

COMMENT « DECONCEPTUALISER LES SCIENCES » OU LES VERTUS DE « L'APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE »

Richard-Emmanuel EASTES, Ecole Normale Supérieure (Paris)

Francine PELLAUD, Laboratoire de didactique et d'épistémologie des sciences (Genève)

MOTS-CLES : DECONCEPTUALISATION – PHENOMENOLOGIE – APPROCHE PEDAGOGIQUE – SCIENCE INCARNEE – EXPERIENCE CONTRE-INTUITIVE

RESUME : Parce qu'elle autorise à se passer de concepts scientifiques abstraits, l'approche « phénoménologique » de la science est utilisée dans certains domaines de recherche naissants et par les vulgarisateurs les plus aguerris. Encore rarement employée dans l'enseignement, elle permet pourtant de donner du sens à une expérience ou à un fait scientifique, sans nécessairement confronter l'élève aux concepts, lois et autres « formules » de l'approche conceptuelle habituelle. Elle permet ainsi d'éviter les écueils liés au passage à l'abstraction et à la formalisation.

ABSTRACT : Because it makes it possible to avoid abstract scientific concepts, the « phenomenological » approach of science is used in new research fields and by the best science popularizers. Still scarcely used in teaching, it still allowed to give sense to an experiment or a scientific fact without necessarily have the student to cope with concepts, laws and formulas of the usual conceptual approach. It thus wipes out the obstacles related to abstraction and formalisation.

INTRODUCTION

Un des problèmes fondamentaux de la vulgarisation de notions scientifiques complexes tient au fait que les scientifiques qui vulgarisent ne prennent souvent pas conscience de l'importance de dissocier l'approche descriptive et phénoménologique des comportements de la nature et les modèles, concepts et lois qui les représentent.

On peut ainsi entendre dans telle fête de science, sur le stand de chimistes tentant valeureusement de partager leur savoir, une explication de la « baisse de la température de fusion de la glace lorsqu'on y met du sel » faisant appel aux « potentiels chimiques des phases liquide et solide de l'eau ». Dans tous les musées scientifiques ou presque, il est possible d'admirer balles et ballons « léviter » dans le flux d'air d'une soufflerie... l'explication invoquée faisant systématiquement appel au fameux « théorème de Bernoulli », d'emploi si aisé mais d'interprétation si délicate. Ne parlons pas de la célèbre « Expérience de Galilée », en général explicitée par une reformulation plus ou moins habile du « principe fondamental de la dynamique »...

Le problème tient au fait que tout scientifique a acquis une connaissance des concepts et des modèles scientifiques telle, qu'il lui est tout naturel d'y faire appel pour expliquer un phénomène. Et bien nombreux sont ceux qui finissent par confondre réalité et modèles explicatifs.

Certains vulgarisateurs pourtant, échappent à cet écueil : les plus aguerris d'une part, comme le Prix Nobel de physique Richard Feynman dans ses nombreux ouvrages, ou le journaliste Jérôme Bonaldi dans ses extraordinaires séquences vidéo « Comment ça marche ? »¹ ; mais également ceux qui exposent les résultats de sciences expérimentales neuves telles que la physique des milieux granulaires, dont les concepts n'ont pas encore été forgés. Ils emploient alors une approche fondée sur l'observation, le bon sens, la mise en relation, l'analogie...

Les pages qui suivent proposent une caractérisation de cette approche particulière au regard des différences qu'elle présente avec l'approche traditionnellement conceptuelle de la médiation des connaissances scientifiques. Nous en proposons alors une généralisation et une rationalisation sous le vocable « d'approche phénoménologique déconceptualisée », avant de décrire le déroulement de l'atelier proposé aux participants des *JIES 2003*.

QU'EST-CE QU'UNE APPROCHE CONCEPTUELLE ?

Pour devenir prédictive et opérationnelle, une discipline scientifique a besoin de s'entourer de modèles, de concepts, de formalismes et d'abstraction. L'approche conceptuelle, qui est à la base même de l'enseignement actuel des sciences et qui inspire les pratiques de vulgarisation scientifique, consiste donc à apprendre à utiliser l'ensemble de ces outils de langage, de raisonnement et de représentation que sont les concepts, les lois et les formalismes imaginés par les spécialistes de cette discipline².

Comme nombre d'évaluations en didactique des sciences le montrent, cette approche n'est pas dénuée de dangers et d'écueils. A l'origine de bien des blocages, elle peut même être la cause de la construction d'une vision inexacte de la science et du monde, par les vulgarisateurs et les enseignants eux-mêmes. Pourquoi ? Parce qu'elle présente trois caractéristiques essentielles qui sont souvent oubliées :

- un « concept » est un outil descriptif avant d'être un objet naturel (force, orbitale...)
- une « loi » est souvent approximative et ne s'applique que dans des conditions particulières (loi de Hook, loi d'action des masses...)
- un « modèle » est une représentation théorisée et idéalisée du monde réel (modèle atomique de Bohr, modèle de la goutte d'eau sphérique...).

Or souvent, dans l'esprit de bien des enseignants et autres médiateurs des sciences, les lois semblent prévaloir sur les propriétés de la nature alors qu'elles n'en constituent que des modélisations approchées, des tentatives d'explicitation dans des domaines d'application plus ou moins restreints. N'entend-on pas souvent parler des « lois physiques qui régissent l'univers » ? Cette confusion entre « modèle » et « réalité » conduit à une perception de la science dogmatique, figée et inaccessible, qui se prolonge en une vision idéalisée du monde lui-même. Par suite, présenter la science selon une approche conceptuelle implique à la fois :

- d'accompagner les apprenants dans la construction intellectuelle des outils conceptuels au travers d'une approche aussi heuristique que possible, en leur montrant qu'ils ont été imaginés en vue d'une utilisation précise dans le cadre d'une reconstitution formelle de la réalité ;
- de leur laisser le temps d'assimiler ces outils conceptuels qui, en tant qu'objets intellectuels nouveaux et parfois déconnectés du monde tangible, nécessitent une maturation certaine avant de pouvoir être mobilisés efficacement ;
- de montrer les limites de l'utilisation qui est faite du modèle pour rendre compte de la réalité, afin d'éviter la dangereuse confusion entre ce modèle et la réalité.

Aussi « l'approche conceptuelle » implique-t-elle obligatoirement l'introduction, aussi précoce que possible de la notion de « modèle » scientifique. La notion de « simulation » numérique, quant à

elle, doit être présentée comme une reconstitution virtuelle et calculatoire du monde, fondée sur un modèle, une reproduction mathématisée ou informatisée d'un phénomène à partir de lois fondamentales et de conditions initiales appropriées, et non pas comme une reconstitution d'observations réelles effectuées sur le terrain. C'est à ce prix et en ayant conscience des difficultés qu'il y a pour un élève novice à raisonner dans un monde abstrait et à établir des liens avec le monde réel, que le médiateur scientifique pourra espérer atteindre le difficile objectif de faire lentement passer auprès de ses interlocuteurs les contenus conceptuels de la science moderne.

Néanmoins, malgré toute sa bonne volonté, il risque bien de se retrouver face à de grandes difficultés : blocage vis-à-vis des formalismes mathématiques, problèmes d'assimilation des outils conceptuels, difficultés de familiarisation avec un monde abstrait où l'intuition et l'habitude ne sont plus nécessairement opératoires, difficultés liées au passage incessant du monde réel à celui de l'abstraction, voire du passage d'un modèle à l'autre au sein d'un même discours... Autant d'obstacles inévitables qui perturbent la compréhension du public ou de l'élève, surtout si ce dernier est en situation d'échec, ponctuel ou généralisé.

Ces difficultés sont encore accentuées par le fait que l'approche conceptuelle nécessite de nombreux prérequis et l'assimilation de bases scientifiques abstraites, ce qui est rarement le cas du public auquel s'adresse le vulgarisateur. Et même en situation d'enseignement, il suffit que l'élève, pour une raison ou pour une autre ait manqué le ou les cours dans lesquels étaient introduits les concepts de base nécessaires à la compréhension du modèle employé, pour qu'il « décroche », provisoirement dans le meilleur des cas, définitivement dans le pire. En d'autres termes, l'approche conceptuelle permet difficilement de remonter dans le train de l'apprentissage des sciences une fois que l'on en est tombé, même si c'est juste à côté...

QU'EST-CE QU'UNE « APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE » ?

Pour combattre ces difficultés, l'introduction d'une approche capable de faire l'économie des concepts scientifiques et de leur formalisation serait susceptible de permettre la pratique d'une science ne nécessitant ni prérequis, ni formalismes mathématiques, ni connaissances approfondies.

Notons que cette « physique sans concepts » n'est pas nouvelle : les recherches bibliographiques dans ce domaine conduisent en effet à découvrir que d'autres y ont déjà songé, sous des formes un peu différentes dénommées paradoxalement « Conceptual Physics » outre Atlantique ou « Fisica Ingenua » en Italie³, l'association française *1,2,3 Sciences* ayant par ailleurs proposé l'idée du « gros mot scientifique »⁴. En outre, elle constitue presque un passage obligé dans l'élaboration du savoir scientifique. C'est la raison pour laquelle, on la trouve dans les sciences très récentes, tout simplement parce que les concepts et modèles qui peuvent l'appuyer n'ont pas encore été imaginés. C'est le cas de la physique des milieux granulaires, où des phénomènes aussi contre-intuitifs que la « ségrégation »⁵, le « chant des dunes »⁶ ou la « dilatance de Reynolds »⁷ sont encore expliqués « avec les mains », faute d'approches thermodynamiques, mécaniques ou numériques élaborées. Mais mêmes des sciences anciennes telles que la mécanique des fluides se risquent à l'utilisation de paramètres phénoménologiques tels que l'hydrophobicité⁸, pour éviter en l'occurrence d'avoir à recourir à un traitement de thermodynamique statistique des glissements de fluides sur les parois solides.

Justement, pourquoi alors ne pas tenter d'emprunter aux meilleurs vulgarisateurs et aux sciences expérimentales en cours de construction, cette approche fondée sur l'observation et la mise en relation des phénomènes ? Bien entendu, cette « approche phénoménologique » pourra s'appliquer aux sciences anciennes autant que récentes. Elle s'appuiera alors sur des connaissances « conceptuelles » déjà bien maîtrisées et à ce titre, étayées par des modèles scientifiques ; elle nécessitera donc une « déconceptualisation »⁹ des théories en vigueur. En conséquence, nous proposons de nommer ce nouvel outil de vulgarisation scientifique : « approche phénoménologique déconceptualisée »¹⁰.

Et pourquoi même ne pas l'étendre à l'enseignement des sciences pour compléter leur traitement habituel ? Bien entendu, pour compenser le manque d'outils conceptuels, une telle approche doit se fonder en très grande partie sur l'observation du monde réel et faire souvent référence aux phénomènes les plus courants et les plus intuitifs qui s'y déroulent. Exemptes de concepts, de lois, de formules, de théories, d'équations ou autres formalismes scientifiques, elle mène à une compréhension qualitative et ressentie, souvent largement suffisante pour appréhender les comportements et propriétés de l'univers¹¹.

Elle comporte par ailleurs une difficulté évidente : celle de savoir se départir des concepts scientifiques correspondants et d'adapter son niveau de formulation en conséquence. Si cela paraît simple de prime abord, on constate rapidement que pour parvenir à ce mode d'explication, il faut avoir parfaitement « compris » les raisons profondes du comportement observé et non pas avoir simplement retenu les lois et les modèles qui en rendent compte... Pour en prendre conscience, un petit exercice suffit : seriez-vous capable d'explicitier, sans avoir recours à un seul concept, les trois exemples cités dans l'introduction de cet article ? La partie suivante propose quelques thèmes particulièrement adaptés à cette approche.

Cette manière de donner du sens au monde sans s'encombrer d'un vocabulaire scientifique souvent mal compris présente un intérêt manifeste dans l'enseignement des sciences et dans sa médiation en général. Quels que soient les apprenants que nous avons en face de nous, qu'ils se destinent non à une carrière scientifique, il nous paraît important que tous gardent des sciences une connaissance ressentie et opératoire des phénomènes, plutôt que des concepts désincarnés, des termes abscons déformés et des bouts de théorèmes inopérants. D'autant plus que cette manière d'approcher les phénomènes scientifiques ne dénigre en rien l'approche conceptuelle. Au contraire, elle lui prépare le terrain de manière optimale, montrant aux apprenants qui s'y intéressent les limites d'une telle démarche et, à partir d'un certain niveau de complexité, la nécessité d'un vocabulaire et de théories adaptés. Le formalisme arrive alors à point nommé pour compléter les lacunes et permettre à l'apprenant d'aller « plus loin ». Les formules, lois et autres concepts prennent alors un véritable sens pour l'apprenant.

REALISATION DE L'ATELIER

Pour donner corps à ces constats issus de nos propres expériences de vulgarisateurs et d'enseignants de sciences et pour illustrer par l'exemple la notion « d'approche phénoménologique déconceptualisée », nous avons proposé aux participants de notre atelier un certain nombre de faits théoriques et expérimentaux, presque toujours fondés sur des expériences que nous avons apportées. Ces dernières étaient choisies parmi les expériences dites *contre-intuitives*¹², dont les traitements non conceptuels sont particulièrement formateurs¹³. Ces faits leurs étaient proposés sous forme de questions simples¹⁴, affichées à l'écran et regroupées en trois catégories :

- Des observations de la vie courante ne nécessitant pas nécessairement de traitement conceptuel mais dont l'interprétation n'est pas immédiatement évidente (*Pourquoi l'œuf battu en neige est-il blanc ?*).
- Des phénomènes naturels ou artificiels dont les interprétations sont toujours présentées dans le cadre de modèles physiques (*Pourquoi les cyclones tournent-ils dans le sens horaire dans l'hémisphère sud ?*).
- Des faits théoriques qu'il s'agit de démontrer autrement que dans le cadre de la théorie à laquelle ils appartiennent (*Pourquoi les lois d'attraction gravitationnelle et électrostatique varient-elles en $1/r^2$?*).

La première de ces catégories illustre de manière simple la notion d'approche phénoménologique et montre qu'elle est employée relativement spontanément dans certains cas. La seconde, quant à

elle, était au cœur du problème posé par l'introduction de notre article : comment parler du sens de rotation des cyclones sans faire appel à la force de Coriolis et à son produit vectoriel¹⁵ ? La dernière de ces catégories était destinée à montrer que l'approche phénoménologique peut être employée au sein même d'une théorie, pour démontrer des résultats qui nécessitent en général des outils conceptuels (ici, le théorème de Gauss) dont on peut alors s'affranchir.

Nous avons alors laissé les participants expérimenter de manière très libre, par petits groupes de 4 à 5 personnes, avec une consigne simple : « Après avoir repéré le concept ou le phénomène à l'œuvre dans l'expérience, trouver une explication s'abstenant, dans la mesure du possible, de faire appel à un langage scientifique ». Durant la deuxième partie de l'atelier, nous leur avons demandé de donner à l'ensemble du groupe les explications ainsi élaborées.

Pour des raisons de place, nous ne pouvons reproduire ici l'analyse des séquences que nous avons menées et filmées avec l'accord des participants lors de cet atelier. Le lecteur qui souhaitera approfondir sa perception de « l'approche phénoménologique » et évaluer sa pertinence pourra néanmoins trouver cette analyse sur le site du Laboratoire de didactique et d'épistémologie des sciences de l'Université de Genève (LDES), à l'adresse indiquée dans la référence [11]. Cette analyse porte sur trois expériences issues des deux premières catégories proposées ci-dessus.

Première expérience : pourquoi le blanc d'œuf battu en neige est-il blanc ?

Matériel : un œuf cru, un bol, un fouet.

Dès la première explication nous pouvons constater combien il est difficile d'abandonner les termes scientifiques : « *Il s'agit d'un réarrangement moléculaire* ». Suit une analogie avec les globules rouges. Bien que les propositions suivantes soit formulées dans un langage plus quotidien, les principes évoqués, quant à eux, restent liés à des connaissances apprises : « *La lumière « rebondit » autrement vers mon œil à cause de la forme des bulles* ». « *Toute la lumière étant blanche, cela veut dire que toute la lumière est reflétée par les bulles* ». « *Tout ce qui est incolore devient blanc quand il mousse.* » Peu à peu, des termes tels que « diffusion de la lumière », « lumière blanche » sont évacués, car ils font appel à une connaissance apprise. Reste que l'explication purement phénoménologique est difficile à trouver. A chaque fois, il faut reposer la question « qu'est-ce qu'on voit ? » pour que les participants « oublient » de faire référence à ce qu'ils savent de la lumière et de sa diffusion. Ce n'est qu'en forçant les participants à se concentrer sur une observation clairement dirigée qu'ils parviennent à observer, d'abord un arc-en-ciel, puis à dire que chaque bulle joue le rôle d'un miroir, reflétant le plafonnier, les fenêtres, la pièce... (clips 3 à 6).

Certaines réticences apparaissent, notamment liées à l'analogie que les enfants pourraient alors faire entre la neige et le blanc d'œuf battu, associant la neige à autant de petits miroirs (clip 7).

Deuxième expérience : les deux planches

Matériel : 2 planches de 1m, l'une portant à son extrémité un gros marteau. En lâchant les deux planches en même temps depuis la verticale, observer laquelle tombe le plus vite.

Cette fois, les participants « jouent le jeu » en tentant de se mettre à la place d'un enfant. Ainsi, avançant que l'explication scientifique fait appel à l'inertie, un participant avance l'idée qu'un enfant expliquerait cela en parlant du centre de gravité. Pour étayer sa proposition, il met le marteau scotché à la planche tantôt en haut, tantôt en bas.

N'ayant aucune idée des principes scientifiques pouvant expliquer le résultat obtenu, un participant se lance dans une explication clairement phénoménologique : « *Celui qui a le marteau, il a plus de peine à se mettre en route. Il a l'air d'avoir du mal à démarrer* ». Cette première explication est complétée par des expériences ressenties comme analogues, mais où le vocabulaire scientifique refait surface : « *Quand il tombe, il doit faire un arc de cercle. Or, si j'essaie de faire tourner mes deux bâtons, je constate que j'ai plus de peine avec celui qui est lesté. C'est la même chose qu'avec les petites voitures à friction. Quand on a la masse sur la circonférence, ça a tendance à tourner pendant longtemps, mais ça met du temps à démarrer. Ou bien la roue de vélo, le départ est plus*

difficile si la gente est lourde que si elle est légère » (clip 10).

Finalement, les explications trouvées correspondent à un niveau de formulation phénoménologique tout à fait remarquable : *« Au départ, ils sont attirés directement vers le sol (son geste montre la direction perpendiculaire au sol) et donc le démarrage pour les faire basculer demande plus de « force » et donc plus de temps pour démarrer... parce qu'il y en a un qui est plus « ancré » dans le sol, si je puis dire » (clip 10).* Un autre participant, pour étayer cette explication, prend l'exemple de l'arbre abattu par un bûcheron. Plus l'arbre est gros, plus il va mettre de temps pour se « décider » à tomber (clip 11).

Cette expérience fait naître un questionnement intéressant sur la signification de la « déconceptualisation ». En effet, dans nos explications nous avons nous-mêmes utilisé la notion d'inertie. Or, cette dernière n'est pas comprise, « sentie » par le participant qui a émis la dernière proposition. Un participant pose alors la question concernant l'importance du mot par rapport à la compréhension de l'action. En d'autres termes, il demande *« est-ce que c'est plus faux dans ma tête de croire que ça met plus de temps à tomber, parce que c'est plus « lourd » entre guillemet ? » (clip 15).* Cette remarque permet de revenir sur la définition, qui ne concerne que la déconceptualisation de termes spécifiques aux sciences. Si « lourd » est déjà un concept, il fait partie du langage courant et, associé à « prend plus de temps » il peut en effet, remplacer avantageusement, du moins dans une première approche, le concept d'inertie.

Troisième expérience : l'aimant dans le tube

Matériel : un aimant, un tube de carton, de letton, un rouleau de papier d'aluminium, un lampe de poche fonctionnant sur le principe de la dynamo.

La possibilité de manipuler, non seulement l'aimant et le tube de cuivre, mais également la lampe de poche, permet une première proposition : un courant électrique doit se créer à l'intérieur du tube. Cherchant à s'éloigner d'une explication utilisant le concept d'énergie, une deuxième proposition se dirige vers la notion de force, une force poussant vers le haut retenant la chute de l'objet.

Un intervenant pose alors une question fondamentale : jusqu'à quel point peut-on se passer de concepts scientifiques ? En l'occurrence, en utilisant la notion d'énergie, il offre une troisième proposition : Le fonctionnement de la lampe montre qu'il y a production d'énergie lorsque l'aimant passe entre les fils de cuivre. Dans le cas du tube, *« une partie de l'énergie de la chute est transférée au tube, ce qui fait que ça tombe moins vite » (clip 16).*

Nous sommes là dans une phase importante de la construction d'une approche phénoménologique : si certaines expériences peuvent se détacher totalement de certains concepts, comme l'expérience du blanc d'œuf où l'observation, bien que dirigée, suffit, d'autres font appel à certains « prérequis », comme l'énergie dans l'exemple du tube. Il importe alors, à ce stade, de rendre ces concepts les plus « tangibles » possible, en évitant les références trop abstraites. *« Les sciences ne peuvent pas aller contre les signaux sensoriels que l'on reçoit. (...) La physique nous parle du monde matériel autour de nous, la seule façon dont on puisse l'appréhender c'est bien à travers nos sens ou à travers des instruments de mesure mais qui sont des améliorations de nos sens d'une certaine façon » (clip 18).* Or, en ce qui concerne ce concept, qui plus est sa conservation, une telle dimension est extrêmement difficile à atteindre. On peut même dire, en se référant à l'histoire des sciences, que le concept d'énergie ne peut être abordé d'une manière intuitive (clip 19). Néanmoins, un participant relève que le principal apport de cette réflexion sur la déconceptualisation des sciences et la recherche d'une explication phénoménologique réside dans la mise en évidence d'un certain nombre de concepts fondamentaux, incontournables, ainsi que dans la recherche de niveaux de formulation adaptés, variant en fonction de l'âge ou des connaissances déjà acquises (clip 19). Cette réflexion rejoint celle de Giordan () sur la mise en évidence de certains « concepts organisateurs » offrant des points de repères et d'ancrage à l'acquisition des connaissances.

CONCLUSION

Ainsi l'approche phénoménologique apparaît comme bien mieux adaptée à l'enseignement et à la vulgarisation que l'approche conceptuelle. Faut-il pour autant n'adopter que ce seul mode de transposition didactique des théories scientifiques ? Dans le cadre des actions de vulgarisation, où le médiateur n'a pas le temps d'introduire les concepts et formalismes nécessaires à la compréhension ultérieure du modèle correspondant au phénomène qu'il souhaite présenter, nul doute que cet outil peut-être d'une formidable utilité. Mais comme toujours, la panacée n'existe pas et il convient de rechercher l'optimum qui correspond à la fois au thème traité et à la nature de son public.

Dans l'enseignement des sciences par exemple, la combinaison et l'alternance des approches phénoménologique et conceptuelle peut permettre une très grande diversification des approches pédagogiques tout en respectant les attentes et les conceptions des élèves. Cette complémentarité peut d'ailleurs exister jusque dans l'évaluation. En effet, pour éviter que les élèves ne se « cachent » derrière des formules ou des applications de lois, pourquoi ne pas leur demander de donner une explication phénoménologique d'une situation problème, où ils pourraient utiliser le langage quotidien, plus familier, en complément à un langage plus scientifique ? Une approche n'exclut jamais l'autre !

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Dis, Jérôme ? Les secrets de la physique expliqués par J. Bonaldi*, Paris, Albin Michel, 1991.
- [2] *Dis, Jérôme ? Les secrets de la physique expliqués par J. Bonaldi*, Canal + vidéo, 1991.
- [3] *La modélisation dans l'enseignement et la vulgarisation des sciences* ; A. Giordan, *Impact : science et société* **164**, p. 337-353.
- [4] <http://www.conceptualphysics.com/books.shtml>
- [5] *Fisica ingenua : studi di psicologia della percezione*, P. Bozzi, Garzanti, 1998.
- [6] Tout numéro de *L'agitateur* ; 1, 2, 3 Sciences, Antony, 123-sciences@wanadoo.fr.
- [7] *Ce chant venu des dunes* ; S. Douady ; *Journal du CNRS*, **153-154**, sept-oct 2002.
- [8] *Neutrinos : la course des phénoménologues* ; J.-O. Baruch, *La Recherche* **345**, sept. 2001.
- [9] *Surprendre* ; R.-E. Eastes, F. Pellaud ; *Cahiers pédagogiques*, n° 409, décembre 2002.
- [10] <http://atomes.crochus.free.fr>
- [11] Analyse de l'atelier : <http://www.unige.ch/fapse/SSE/teachers/giordan/LDES/index.html>

¹ Une cassette VHS et un ouvrage des meilleures séquences ont été publiés (références [1] et [2]).

² Une excellente analyse des concepts de modèles scientifique et pédagogique figure dans la référence [3].

³ Voir à ce sujet les références [4] et [5].

⁴ Voir la référence [6] à ce sujet. Notons à cette occasion que les activités de vulgarisation scientifique que nous développons dans le cadre de l'association *Les Atomes Crochus* s'appuient également largement sur cette approche.

⁵ La ségrégation est la propriété des mélanges de grains de se séparer spontanément en couches constituées de grains de tailles homogènes, sous l'effet de vibrations ou d'une agitation par exemple. Notons que dans ce cas, les plus gros grains se trouvent au dessus des petits (on parle aussi à ce sujet de l'effet « noix du Brésil »).

⁶ La référence [7] offre une interprétation excellente de ce phénomène presque magique.

⁷ La dilatance est la propriété du sable mouillé de s'assécher autour des zones qui subissent des pressions, comme par exemple autour des pieds lorsque l'on marche sur une plage léchée par les vagues.

⁸ Notons en effet que la notion de « caractère hydrophobe » ne désigne qu'une absence d'hydrophilie. De même que « l'interaction hydrophobe » n'existe pas, une substance hydrophobe ne « repousse » pas les molécules d'eau ; ses constituants moléculaires attirent simplement moins ces molécules qu'elles ne le font elles-mêmes, entre elles.

⁹ Au sens des concepts *scientifiques* uniquement, bien sûr.

¹⁰ Nous définissons ce terme en l'étendant aux sciences, conformément à l'usage qui attribue ce qualificatif à toute philosophie s'inspirant de la méthode de Husserl qui se propose, par la description des choses elles-mêmes, en dehors de toute construction conceptuelle, de « découvrir les structures transcendantes de la conscience et des essences ». Notons qu'aucun rapport n'existe entre ce concept et les « phénoménologues » de la physique des particules (référence [8]).

-
- ¹¹ Notons que la *métaphore* ne sera pas considérée comme relevant de cette approche car elle n'est qu'évocatrice ou source de moyens mnémotechniques, ce qui l'empêche d'être opératoire lorsque l'on sort du cas particulier pour lequel elle est employée.
- ¹² Consulter par exemple à ce sujet la référence [9] ou le Bulletin de l'Union des Physiciens de septembre 2004, consacré à la didactique des sciences.
- ¹³ S'il est possible de donner une interprétation phénoménologique à un fait contre-intuitif, c'est qu'elle est suffisamment performante pour dépasser l'intuition naturelle du phénomène et atteindre le niveau explicatif de la théorie usuellement invoquée.
- ¹⁴ Sur le modèle des animations expérimentales interactives des *Atomes Crochus* (référence [10]).
- ¹⁵ Rappelons que la force de Coriolis appliquée à un objet de masse m se déplaçant à la vitesse \mathbf{v} sur un référentiel tournant avec la vitesse $\boldsymbol{\omega}$ s'écrit : $\mathbf{f} = -2m.\boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{v}$