



HAL
open science

Confusions entre concept et formalisation dans la communauté des enseignants de sciences physiques. Comprenons-nous encore ce que nous enseignons ?

Eddie Smigiel

► To cite this version:

Eddie Smigiel. Confusions entre concept et formalisation dans la communauté des enseignants de sciences physiques. Comprenons-nous encore ce que nous enseignons ?. 2014. hal-01091869

HAL Id: hal-01091869

<https://hal.science/hal-01091869>

Preprint submitted on 7 Dec 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Confusions entre concept et formalisation dans la communauté des enseignants de sciences physiques. Comprendons-nous encore ce que nous enseignons ?

Eddie Smigiel
Maître de conférences
INSA de Strasbourg
24, Bd de la Victoire
67084 Strasbourg Cedex
eddie.smigiel@insa-strasbourg.fr

Résumé :

Cette étude s'intéresse aux liens entre les concepts physiques et les formalismes mathématiques qui les traduisent. Un concept physique devrait être présenté dans un rapport épistémologique à la discipline, sans le confondre avec le formalisme qui le traduit. Pour mettre en évidence les confusions entre concept et formalisation, on utilise la notion de divergence d'un champ vectoriel. On a demandé, par sondage Internet à une grande partie de la communauté des physiciens français, de donner la définition de la divergence d'un champ vectoriel. 80% des réponses exprimées donne comme définition la somme des dérivées partielles des composantes du champ par rapport aux coordonnées correspondantes. Toutefois, cette expression ne saurait valoir pour définition parce qu'elle rompt avec la filiation des idées depuis les concepts amonts jusqu'aux concepts nouveaux et parce que, ainsi exprimé, on ne saurait y attacher une signification physique. Elle suggère que la physique est une vérité révélée faite de formules qui apparaissent ex nihilo et renvoie la discipline dans le champ de la pensée magique. La divergence est définie de façon didactique, par exemple à partir du théorème de Gauss qui en tant que relation intégrale ne permet pas de préciser la répartition de la charge dans le volume enfermé. Pour affiner, il est nécessaire de diviser le volume en quantités plus petites et à la limite, il faut diviser ce volume à l'infini. Ainsi, peut-on définir la divergence du champ électrique comme limite du flux volumique du champ à travers une surface fermée quand le volume tend vers 0. Le nouveau concept est enraciné dans des connaissances préalables dont on a mis en évidence les limites, il les prolonge et prend de la signification.

Il est étonnant que cette définition soit si peu représentée dans les réponses au sondage. Ces résultats posent la question de l'introspection des enseignants sur le sens physique des éléments qu'ils présentent. Peut-on se contenter de parachuter des formules abscones et suggérer ainsi que l'épistémologie de la physique consiste essentiellement en la manipulation symbolique de quantités vidées de leur signification ? Au risque d'être outrancier et provocateur, comprenons-nous encore ce que nous enseignons ?

Cette étude a été présentée sous forme de poster, sans papier associé au 22ème congrès général de la Société Française de Physique qui s'est tenu à Marseille du 01^{er} au 05 juillet 2013.

1. Introduction

On a déjà mis en évidence la tendance française de surreprésenter les formalismes mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques. Dans un précédent papier, E. Smigiel et M. Sonntag [1] ont montré que le contrat didactique entre étudiants et enseignants repose implicitement sur la manipulation symbolique de formules qui, partant sont vidées de leur signification. Dans ce précédent papier, les auteurs montrent que les étudiants répondent par une formule mathématique à une question de physique, formule souvent fautive et quelquefois absurde. La signification physique du concept qui fait l'objet de la question est manifestement obérée. Ce même papier montre également que ce contrat didactique est probablement corrélé à la teneur des ouvrages de sciences physiques français qui laissent à penser que l'épistémologie de la physique est intimement liée à la manipulation symbolique de formules. Dans le présent papier, nous prétendons montrer que ce contrat didactique tire aussi sa force néfaste dans des confusions entre concept physique et sa formalisation mais cette fois dans l'esprit des enseignants eux-mêmes. Cette affirmation, si elle est

démontrée ne doit pas étonner outre mesure, puisque les enseignants sont en grande majorité les auteurs des ouvrages qui font la part trop belle aux manipulations symboliques au détriment du sens physique.

Ce papier expose un sondage réalisé auprès d'un effectif potentiel de 500 à 600 enseignants de physique qui enseignent dans des établissements de l'enseignement supérieur. Avant d'en présenter les résultats, nous exposons le concept de physique qui en a été l'objet, sa formalisation mathématique et les liens subtils qui peuvent amener à ne pas percevoir les enjeux pédagogiques cachés qui amènent aux effets pervers de sur-représentation des mathématiques qui sont un fléau dans la physique française.

2. La théorie : divergence d'un champ vectoriel

Pour définir le concept de divergence d'un champ vectoriel, nous nous plaçons dans le cas du théorème de Gauss pour le champ électrique. C'est généralement dans ce contexte que les étudiants rencontrent pour la première fois le concept d'intégrale de flux d'un champ à travers une surface. Ce n'est peut-être pas le contexte le plus favorable parce qu'il n'y a pas de transport de matière (masse ou charge électrique) qui rassurerait l'étudiant qui associe intuitivement à la notion de flux, un phénomène de transport. Il conviendrait certainement de présenter le concept de flux d'un champ à travers une surface dans le contexte du modèle microscopique de courant électrique ou de la mécanique des fluides.

Quoi qu'il en soit, rappelons le théorème de Gauss. Le flux du champ électrique à travers n'importe quelle surface fermée est égale à la charge électrique totale dans le volume enfermée par cette surface. On écrit, classiquement :

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{tot}}{\epsilon_0} \quad (1)$$

associé à la figure 1.

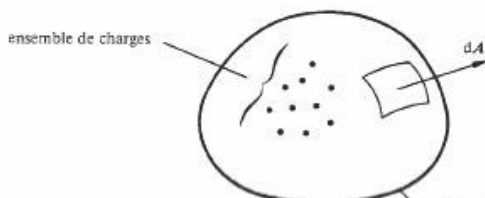


Fig. 1 : théorème de Gauss.

Exprimé sous sa forme intégrale, le théorème de Gauss porte sur une surface et un volume macroscopiques en ce sens qu'on peut les rendre aussi grand qu'on veut. Toutefois, ce résultat ne dit rien sur la manière dont cette charge totale enfermée par la surface est distribuée dans le volume intérieur. Si on souhaite en savoir plus sur la distribution des charges, il convient par exemple de diviser le volume correspondant à la surface de Gauss en deux et d'appliquer le théorème sur ces deux nouveaux objets. Cette opération permet d'affiner quelque peu la connaissance de la distribution des charges dans le volume de départ. Si on veut affiner davantage, à la limite, il convient de diviser le volume à l'infini. On définit donc la divergence du champ électrique comme la limite du flux volumique du champ électrique à travers une surface fermée quand ce volume tend vers 0. Ainsi, on obtient la définition porteuse de sens de laquelle va découler des résultats importants et classiques. Nous considérerons cette définition comme la première dans la suite du texte.

$$\operatorname{div} \vec{E} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}}{V} \quad (2)$$

Lorsqu'on réécrit le théorème de Gauss classique (sous forme intégrale) et qu'on applique aux deux membres de l'équation la division par le volume puis le passage à la limite quand ce volume tend vers 0, on obtient évidemment la divergence du champ électrique dans le membre de gauche tandis que la charge électrique totale divisée par le volume tend vers la densité locale de charge soit la première équation de Maxwell, dite de Maxwell-Gauss qui n'est jamais que la reformulation différentielle de sa forme intégrale :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

Il est nécessaire de diviser le flux par le volume parce que, à la limite, le flux tend vers 0, le volume également et par conséquent, il faut définir une grandeur obtenue par le rapport de deux grandeurs qui tendent toutes deux vers 0.

Dans une grande mesure, ce nouveau concept de divergence est assez proche du concept élémentaire de vitesse instantanée. Si on définit la distance totale parcourue au cours d'un trajet, on n'a aucune idée sur la manière dont ce trajet a été parcouru d'un point de vue cinématique. On commence par définir la vitesse moyenne en divisant la distance parcourue par le temps de parcours puis on fait tendre le temps de parcours vers 0 de manière à définir la vitesse instantanée. Ainsi, la divergence d'un champ vectoriel est définie comme une opération de différenciation spatiale. Elle permet d'obtenir le flux volumique local, défini en chaque point d'espace de la même manière que la vitesse instantanée définit la vitesse en chaque point du temps.

A partir de la définition de la divergence comme limite du flux volumique quand le volume tend vers 0, on retrouve la formulation intégrale qui conduit à la fameuse formule de Green-Ostrogradsky que nous considérerons comme notre deuxième définition dans la suite du texte.

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \operatorname{div} \vec{E} \cdot dV \quad (4)$$

Si on reprend l'analogie précieuse avec la vitesse instantanée, il importe de comprendre que la formule d'Ostrogradsky n'est jamais que la reformulation intégrale de la définition de la divergence tout comme les deux équations suivantes sont strictement équivalentes (dans le cas d'une cinématique sur l'axe x) :

$$v_i(t) = \frac{dx}{dt} \quad \text{et} \quad \Delta x = x_f - x_i = \int_{t_i}^{t_f} v_i(t) \cdot dt$$

Il n'y a dans la formulation intégrale ni plus ni moins d'information que dans la formulation différentielle. Ainsi les équations (2) et (4) sont-elles rigoureusement équivalentes et c'est à peine s'il est légitime de parler de théorème d'Ostrogradsky tant on passe de la formulation différentielle à la formulation intégrale de façon quasi-immédiate. Sur un plan pédagogique, toutefois, laquelle vaut mieux ? Il nous semble clair que la formulation différentielle est plus signifiante. Tout comme il serait étrange de définir la vitesse instantanée par la relation intégrale, il semble évident qu'il vaut mieux définir la divergence d'un champ vectoriel par la formulation différentielle.

Quand le champ vectoriel est décrit par ses coordonnées cartésiennes, un calcul simple permet d'exprimer sa divergence de façon opérationnelle selon le calcul suivant. Il consiste à définir un volume parallélépipède rectangle infiniment petit défini par des petites variations dx, dy et dz des

trois coordonnées. Le calcul est détaillé dans le cours de physique de Berkeley [2] auquel on renvoie le lecteur.

On trouve finalement :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \quad (5)$$

Est-il pertinent de donner ce résultat comme définition de la divergence d'un champ vectoriel ? Nous ne le pensons pas. Elle est établie à partir de notre première définition (formulation différentielle). Il sera assez aisé en partant de cette première définition de trouver l'expression de la divergence dans d'autres systèmes de coordonnées (cylindrique ou sphérique).

Pour conclure sur cette première partie, nous affirmons que les trois résultats procèdent d'une hiérarchie didactique qui interdit de les considérer comme également signifiante.

La première définition résulte du besoin de dépasser la formulation intégrale du théorème de Gauss qui ne permet pas de déterminer la distribution précise des charges dans le volume macroscopique. La deuxième définition découle de la première en reformulant sous forme intégrale pour mettre en rapport l'intégrale de flux avec l'intégrale volumique de la divergence. La hiérarchie didactique procède de la culture des étudiants qui intègrent plus difficilement qu'ils ne différentient. Enfin, le troisième résultat ne devrait pas selon nous être considéré comme une définition ne serait-ce que parce qu'il est difficile d'y lier une signification. Elle est une formule opérationnelle qui permet d'exprimer concrètement la divergence d'un champ quand on en connaît les coordonnées cartésiennes.

Il importe de comprendre les enjeux pédagogiques ou didactiques qui se cachent derrière les valeurs de ces définitions ou formulations d'un même concept de physique. La première définition est nécessaire pour dépasser les limites de la formulation du théorème de Gauss sous forme intégrale : elle la prolonge, l'affine et s'articule naturellement avec ce qui précède. Ainsi, le nouveau concept est-il enraciné dans une filiation des idées. Il ne tombe pas du ciel, mais est relié à ce qu'est censé avoir compris l'étudiant pour peu qu'il ait digéré raisonnablement les idées ascendantes. Dans la mesure où l'étudiant a compris la nécessité du concept eu égard aux limites de celui dont il est l'héritier direct, il y associe un sens profond qui en structure la compréhension, l'assimilation et l'appropriation opérationnelle. Il faut insister également sur le fait que le concept de divergence correspond à une différentielle spatiale. On a déjà vu que dans une grande mesure, qu'il est assez proche de la définition de la vitesse instantanée qui est un concept très fondateur de la physique que la plupart des étudiants s'approprient bien et surtout qui est devenu, au moment des études supérieures, une part intégrante de la culture des apprenants. Lorsqu'on a l'occasion quand on découvre un nouveau concept de pouvoir s'appuyer sur un concept proche devenu culture pour l'étudiant, il est évident que l'enseignant devra exploiter cette proximité. Bien que la deuxième définition (la formule de Green-Ostrogradsky) soit mathématiquement strictement équivalente, elle est certainement moins pertinente parce qu'elle cumule à l'idée nouvelle sa reformulation intégrale. Si le cumul du concept à sa reformulation ne pose pas de problème au physicien confirmé, il n'en va certainement pas de même pour l'étudiant pour qui il est bien préférable, autant que faire se peut, d'isoler un concept dans sa forme la plus nue et la plus signifiante sans la subtilité d'une reformulation mathématique qui ajoute aux difficultés d'être confronté à une idée nouvelle.

Enfin, la formule opérationnelle donnée par l'équation 5, si elle est donnée en guise de définition de la divergence d'un champ de vecteur, elle prive l'étudiant de la filiation rationnelle des idées depuis le théorème de Gauss et suggère ainsi implicitement que le concept apparaît ex nihilo, et véhicule insidieusement l'idée selon laquelle la physique relève de la vérité révélée, la pensée magique. On aboutit alors à une physique « hocus pocus », une forme moderne d'alchimie dans laquelle la formule relève de l'art divinatoire : la résolution des problèmes revient à une incantation de la bonne

formule par un savant « sorcier » initié, privilège d'un petit nombre qui ont accès au mystère.

On notera que les éléments décrits dans les lignes qui précèdent sont présentés dans l'ordre dans lequel le fait le fameux cours de physique de Berkeley qui date de 1965.

3. Le sondage

La question est à présent de savoir comment ces éléments sont vécus sur le terrain des amphithéâtres et salles de Travaux Dirigés. Pour tenter d'y répondre, un sondage a été réalisé sous forme de formulaire Internet avec en préliminaire, quelques lignes sur la nature de la démarche qui y était présentée comme une initiative d'un enseignant-chercheur qui s'intéresse à la didactique de la physique et qui s' « efforce de comprendre les liens entre les concepts de la discipline et les formalismes mathématiques qui les décrivent et surtout, les représentations que se font de ces liens, étudiants et enseignants ». Le questionnaire très simple invitait à répondre à deux questions : la première était libellée comme suit : « Définir la divergence d'un champ vectoriel noté A » et invitait à répondre sans document dans l'espace de trois minutes en mode texte au clavier standard sans éditeur d'équation spécifique : on suggérait d'entrer les équations sous forme approximative (par exemple, somme intégrale de a à b de $f(t)dt$) c'est-à-dire sous forme de pseudo-équation. Cette durée a été choisie suffisamment courte pour favoriser une certaine spontanéité des réponses et mettre ainsi en exergue la culture sur ce concept des enseignants tout en permettant une rapide réflexion. La deuxième question proposait de s'identifier comme a) Etudiant (jusqu'au niveau Bac+5) ; b) non spécialiste de ce concept (vous le connaissez sans plus) ; c) connaisseur : c'est un concept important dans votre champ de pratique (enseignement / recherche) mais vous n'en faites pas un usage intensif ou régulier ; d) spécialiste : vous l'utilisez régulièrement dans votre pratique professionnelle (enseignements / recherche). Ainsi, l'exploitation des résultats du sondage allaient permettre d'affiner l'analyse des représentations des enseignants en fonction de l'idée qu'ils se font de leur expertise en ce domaine. Ajoutons que les réponses sont horodatées ce qui permet d'en exprimer l'évolution dynamique.

Le lien du sondage a été transmis aux autorités des UFR de sciences de la plupart des universités françaises qui en disposent (une quarantaine) avec quelques lignes d'explications du contexte et la prière de diffuser auprès des physiciens de la structure. Entre les titulaires et les doctorants, on peut estimer (il s'agit bien d'une estimation très grossière) à 500 à 600 le nombre de destinataires potentiels du sondage. Il n'y a toutefois aucun moyen de déterminer avec précision le nombre de destinataires réels. Le but de l'auteur était de réunir un nombre significatif de réponses pour illustrer le propos mais pas de faire une étude quantitative exhaustive de l'ensemble des physiciens français. Il faut noter que le sondage était adressé aux enseignants (y compris doctorants) mais pas a priori aux étudiants (jusqu'au niveau Master). On ne pouvait toutefois pas exclure la possibilité de toucher des étudiants (représentants dans les conseils d'UFR, par exemple). Mais en réalité, très peu ont répondu. Les réponses ont été de deux types : le premier, le plus fréquent, une pseudo-équation (ainsi désigné dans la suite du papier) a été donnée (par exemple, $\text{div } A = dA_x/dx + dA_y/dy + dA_z/dz$) très explicite malgré la graphie peu conventionnelle. Le second type, plus rare, donnait une définition en toutes lettres ; dans ce cas de figure et chaque fois que ça a été possible, ce type de réponse a été associé à une des trois équations du paragraphe 1. Il convient de noter que certaines réponses combinaient pseudo-équation et traduction de cette pseudo-équation en toutes lettres. D'autres faisaient une référence lointaine à une des trois équations du paragraphe 1 et ont alors été rangées dans la catégorie correspondante. Il reste quelques réponses que l'auteur a eu du mal à ranger dans l'une des catégories. Ainsi, la traduction des réponses brutes du sondage dans les tables ci-dessous relèvent-elle dans une petite mesure de l'interprétation de l'auteur pour moins de 10 % des réponses. Dans bien des cas, la pseudo-équation était suffisamment explicite (souvent $\text{div } A = dA_x/dx + dA_y/dy + dA_z/dz$ ou équivalent) pour qu'elle ne soit pas ambiguë.

Les réponses sont données très majoritairement sous forme d'équation ou pseudo-équation.

Quelquefois, elle est complétée par un texte mais à 5 exceptions près (sur le total des réponses, soit 76 réponses), toutes les réponses incorporent une équation ou pseudo-équation. Table 1 indique dans la mesure du possible comment les réponses sont réparties sur les trois équations du paragraphe 1. Il importe de noter que le taux élevé de réponses pour l'équation 5 est certain dans la mesure où il a toujours été donné avec une pseudo-équation très explicite et lisible. Les taux pour les équations 2 et 4 sont entachés d'une incertitude parce que souvent donné sous forme de texte quelque peu interprété par l'auteur.

Taux de réponses (en pourcentage au sein de la catégorie)	Limite du flux volumique, équation 2	Formule de Green-Ostrogradsky, équation 4	Somme des dérivées partielles en coordonnées cartésiennes, équation 5
Etudiant	0	0	100
Non-spécialiste	0	0	100
Connaisseur	9	12	79
Spécialiste	12	13	75

Table 2 : répartition des réponses sur les équations (2), (4) et (5) du paragraphe 1. Dans la catégorie « Spécialistes », 12 % a répondu par la limite du flux volumique (équation 2), 13 % a répondu par la formule de Green-Ostrogradsky (équation 4) et 75 % a répondu par la somme des dérivées partielles (équation 5).

4. Discussion et conclusion

Il convient en premier lieu de commenter le nombre de réponses reçues au total. Par comparaison à l'effectif potentiel de la cible (500 à 600), il est décevant : 76 réponses. On pourra objecter que ce nombre est trop faible pour tirer quelque conclusion que ce soit. L'auteur regrette certes, qu'il n'a pas été possible d'en obtenir davantage. Hélas, le courrier électronique sollicite trop aujourd'hui et il est compréhensible que l'efficacité de ce media soit faible. Toutefois, il faut noter que le taux de réponses correspondant à l'équation 5 de 80 % (toutes catégories confondues) a été obtenu tel quel au bout déjà de 10 réponses et qu'il est ensuite resté très stable. Il n'est ainsi pas absurde de conjecturer que ce taux est relativement représentatif au sein de la communauté sondée.

Dans la mesure où l'étude comporte les faiblesses inhérentes du media utilisé pour obtenir les réponses, de la méconnaissance du public qui a réellement répondu et qu'il comporte également une part d'interprétatif (sur un nombre toutefois très limité de réponses), l'auteur souhaite faire porter la discussion sur ce qui paraît le plus factuel et le plus certain dans l'ensemble des résultats et qui est de toute façon l'enseignement majeur de l'étude pour peu qu'on admette la conjecture de la représentativité avec un nombre de réponses assez faible. Il s'agit de l'importance écrasante du taux de l'équation 5 dont on a vu que c'est l'équation qui possède la valeur de définition du concept la plus faible voire à laquelle on peut contester la moindre valeur de définition. On ajoute que les quelques réponses qui font allusion à la notion de flux local, le font de façon très indirecte alors que « la limite du flux volumique de A à travers une surface fermée lorsque le volume enfermé tend vers 0 » est en somme une définition très explicite, pas si complexe, à analogie expressive avec le concept de vitesse instantané. Pourquoi cette définition est-elle si absente des réponses exprimées ? Pourquoi l'immense majorité des enseignants y compris parmi ceux qui se revendiquent spécialistes de la question donnent-ils une équation qui a si peu, voire pas du tout de valeur en tant que définition signifiante pour le concept ? Serait-ce parce que le fil des articulations des concepts a été rompu ? Bien que cette étude ne le démontre pas de façon formelle, ces questions méritent d'être posées.

Pour conclure cette discussion, on peut ajouter qu'il serait intéressant de regarder en détail ce que la littérature propose en guise de définition pour la divergence d'un champ vectoriel. On peut intuitivement imaginer un lien de cause à effet entre les représentations des enseignants et ce qui existe dans la littérature. Sans doute, cette étude mériterait-elle d'être conduite de façon aussi exhaustive et rigoureuse que possible. En attendant, force est de constater que dans la plupart des ouvrages français consultés par l'auteur, les définitions de la divergence ne sont jamais aussi claires que celle présentée dans le Berkeley et qui date de quasiment cinquante ans. A titre d'exemple, on considérera un ouvrage particulier non pas pour démontrer quoi que ce soit mais plutôt pour poser quelques questions qui prolongent le principal résultat assez dérangeant de cette étude.

Dans l'ouvrage dont nous ne donnerons pas la référence pour d'évidentes questions de bienséance, la définition du flux du champ électrostatique est donnée de façon très classique dans le chapitre 16. Le chapitre 17, consacré à la magnétostatique définit la circulation d'un vecteur sur un contour, montre le caractère conservatif du champ magnétostatique en ce sens que son flux à travers une surface fermée est nul. Le chapitre 18 consacré aux équations de Maxwell commence par l'induction et les quatre équations de Maxwell sous forme locale sont introduites dans le paragraphe 18.3. Le théorème d'Ostrogradsky est donné (admis) et fonde implicitement pour cet ouvrage la définition de la divergence d'un champ de vecteurs puisque c'est la première occurrence du concept de divergence. Le théorème semble « tomber » un peu du ciel (vérité révélée) mais difficile à s'approprier puisque l'équation n'est accompagnée d'aucun commentaire. Deux pages plus loin, les auteurs passent de la formulation intégrale du théorème de Gauss à sa formulation locale. Elle est basée sur l'utilisation du théorème d'Ostrogradsky dont il n'est pas certain que le lecteur ait pu s'approprier la signification. On peut voir cette démonstration comme un exemple de la physique « hocus pocus » puisqu'elle est basée sur une formule incantatoire peu ou mal définie, sans doute mal appropriée par le lecteur, qui permet un peu par magie de déboucher sur la formule désirée mais qui suggère que le savant doit être un peu « sorcier » pour deviner (au sens du devin) quelle formule dans la longue liste des formules auxquelles on n'a pas toujours pris soin d'y associer une signification forte doit être prononcée. Par ailleurs, la « démonstration » est totalement tautologique ; la formulation locale semble être démontrée. Toutefois, le théorème d'Ostrogradsky reformule sous forme intégrale la définition de la divergence. Ainsi, on démontre la formulation locale par la définition de cette même formulation locale. La démonstration est illusoire et repose sur elle-même.

Bien que l'examen de cette référence n'ait évidemment pas valeur de démonstration, on peut tout de même lorsqu'on l'associe au résultat du sondage auprès de physiciens confirmés, poser quelques questions sur les rapports épistémologiques que la communauté entretient avec sa discipline. Il semble donc qu'il soit possible d'enseigner des concepts sans en avoir compris l'essence ou en tout cas, sans en mesurer les enjeux didactiques. S'il est certes impossible en sciences physiques de tout comprendre, encore faut-il être lucide et connaître les limites de son expertise. L'écriture d'ouvrages n'est-elle devenue aujourd'hui que la simple reformulation d'ouvrages récents sans examen critique de la pertinence des arguments qui y sont exposés ? De façon générale, passe-t-on encore assez de temps en introspection de ce que nous avons réellement compris avant de l'enseigner ? Comprendons-nous encore ce que nous enseignons ?

Références

Smigiel, E., & Sonntag, M. (2013). A paradox in physics education in France. *Physics Education*, 48(4), 497. doi:10.1088/0031-9120/48/4/497

Purcell, E. M., Guthmann, C., & Lallemand, P. (1998). *Cours de physique de Berkeley, tome 2 : Électricité et magnétisme*. Paris: Dunod.