largement sur l'idée que, quelque en soit l'issue, il est appréciable qu'un choix d'explication se fasse en toute

lucidité quant aux critères qui ont finalement prévalu. Ils précisent aussi que l'explicitation de critères d'évaluation peut faciliter la discussion entre collègues. En tout cas, il n'est pas très risqué d'avancer qu'une telle activité puisse être très utile en formation d'enseignant.

Références

- [1] L. Viennot & N. Décamp, « Activation of a critical attitude in prospective teachers: from research investigations to guidelines for teacher education, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 14, 010133, 2018 <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010133>
- [2] L. Viennot & N. Décamp, *L'apprentissage de la critique Développer l'analyse critique en physique*, Les Ulis: EDP Sciences-UGA (Grenoble), 2019.
- [3] N. Décamp & L. Viennot, « Co-development of conceptual understanding and critical attitude Analysing texts on radio-carbon dating», *International Journal of Science Education*, 37 (12), p. 2038-2063, 2015. <http://dx.doi.org/10.1080/09500693.2015.1061720>.
- [4] <https://www.maxicours.com/se/cours/fonctionnement-d-une-pile/>
- [5] G. Bruhat, *Électricité*. Paris : Masson & Cie, 1963
- [6] I. Garzón, M. De Cock, K. Zuza, P. Van Kampen, & J. Guisasola, J., « Probing university students' understanding of electromotive force in electricity». *American Journal of Physics*, 82(1), p. 72-79, 2014.
- [7] P.J. Garnett & D. F. Treagust, « Conceptual Difficulties Experienced by Senior High School Students of Electrochemistry: Electrochemical (Galvanic) and Electrolytic Cells», *Journal of Research In Science Teaching* 29(10), p. 1079,1992.
- [8] C. Lefrou, P. Fabry, P. & J.-C. Poignet, J.-C. (2013). *Électrochimie : concepts fondamentaux illustrés*. Les Ulis : EDP Sciences.