

La physique dans la culture scientifique : entre raisonnement, récit et rituels¹

Laurence Viennot, université Denis-Diderot-Paris 7, Paris,
laurence.viennotl@univ-paris-diderot.fr

Il ne va pas de soi, pour le moins, que se révèlent compatibles plusieurs attentes communément exprimées à propos de la culture scientifique : qu'elle s'étende au plus grand nombre, qui puisse donc y prendre plaisir, pour un exercice responsable de la citoyenneté, lequel suppose un esprit critique s'appuyant sur des éléments de raisonnement analogues à ceux de la science et sur une image raisonnablement fidèle de celle-ci, de ses modes de développement et de ses principaux acquis. Les ambitions des physiciens engagés dans des entreprises récentes de communication porteuses de telles ambitions seront évoquées puis mises en regard d'écueils susceptibles d'entraver l'accès des profanes au raisonnement, a fortiori à la pratique d'une analyse critique – au premier chef une mise en récit des phénomènes non éclairée par l'analyse de ses probables conséquences. La discussion des conditions d'optimisation – du point de vue du développement possible d'un raisonnement – de l'adaptation entre texte et public se centrera ensuite sur deux aspects : les grandes tendances du raisonnement commun, d'une part, la prégnance des conséquences de rituels d'enseignement en physique, d'autre part. Ces deux aspects sont en effet susceptibles d'influencer à leur insu auteurs et lecteurs. À titre d'indices expérimentaux, quelques résultats d'enquête auprès de publics peu spécialisés en physique viendront éclairer la question principale de ce texte : celle de la compatibilité entre démarche intellectuelle relativement exigeante et plaisir, alors même que ce terme semble davantage attaché à la mise en histoire de la science qu'à la pratique rigoureuse de ses acquis. L'intérêt de ne pas sous-estimer les capacités sur ce terrain de populations peu spécialisées est enfin discuté, et donc aussi celui de recherches ciblées sur la négociation qu'implique ce couple – raisonnement/plaisir – dans différents cadres de communication scientifique.

¹ Ce texte reproduit, à quelques modifications près, une communication présentée à la cinquième journée scientifique (8 mars 2006) de l'école doctorale « Savoirs scientifiques » de l'université Denis-Diderot-Paris 7 sur le thème : « Culture scientifique : définitions et évaluations » (organisation Cécile de Hosson).

Que ce soit sur le mode de l'affirmation optimiste ou celui de la dénonciation d'imposture, la culture scientifique se voit associée à quelques thèmes majeurs. Il s'agit (s'agirait ?) de la faire partager par tous, pour favoriser l'exercice de la responsabilité citoyenne, via le développement de l'esprit critique, ce qui doit se faire en évitant tout formalisme susceptible de faire rempart au partage de l'essentiel. Au tableau de ce cœur de culture, il faut compter la manière dont s'effectue – et s'est effectuée – l'activité scientifique, ainsi que les principaux acquis du moment. Certes, il n'y a pas trois mots dans les deux précédentes phrases qui n'aient fait couler des flots d'encre et animé autant de débats que d'espoirs, notamment depuis quarante ans, tant ils posent problème. Il n'est pas question, dans cette présentation, de résumer ce que des analyses philosophiques, sociologiques, linguistiques, historiques ont pu verser à de tels débats (voir par exemple une bibliographie thématique dans Jeanneret, 1994, p. 387).

C'est plutôt sur le terrain d'un relatif consensus que s'ancre ce texte. À lire Jurdant (1975, p. 149), qui parle ici de vulgarisation et de ses ambitions supposées, « celle-ci ne met en jeu pour ce faire, aucune contrainte particulière. La vulgarisation se targue d'offrir une science sans douleur. Cela est d'ailleurs conforme à sa vocation d'ouverture... ». Le partage de certains bénéfiques associés à la science par le plus grand nombre se conçoit en effet mal sans que s'y associe une dimension de plaisir. Or si le développement de l'esprit critique comme aptitude à détecter l'incohérence doit quelque chose à une certaine rationalité, et si celle-ci contribue aussi à l'image que l'on peut avoir de la science, alors il faut sans doute que le raisonnement ne soit pas le paria de la « mise en culture de la science » dont parle élégamment Lévy-Leblond (1986). Plaisir et raisonnement : un couple improbable ? Du moins s'agirait-il d'une alliance résolument réfractaire au large partage tant souhaité ? On ne répond pas à de telles questions par oui ou par non. Les reposer cache d'ailleurs, sans doute, quelque irrationalité, peut-être quelque chose de l'ordre du rêve ? Ainsi, ceux qui ont honoré l'année 2005 ou ses environs chronologiques d'un effort, il vaudrait peut-être mieux parler d'un élan, de rédaction ou d'organisation d'évènements souvent remarquable. Brezin explique, au moment de préciser les intentions du livre *Demain la Physique* (2004) : « Son ambition est de montrer que les questions posées ne sont pas l'effet d'un quelconque arbitraire mais d'une logique interne qui nous a conduits inmanquablement là où nous sommes [...]. Il nous a semblé qu'il était néanmoins possible de présenter en langage ordinaire, sans équations ni long investissement préalable dans la lecture d'ouvrages difficiles, les interrogations auxquelles sont confrontés les physiciens de notre temps ». Et Diu (2000), quelques années auparavant, revendique aussi des objectifs multiples et son refus de les opposer : « Voici un livre de physique, véritablement, volontairement, passionné, de vraie physique, sans faux fuyants ni faux semblants. Sa spécificité, toutefois, qui est aussi sa raison d'être, réside en ceci qu'il tente de présenter les sujets abordés – voilà sans doute une gageure – à un niveau accessible aux profanes ». Ce préambule pose avec une clarté toute particulière l'alliance de l'authentique et de la passion,

en matière de science : ni facilité ni douleur, au contraire : la passion... et en prime, on trouvera, dans l'ouvrage, la poésie.

Les réflexions qui suivent s'attachent au fonctionnement d'entreprises relevant d'un tel pari, ou de tentatives qui, même si elles s'en réclament un peu moins explicitement, montrent par leur qualité d'ensemble l'indéniable ambition de compléter le spectaculaire et le rêve par une double dimension de rationalité et d'accessibilité. La question est de savoir comment, engagé sur une telle voie, on peut augmenter les chances d'y progresser.

I. Raisonnement, rigueur : quelques points critiques

La terminologie, la sémiologie de la vulgarisation ont été au cœur d'études approfondies (voir notamment Jacobi, 1987). Métaphores, analogies et mélanges de genres s'imposent à l'analyse aussi bien comme candidats à la facilitation de la diffusion de la science que comme accusés potentiels de tous les détournements. Mais, ici, le curseur s'éloigne des questions de désignation ou d'évocation pour se rapprocher, en écho au titre de ce texte, de la mise en lien des arguments produits relativement à une question donnée. Quelques éléments relevés dans le type de texte ou d'entreprise pointé en introduction amorceront un questionnement sur les risques d'entrave à l'ambition supposée de l'auteur : donner ses chances à l'exercice du raisonnement.

Ce rapide listage, évidemment non exhaustif, sera suivi d'une analyse plus approfondie dans la suite du texte.

1.1. La question occultée

Une superbe expérience (en référence à celle de Fizeau, en 1849) a été réalisée à l'automne 2005 dans le ciel de Paris, dans le cadre de l'année mondiale de la physique : un faisceau laser vert partant de l'observatoire de Paris allait se réfléchir sur un miroir à Montmartre et revenait vers son site de départ où un dispositif adéquat permettait de mesurer la durée du voyage, et donc la vitesse de la lumière. Le site *AMP Ile de France* comme divers documents (Radvanyi, 2006 ; Bobin *et al.*, 2006) célébraient l'expérience et en expliquaient le principe, voire le dispositif. Une question pourtant ne figurait dans aucun de ces documents : le spectacle était superbe, mais comment donc pouvait-on voir ce trait d'un vert intense, à bords nets, dans le ciel de Paris ? Nous y reviendrons.

1.2. Explication ou tautologie ?

Supposons cette fois la question posée, par exemple celle de la raison pour laquelle la vitesse de la lumière dépend du milieu traversé. Dans un document visant l'information d'un large public, on lit : « *Dans un milieu transparent, comme le verre par exemple, la lumière se propage moins vite parce que son indice de réfraction*

est supérieur à celui de l'air » (Jacquier & Vannimenus, 2005, p. 6). Rien de faux dans chacune des affirmations constituant cette phrase, mais le « *parce que* » qui les relie n'est pas à prendre au pied de la lettre, car ces deux propositions signifient la même chose.

1.3. Les liens qui restent implicites

Un thème en faveur dans la diffusion des acquis récents de la science est celui des atomes que l'on dit froids. Dans la brochure déjà citée (Jacquier & Vannimenus, 2005, p. 16), on en apprend à ce sujet : « *Le prix Nobel a été décerné en 1997 à Claude Cohen Tanoudji, Steven Chu et Bill Phillips, pour avoir démontré le principe du refroidissement des atomes par laser à des températures extrêmement basses, de l'ordre du millième de degré au-dessus du zéro absolu. [...] Les atomes froids sont maintenant utilisés dans les horloges atomiques qui mesurent le temps avec une précision extraordinaire [...]* ». Affirmations tout à fait exactes, mais non reliées. Pour un physicien, il va sans dire qu'être froid signifie, s'agissant d'atomes, avoir une vitesse faible dans le référentiel d'étude. Mais un profane, pour reprendre le terme de Diu, aura plus de chance d'y comprendre quelque chose s'il est informé du lien ici implicite : « *L'intérêt des atomes froids, c'est donc qu'ils sont lents* », comme on pense bien à nous le dire à la page 136 de l'ouvrage *Demain la physique*, déjà cité.

1.4. Les liens niés

Les risques de paralysie du raisonnement sont majorés lorsque les affirmations présentées semblent concerner des phénomènes relevant chacun d'une modélisation différente. Ainsi peut-on lire dans un texte plus ancien (Maury, 1987, p. 44-45) : « *La pression du liquide sur les parois [...] est assez facile à comprendre [...] les molécules sont serrées... elles appuient dessus comme les voyageurs du métro. [...]. Pour le gaz, c'est moins facile... les molécules ne sont plus serrées du tout [...]. C'est en cognant la paroi et en rebondissant qu'elles appuient dessus* ». Le lecteur est prévenu d'une rupture dans l'explication, supposée « *moins facile* » pour les gaz. D'un modèle de tassement, répulsif, de corps compressibles en contact, on passe à celui d'une vision cinétique. Les molécules de liquide ne donneraient-elles lieu à aucune collision, ni donc à aucune pression dite cinétique ? Tel n'est pas du tout le cas, puisque celle-ci, typiquement mille fois supérieure à celle du gaz, n'est pas complètement annihilée par les forces attractives entre molécules de liquide. L'unicité du modèle de la théorie cinétique est ici battue en brèche, sans doute au nom de l'accessibilité.

1.5. Le raccourci qui peut suggérer l'incohérence

Autre exemple d'un choix de rédaction qui peut se discuter du point de vue de l'établissement de liens. L'impression d'incohérence peut surgir, cette fois, d'un raccourci susceptible de conduire à un rapprochement abusif. Il s'agit du « *rayonnement cosmique fossile [...] qui [...] baigne l'espace sans plus interagir avec la*

matière », la phrase suivante stipulant : « *c'est en 1964 qu'il fût découvert par hasard [...]* » (Diu, 2000, p. 280). Si l'on comprend, c'est-à-dire que l'on sait déjà, que la matière, désormais majoritairement neutre et globalement diluée, rencontrée par le rayonnement fossile affecte ce dernier infiniment moins que dans les premiers temps de l'univers, où tel n'était pas le cas, tout va bien. Mais, dans l'ignorance, on peut interpréter le premier énoncé comme celui d'une incapacité inhérente à ce rayonnement à interagir avec la matière : après tout, on a entendu dire que c'était le cas du neutrino ! Alors, la suite est incompréhensible, car on voit mal comment pourrait être découvert « *par hasard* » quelque chose qui n'interagirait pas, en l'occurrence, avec l'antenne de Penzias et Wilson.

1.6. Discussion

Ces quelques exemples illustrent des choix de rédaction dont il serait peu avisé de juger dans l'absolu, sans une double référence, d'une part à l'objectif de l'auteur, d'autre part au lecteur. Posant, à titre d'hypothèse, l'objectif de donner sa chance au raisonnement, reste à considérer le lecteur. Ce qui pour l'un constitue un raccourci dommageable sera décodé aisément par l'autre. Et il s'agit d'anticiper. C'est l'attitude que l'on peut saluer par exemple chez cet auteur prévenant, qui commente le très médiatique refroidissement des atomes par laser : « [...] *la découverte a priori paradoxale [...] qu'une utilisation judicieuse du laser peut permettre non pas de chauffer la matière mais de la refroidir à des températures proches du zéro absolu* » (Aspect et al., 2004, p. 134). À travers cette allusion à une difficulté éventuelle, le lecteur se voit crédité d'un souci de cohérence, s'agissant d'un objet qui sert le cas échéant à découper des matériaux et dont il a bien dû lire déjà quelque chose comme « *le faisceau laser est très puissant* » (Jacquier & Vannimenes, 2005, p. 4). Mais y a-t-il des constantes, au moins en probabilité, dans l'état intellectuel et les attentes de ce profane tant courtisé ?

2. L'état des profanes : les histoires en faveur

Un déterminant majeur de la lecture qu'un non spécialiste peut faire d'un message relatif à la science est depuis longtemps signalé. La « *connaissance commune* » dont Bachelard (1938) se fit l'analyste fût l'un des thèmes sources des études didactiques des trois dernières décennies sur les conceptions de ceux qui apprennent, c'est-à-dire des vues très répandues sur les concepts scientifiques et/ou la nature de la science dont les chercheurs ne situaient pas l'origine dans l'enseignement. Par exemple, on observe une tendance commune à réifier abusivement les concepts, typiquement un rayon lumineux compris comme un objet visible de partout, ou encore une image optique, comprise comme voyageant en bloc de la source aux autres éléments d'un parcours préférablement horizontal, jusqu'à un écran chargé de la recueillir (Viennot, 1996, chap. 2). Il n'est pas très risqué d'admettre que de telles tendances de pensée agissent comme des filtres,

sélectionnant en quelque sorte la partie du message compatible avec la bande passante personnelle du récepteur, ou, dans un langage moins évocateur de transmission unidirectionnelle, déterminent des résonances particulières.

En matière de raisonnement, une tendance commune majeure est de réduire de manière drastique l'analyse des dépendances fonctionnelles : une cause, un effet, tel est le schéma préféré en la matière. Ainsi en physique (on n'abordera pas ici d'autres domaines de choix de ce point de vue, telle l'économie) : « *La densité du gaz diminue donc sa pression diminue* », « *$U = RI$, la résistance augmente donc la tension U augmente* », quand ce n'est pas « *plus vite donc plus loin* », autant d'énoncés familiers qui ne disent rien de variables *a priori* pertinentes, respectivement la température du gaz, l'intensité du courant ou la durée du trajet. Et lorsque la multiplicité des variables est prise en compte, c'est une forme bien particulière qui structure le raisonnement commun : le raisonnement linéaire causal (Viennot, 1996, chap. 5 ; Viennot, 2004), dont les traits ont été dégagés sur la base des travaux de Fauconnet (1981), Closset (1983) et Rozier (1988).

En bref, le raisonnement commun adopte volontiers la structure d'une chaîne linéaire d'implications dont chaque maillon mentionne un seul phénomène (ϕ), portant sur l'évolution d'une seule grandeur : $\phi_1 \rightarrow \phi_2 \rightarrow \phi_3 \rightarrow \phi_n$. On retrouve là la réduction de l'analyse fonctionnelle déjà signalée. Mais un trait plus spécifique concerne le statut de la flèche ici chargée de symboliser le rapport entre deux phénomènes successivement évoqués dans la chaîne explicative. En effet, une flèche posée entre deux prédicats pourrait représenter une implication logique : « donc ». Autre éventualité : la flèche pourrait signifier le déclenchement d'un événement ultérieur, « ensuite ». Mais c'est en fait le confort d'une ambiguïté qui domine : alors ou *then* n'explicitent pas les parts respectives de l'implication logique et d'une chronologie subreptice (tableau 1).

Tableau 1. Plusieurs langues, même ambiguïté du terme de statut intermédiaire, lequel évoque à la fois, en proportion indéterminée, une implication logique et une succession chronologique

Statut ↓	Français	Anglais	Espagnol
Logique	donc	therefore	por eso
Intermédiaire	alors	then	entonces
Chronologique	ensuite	later on	despues

Or cette mise en récit de l'explication même suinte de divers indicateurs, notamment l'usage très fréquent du futur : « si la densité diminue, la pression va diminuer », et parfois elle s'affiche ouvertement dans les commentaires recueillis lors des enquêtes fondatrices de cette analyse. Cette forme de raisonnement en terme d'histoire a été observée chez les élèves et les étudiants, dans une étendue de contextes et avec des fréquences impressionnantes. Or, si ce schéma peut

convenir lorsqu'on analyse une chaîne d'évènements effectivement successifs, il s'oppose frontalement à la modélisation des évolutions de systèmes à plusieurs variables conduites sous l'approximation quasi-statique ou de régime quasi-permanent ; c'est-à-dire quand on considère que *plusieurs* variables, caractérisant chacune l'ensemble du système, évoluent (quasi) *simultanément* sous la contrainte *permanente* de quelques relations simples, lesquelles traduisent un état d'équilibre ou de régime permanent : typiquement, $PV = nRT$ (en notations habituelles) pour un gaz parfait, ou bien un bilan équilibré de flux énergétiques pour un bolomètre. On l'aura compris, les termes en italiques dans la phrase précédente sont dans un rapport d'opposition terme à terme avec cette fiche signalétique du raisonnement linéaire causal. Les évènements envisagés sont souvent décrits à l'aide d'une *seule grandeur*, et en tout cas simplement. Ces évènements sont, plus ou moins explicitement, compris comme *successifs* et donc comme *temporaires*, du moins leur *considération* est-elle *temporaire*.

Ce qui est englouti dans cette mise en histoire de l'explication, c'est l'approche élémentaire de phénomènes où l'on néglige les durées de propagation interne au système étudié par rapport à celles qui caractérisent son évolution globale. Et bien sûr, la simultanéité et la permanence passent à la trappe. Nous en verrons tout de suite des exemples.

L'influence de cette grille de lecture peut se mesurer sur la base d'un résultat déjà ancien (Rozier & Viennot, 1991) concernant un texte scolaire (Valentin, 1983) qui propose une première approche d'un phénomène : les changements d'états d'un corps entre phases gazeuse, liquide et solide : « *L'énergie d'agitation que possède en moyenne chaque molécule est suffisante pour empêcher les molécules des gaz [...] de se lier les unes aux autres : [...]. Mais, si l'on abaisse la température, le système pourra se liquéfier et même se solidifier. Ces phénomènes surviennent quand, à force de diminuer la température, les molécules ont une énergie cinétique moyenne si basse qu'elles ne peuvent plus résister à l'attraction électromagnétique qu'elles exercent les unes sur les autres : elles commencent par s'agglutiner dans l'état liquide et finissent par se lier dans l'état solide* ».

L'analyse qui précède met en alerte, et fait craindre un malentendu. En proposant une affirmation fautive aux étudiants et en leur demandant s'ils pensaient que le texte scolaire suggérait cette affirmation, il a été possible de confirmer ces craintes. Sur 181 étudiants de première année universitaire, la cible du livre, 77 % ont dit que le texte suggérait l'affirmation, que voici : « *À un instant donné de la liquéfaction, l'énergie cinétique moyenne d'une molécule du gaz est supérieure à celle d'une molécule appartenant au liquide (liquide et vapeur sont en équilibre thermique à l'instant considéré)* ». Il importe de dire que, par ailleurs, 80 % considéraient cette affirmation comme exacte. Tout de même, il est impressionnant de voir à ce point mal compris un auteur que l'on ne peut soupçonner de ne pas connaître le principe d'équipartition de l'énergie, et qui d'ailleurs, au revers de la page, précise très

clairement qu'à l'équilibre, les énergies cinétiques moyennes par particule sont égales dans les deux phases. Mais on remarque que le texte est marqué par une succession d'indicateurs de chronologie : « *Si... pourra... quand... à force de... ne peuvent plus... commencent par... finissent par...* ». Cette structure peut se schématiser par la chaîne suivante :

(gaz) T diminue → E_c (énergie cinétique moyenne) diminue → les interactions gagnent → état liquide → [...] → état solide.

La tendance commune à mettre du temps dans l'explication trouve ici un terrain de choix. Le texte peut alors être lu comme une histoire. Au début de l'histoire : le gaz. Plus tard : le liquide. Entre-temps : la diminution de la température, puis celle de l'énergie cinétique moléculaire moyenne, forcément plus basse à la fin de l'histoire.

Cet exemple, au moins, conforte l'hypothèse que la structure de raisonnement préférée, en règle générale, par les profanes n'est pas sans lien avec ce qu'ils comprennent d'un message en rapport avec la science. C'est aussi l'occasion de remarquer que l'effet est sans doute d'autant plus fort que l'auteur lui-même s'est, en quelque sorte, mis en résonance avec les caractères du raisonnement commun. C'est là un trait très fréquent chez qui souhaite être entendu sans douleur, pour reprendre l'expression de Jurdat (1975), et même avec bonheur, en donnant à l'auditeur ou au lecteur l'impression de comprendre l'essentiel, à travers une histoire.

3. Auteurs (comme enseignants) : tendances à surveiller

3.1. Mise en résonance avec les tendances communes du raisonnement : des histoires trop simples

L'exemple précédent le suggère bien, les tendances du raisonnement commun s'invitent volontiers comme inspiratrices du style vulgarisant, pour dire vite. Voilà donc une indication beaucoup moins triviale que l'impératif de tenir compte de la cible. Les tenants du savoir, dans l'habit duquel nous nous glissons lorsque nous commençons un ouvrage de vulgarisation, ne sont pas exempts de tendances dont il vaut mieux être averti, pour une meilleure maîtrise de nos effets. Quelques exemples pour appuyer cette idée.

En matière de raisonnement commun, et de caractéristique probable des profanes, la tendance à traiter abusivement les concepts comme des objets ordinaires est l'une des plus manifestes. Du côté des auteurs, il n'est certes pas dit que la lumière se voit de profil, comme un train que l'on verrait passer. Mais ne pas dire comment se voyait le faisceau vert qui tranchait le ciel parisien de l'automne 2005 (Radvanyi, 2006 ; Bobin *et al.*, 2006), n'est-ce pas faire comme s'il se voyait parce qu'il était là ?

Le raisonnement à une seule variable, quant à lui, est une ressource précieuse souvent surexploitée. Dans un texte (Maury, 1989, p. 27) révisé depuis, on pouvait lire : « *Les avions volent très haut, à une altitude où les molécules sont beaucoup moins nombreuses et donc la pression de l'air extérieur sur le hublot est beaucoup plus faible qu'au niveau de la mer* ». Quelques pages plus loin, s'agissant d'une montgolfière, on précisait que chauffer l'air interne avait pour effet que celle-ci contenait « *de moins en moins d'air* ». La simple cohérence suggère qu'alors l'air est moins dense et donc la pression plus faible, hypothèse fatale à la sustentation du bel objet. Bien sûr, c'est un autre chemin qu'empruntait ensuite l'explication proposée, en référence au principe d'Archimède. La cohérence semble ainsi bien souvent mise entre parenthèses, au profit d'explications au coup par coup.

Enfin et surtout, la structure chronologique des explications communes trouve à s'ancre dans nombre de propositions vulgarisantes. Relisons un auteur déjà cité (Diu, 2000, p. 280) qui évoque le « *rayonnement cosmique fossile, que l'expansion de l'univers a abandonné sur le bord de la route, il y a de cela une dizaine de milliards d'années, et qui, depuis, baigne l'espace intersidéral sans plus interagir avec la matière* », ajoutant : « *c'est en 1964 qu'il fût découvert par hasard – par deux radioastronomes qui cherchaient autre chose* ». Le squelette chronologique de ce passage comporte ces trois épisodes : le rayonnement interagit avec la matière → l'expansion l'a abandonné → il baigne l'espace (depuis). Comment le profane peut-il percevoir la permanence de l'expansion, et le constant refroidissement du rayonnement ? Comprendra-t-il que les quelques 2,7 °K que l'on mesure actuellement n'ont vraiment pas de raison de perdurer ? L'effet de ce texte n'a pas été évalué et dépend évidemment du public. Soulignons simplement que la question mérite attention.

Autre exemple de permanence en danger d'oubli : la serre.

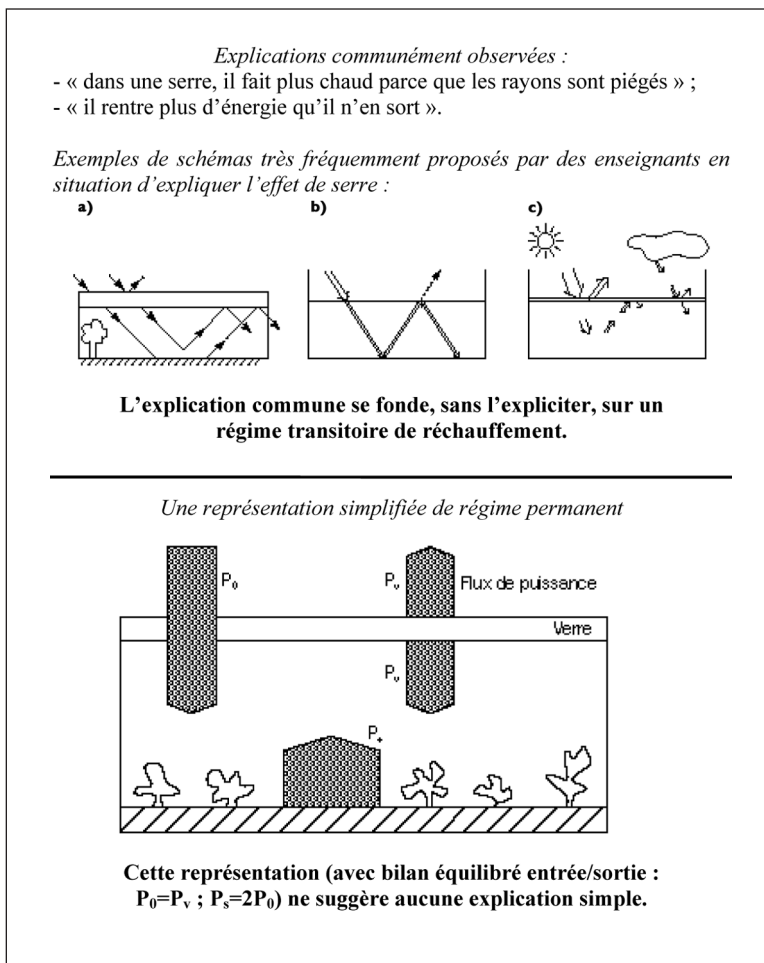
La figure 1 (Viennot, 1996, p. 125) présente des commentaires et schémas très communément produits avec la visée d'expliquer l'effet de serre. Lorsqu'on imagine un lieu où « *il rentre plus d'énergie qu'il n'en sort* », on est facilement convaincu qu'il y fera vite chaud... très chaud même, si cela dure. Et d'ailleurs, cela ne peut pas durer, du moins indéfiniment. Le verre de la serre, bénéficiaire d'un tel surplus d'énergie, va monter en température jusqu'à ce qu'il rayonne, par rayonnement du corps noir, autant d'énergie qu'il en rentre du fait de la transparence de ce matériau dans la partie visible du spectre de la lumière reçue. Ce régime (quasi-) permanent se déplace au gré des conditions météorologiques... et de l'arrivée de la nuit, qui commence par un régime transitoire au cours duquel il sort plus d'énergie qu'il en rentre.

Les conseils d'un inspecteur général de physique se porteront, eux, sur le régime permanent dont un modèle très simplifié complète la figure 1, car l'équilibre du bilan permet de calculer la température à l'intérieur de la serre, bon problème de concours. On le constate aussi, la représentation du régime permanent est frustrante sur le terrain de l'explication : comment en est-on venu là ? Par un

régime transitoire : voilà pourquoi ce dernier occupe tout le devant de la scène explicative... sans se présenter comme tel, et le problème est là.

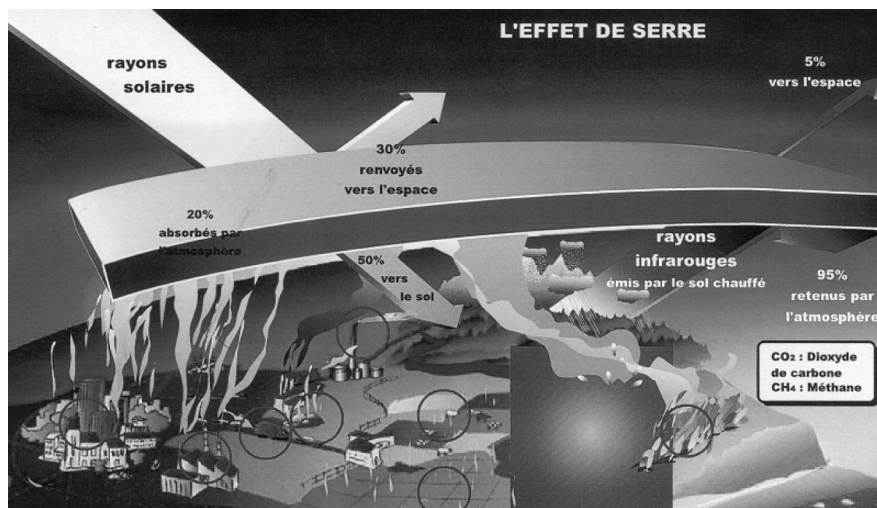
En cela, le site du CEA² s'aligne sur tant et tant de documents lorsqu'il propose celui représenté en figure 2. L'idée de relative stabilité est évoquée à travers plusieurs mentions de la « température moyenne », qui grâce à l'effet de serre est très vivable, et a un peu augmenté au siècle dernier. Mais rien ne nous avertit que le document reproduit en figure 2 ne représente pas une permanence des flux énergétiques, et que la Terre n'est pas vouée à une explosion aussi imminente que ne le suggère le déséquilibre figuré sur ce document.

Figure 1. Un régime permanent de non équilibre : contraste entre analyses
(Viennot, 1996, p. 125)



² Disponible sur Internet : <http://www.cea.fr/fr/pedagogie/EffetDeSerre/eds.htm> (consulté le 8 février 2007).

Figure 2. Document figurant sur le site du CEA, visant l'explication de l'effet de serre



3.2. L'impact durable des rituels d'enseignement

Moins subtils, d'autres effets sont susceptibles d'affecter le discours ou les productions de scientifiques s'attachant à diffuser quelque chose de la science. Il s'agit des habitudes acquises sur les bancs de l'école et de l'université, reflets de celles de nos propres enseignants. Quelques exemples, là encore. Il est rituel, et d'ailleurs sans conséquence lourde comme il faut le reconnaître, d'affirmer que la diffraction s'observe pour des ouvertures dont le diamètre est « proche de la longueur d'onde » (voir par exemple Réflexiences, 2005, p. 6). Imaginons seulement (suffit-il de ne pas y penser ?) ce que seraient nos efforts de travaux pratiques s'il fallait utiliser des fentes de largeur de l'ordre du demi micron ! Heureusement qu'un facteur mille assure des flux lumineux plus raisonnables, tout en autorisant l'étude de diffraction. Autre refrain, pourtant dénoncé depuis longtemps (voir Chauvet, 1994, p. 17) : « *En optique, fréquence équivaut à couleur* » (Diu, 2000, p. 242). On va même jusqu'à parler, comble de négation du biologique, de « *couleurs invisibles à l'œil nu* »³, alors que la couleur est une réponse perceptible à la lumière reçue, nullement en relation biunivoque avec la fréquence. Ainsi on peut voir du jaune sans qu'aucune fréquence jaune ne soit présente dans le spectre de la lumière reçue. Quant à trouver une fréquence magenta...

Un autre rituel mérite qu'on s'y attarde (Viennot, 2005a, 2006). La montgolfière en est l'occasion. Comme sujet d'exercice classique (pas seulement en France, voir Ogborn & Whitehouse, 2001, p. 104), elle est souvent accompagnée d'une affirmation

³ Disponible sur Internet : http://www.inrp.fr/lamap/?Page_Id = 10 & Action = 2 & Element_Id = 498 & DomainScienceType_Id = 14 (consulté le 8 février 2007).

du type : « *la pression de l'air intérieur est la même qu'à l'extérieur, quelle que soit sa température* », au motif que l'enveloppe est ouverte à sa base. Hypothèse inquiétante si on la prend au pied de la lettre puisque alors chaque portion de l'enveloppe ne serait soumise à aucune force résultante de la part de l'air interne et externe. Il resterait le poids du matériel (P), provoquant une inexorable chute. La survivance de cette hypothèse, ou plutôt de cette formulation laxiste (on pourrait plus justement parler de pressions moyennes très voisines), tient à l'habitude de traiter ce sujet via le théorème d'Archimède, ce qui évite de se poser la question des forces agissant localement sur l'enveloppe, tout en conduisant à un calcul simple et efficace des densités et des masses gazeuses pertinentes. Comme thème de vulgarisation, la montgolfière fait à l'occasion l'objet du même traitement : « *la montgolfière étant ouverte, la pression de l'air qu'elle contient est la même que celle de l'air qui l'entoure* » (Maury, 1987, p. 67). La force de l'habitude... celle-là même qui explique sans doute que, lors de l'étude récente déjà citée (Viennot, 2005a, 2006), sur 61 enseignants stagiaires en deuxième année d'IUFM, à qui il a été demandé par questionnaire écrit s'ils modifieraient ou préciseraient la rédaction d'un tel exercice, aucun n'a détecté l'absurdité potentielle soulignée ici.

4. Exigence intellectuelle et plaisir

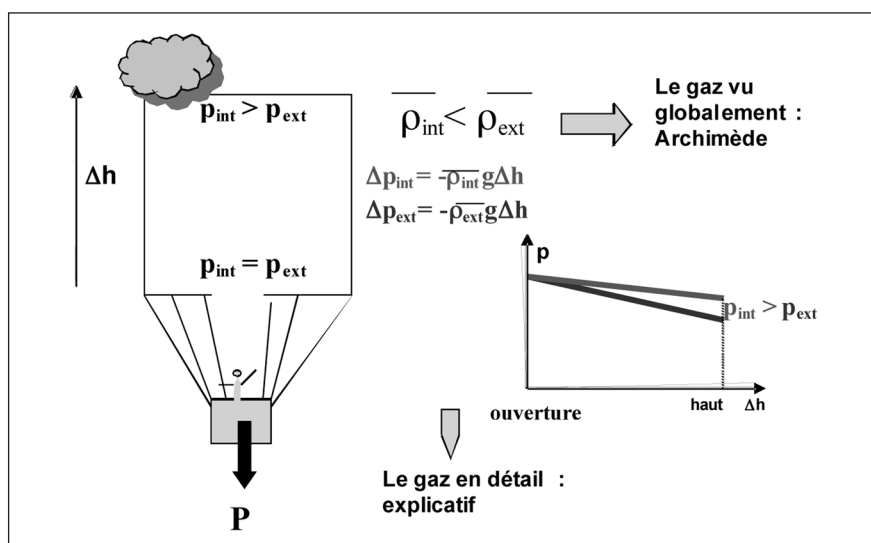
Certes, pourrait-on dire, plus de rigueur ne nuirait pas. Mais voilà le spectre d'une physique rébarbative qui se profile à l'horizon. Et puis, est-ce si grave, de faire quelques approximations ici ou là ? Il en faut bien, évidemment, pour ne pas se paralyser... Considérons pourtant le dernier exemple présenté. En suggérant que les pressions internes et externes sont égales partout et implicitement homogènes, on n'est pas simplement en train de passer sous silence une quatrième décimale sans importance, on nie le principe de la sustentation : l'existence de gradients de pression. Le théorème d'Archimède n'est jamais que l'expression intégrale des effets de tels gradients. La figure 3 récapitule une approche plus exigeante mais toutefois accessible, fondée sur la différence des gradients de pression intérieur et extérieur (respectivement Δp_{int} et Δp_{ext}), elle-même due aux différences de masse volumique moyenne (respectivement ρ_{int} et ρ_{ext}) : de bas en haut, la pression diminue moins vite à l'intérieur qu'à l'extérieur car l'air y est plus chaud et donc moins dense. Là réside l'explication du fait que la pression, est, sauf à l'embouchure, plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur, à une altitude donnée (notamment en haut de l'enveloppe), assurant ainsi la sustentation de l'ensemble. Pour faciliter la compréhension de cette explication, la modélisation proposée attribue à la montgolfière une forme cubique, évidemment peu usuelle, afin d'éviter à la personne qui chercherait à en tirer bénéfice l'effort d'une sommation périlleuse des actions locales. La valeur nulle de la résultante des forces de pression sur la paroi horizontale basse, la compensation des actions sur les parois verticales et l'effet nécessairement déséquilibré des forces de pression s'exerçant sur la paroi horizontale haute ne sont en effet pas apparus comme des obstacles lors des expérimentations réalisées à l'aide de cette modélisation.

Celles-ci ont impliqué, d'une part, des enseignants en exercice et, d'autre part, des étudiants très peu spécialisés en physique. En effet, au cours de l'étude citée plus haut (Viennot, 2005a, 2006), 15 enseignants en stage de formation continue sur le thème des relations mathématique-physique, qui n'avaient pas plus que leurs collègues débutants, détecté l'hypothèse problématique, se sont vu ensuite proposer un exposé oral, en groupe, de l'analyse résumée en figure 3. Ils ont tous répondu alors positivement (tous avec un indice de conviction de 3 ou 4 sur une échelle de 1 à 4) à une question écrite leur demandant s'ils pensaient que cette discussion valait la peine d'être menée.

En revanche, cette unanimité disparaît pour la deuxième question posée, concernant la valeur potentielle d'un tel débat pour des étudiants de classe terminale ou de première année universitaire. Certains commentaires suggéraient que ce qui était bon pour les enseignants ne l'était pas pour des élèves de terminale. Une consultation en tout début de première année universitaire scientifique, dans le cadre de la même étude, relativise ce pessimisme au moins pour ce niveau. Lors d'une série de 15 entretiens individuels d'une demi-heure, tous les étudiants concernés, qui eux non plus n'avaient pas su critiquer l'hypothèse discutée ici, ont jugé cette discussion accessible et importante à mener, sans s'arrêter à sa durée non négligeable. Un traitement en groupe en troisième année universitaire (licence de sciences physiques) a donné lieu au même jugement, oui cela vaut la peine d'y consacrer ce temps (le même qu'en entretien, soit environ une demi-heure), chez 18 des 21 étudiants présents, dont 17 répondaient (sur question explicite) y avoir pris un réel plaisir (coté 3 ou 4 sur une échelle de 1 à 4).

Figure 3. Éléments pour comprendre la sustentation d'une montgolfière

(La montgolfière est représentée avec une forme cubique pour faciliter la compréhension de l'effet des forces de pression sur l'enveloppe, voir le texte)



Plus récemment, Mathé (2006) a mis en œuvre une étude analogue portant sur des étudiants encore moins spécialisés en physique. Sur les dix étudiants consultés (5 en troisième année universitaire et visant le professorat des écoles ou un travail de médiateur scientifique [licence de sciences fondamentales et appliquées] ; 5 en master I BioGéoMedia [quatrième année universitaire] visant une profession de médiateur ou de journaliste scientifique), 9 concluent l'entretien en affirmant que le temps passé en valait la peine (la dixième avait retenu son interlocutrice pratiquement une heure !) et tous parlent du plaisir éprouvé avec une conviction qu'ils cotent 3 ou 4 sur une échelle de 1 à 4. Au moins peut-on dire que le jugement, rituel lui aussi, selon lequel « *les étudiants n'ont pas l'esprit critique* » mérite approfondissement. Pris en défaut de détection spontanée de l'incohérence, comme les enseignants consultés d'ailleurs, certains ont la lucidité de pointer une condition pour accéder au plaisir d'une analyse exigeante mais satisfaisante : « [...] *pourvu qu'on nous l'enseigne* » (licence de sciences physiques, Viennot, 2006), ou encore : « *je préfère qu'on m'aide à chercher plutôt que me dire "c'est ça et c'est tout"* » (licence de sciences fondamentales et appliquées, Mathé, 2006). Et c'est avec une saine révolte que d'autres expriment, parlant de l'explication à laquelle ils viennent d'accéder, leur frustration rétroactive : « *pourquoi est-ce la première fois que quelqu'un me dit ça ?* » (licence de sciences physiques, Viennot, 2006). Entendons-nous bien : ce n'est sans doute pas le manque de connaissances formelles qu'ils reconnaissent comme réhibitoire, puisque leurs acquis leur ont parfaitement suffi à saisir que, avec la même pression de chaque côté d'une portion d'enveloppe, on ne peut espérer une résultante ascensionnelle. C'est plutôt d'une libération du jugement qu'il s'agit, comme le souligne bien Mathé, quand au fil de l'entretien, elle observe que ses interlocuteurs cessent progressivement de se préoccuper de leurs souvenirs pour mettre en œuvre leur propre réflexion (Mathé, 2006, p. 30).

5. Remarques finales

Y aurait-il donc plus de place que l'on ne le croît pour le raisonnement dans la relation que souhaite établir avec des profanes, telle est du moins leur visée affichée, bon nombre de promoteurs de la culture scientifique ? Certes, c'est un abord bien restreint qu'adopte ce texte. D'abord, il y est question de profanes qui auraient acheté un livre, lu une brochure, une explication sur un site Internet, ou d'étudiants certes très peu spécialisés en science, mais enfin d'étudiants tout de même. Ensuite, on y parle de physique exclusivement, discipline qui ne couvre pas à elle seule, et de loin, le terrain de la culture scientifique. Enfin, on peut toujours dire que les exemples sont anecdotiques et les effectifs consultés en enquête peu ou pas assez représentatifs, quoique...

Pour tirer profit des réflexions qui précèdent, il importe sans doute de les voir moins comme un état des lieux que comme des éléments à méditer si l'on

ambitionne de donner ses chances au raisonnement du lecteur, de l'auditeur, de l'interlocuteur.

L'état des lieux, selon cet axe d'analyse s'entend, mériterait d'être fait en plus ample format. Il est étonnant que ne soit pas plus utilisé le terme raisonnement (entre autres exceptions : Jeanneret, 1994, p. 162, 165, 168) sous des plumes très autorisées en matière d'analyse des processus relatifs à la culture scientifique.

Les exemples présentés ici avaient pour but d'illustrer des choix possibles, tout en s'appuyant sur des productions qui sont sans doute loin d'être toutes délibérées. On peut décider de signaler des questions qui se posent (pourquoi voit-on le faisceau laser ?) même sans y répondre⁴, d'explicitier des liens que notre vocabulaire professionnel déguise (ces atomes froids dont l'intérêt est qu'ils sont lents), de dire le soi-disant évident, telle la permanence de l'expansion de l'univers, de reconnaître le surprenant, tel le fait que ces lasers notoirement synonymes de puissance participent à un refroidissement, d'admettre que certains phénomènes ne sont pas déterminés par une seule variable, alors que tant d'énoncés le suggèrent à tort. Mais aussi, on décide d'autant plus lucidement que l'on est averti de ses propres tendances, dont l'élémentaire humilité impose d'admettre qu'elles sont probablement très largement partagées. Au moins deux sources à ce jugement : l'existence des tendances communes du raisonnement, qui ne concernent pas seulement les novices en science (Viennot, 1996), et la résistance impressionnante de rituels d'enseignement qui traversent niveaux scolaires et frontières (Viennot, 2006). Sur le premier point, la prédilection du raisonnement commun pour la mise en histoire des explications, prédilection partagée par nombre d'auteurs, nous vaut moult présentations en forme d'enchaînements cause effet d'évènements simples et temporairement considérés. Englouties le cas échéant dans de telles entreprises : la (quasi-) permanence des phénomènes et la multiplicité des facteurs intervenant de concert. Les aspects réputés explicatifs ne sont pas confrontés à l'analyse de bilans dans la durée, ni situés explicitement dans leur registre propre, celui des régimes transitoires : les serres explosives sont légion, à prendre les explications proposées au pied de la lettre et surtout dans la durée. Il arrive que ce format de présentation s'adapte très bien au sujet traité, quand on choisit de mettre l'accent sur les aspects transitoires, justement, mais il est à mettre sous haute surveillance. On peut faire beaucoup de choses en matière d'explication, mais le raisonnement y gagne quand l'auteur explicite à quel jeu il joue.

En matière de rituels, l'une de ces pratiques usuellement non discutées illustre ici les bénéfices que peut entraîner une attitude critique. « *Les étudiants*

⁴ En l'occurrence, la diffusion Rayleigh par les molécules de l'air joue un rôle crucial dans la netteté du faisceau vert (une fréquence favorable pour ce phénomène) observé, netteté que la diffusion par les poussières, rituellement invoquée, expliquerait mal à elle seule.

en sont incapables », entend-on dire souvent. À ce compte, les enseignants non plus, puisque, à l'unanimité des groupes consultés, ils laissent passer dans l'énoncé d'un exercice une hypothèse hasardeuse, au mieux d'une dommageable ambiguïté. Là encore, ce n'est pas tant la critique qui importe que les ouvertures qui peuvent s'organiser vers plus de raisonnement et, il est temps de réintroduire ce terme, de plaisir. C'est bien cette cooccurrence, pourtant réputée improbable, dont témoignaient les personnes très peu spécialisées en physique qui se sont vues incitées à analyser pourquoi une montgolfière tenait en l'air, ceci sur la base de deux dépendances linéaires dont il fallait comparer les coefficients. Le modèle qui leur était proposé était certes simplifié, car adapté à l'interlocuteur, mais respectait l'essentiel du phénomène. Plus exigeante que l'usuelle canalisation vers une résolution type (sur la base du théorème d'Archimède), l'approche adoptée n'a pas rebuté, bien au contraire. Ceux qui ont dit avoir apprécié le bénéfice de l'effort requis et du temps passé, que ce soit en entretien individuel ou en situation d'enseignement normale, ne sont pas loin de constituer l'intégralité de l'effectif consulté, et les jugements rétroactifs sont sévères : « *pourquoi est-ce la première fois que l'on me dit ça ?* ». Il est remarquable de voir le basculement d'attitude de personnes au départ crispées sur leurs souvenirs défailants et qui, au fil de la discussion, s'autonomisent et réalisent qu'elles ont des choses à dire, des questions pertinentes à poser, ceci sur la base de leurs connaissances préalables qui se révèlent bien suffisantes pour l'exercice, certes très encadré, de l'analyse critique.

On ne peut pour autant nier la difficulté. Ce n'est pas sans raison que l'alliance du raisonnement et du plaisir semble un peu contre nature, même si on rebaptise le second terme de façon plus spécifique et plus adaptée : satisfaction intellectuelle. C'est que les réussites dans ce domaine ne s'obtiennent pas sans beaucoup d'attention. Longue est la liste des petites manipulations soi-disant illuminantes, des images chocs, des explications vibrantes, qui sont des impasses pour le raisonnement. Puisqu'il s'agit ici de choix, on peut faire celui de privilégier illuminations, chocs et vibrations émotionnelles – soit dit sans ironie. Mais si l'on vise, pour le profane, la satisfaction de sentir qu'il raisonne et qu'il en recueille les fruits (Viennot, 2005b), il est sans doute indispensable d'avoir une conscience précise des aspects quelque peu techniques évoqués plus haut. Certes, mettre en histoire, c'est toujours un peu mettre en familiarité, même s'il s'agit d'évolution stellaire. Pour autant, il faut savoir détecter et hiérarchiser les éventuelles conséquences – sur le plan de la cohérence – des scénarios explicatifs de trame exclusivement linéaire causale.

Affermir et préciser ces conclusions demande, il va sans dire, plus de recherche, d'autant que l'étude du couple raisonnement/satisfaction intellectuelle, en référence à la sociodiffusion de la science, est encore peu développée à ce jour. ■

BIBLIOGRAPHIE

- ASPECT A., BALIAN R., BALIBAR S., BREZIN E., CABANE B., FAUVE S., KAPLAN D., LÉNA P., POIRIER J.-P. & PROST J. (2004). *Demain la physique*. Paris : Éd. Odile Jacob.
- BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- BOBIN J.-L., LEQUEUX J. & TREPS N. (2006). C'était à Paris. *Bulletin de la Société Française de Physique*, n° 153, p. 31.
- CHAUVET F. (1994). *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*. Thèse de doctorat de l'université Denis-Diderot-Paris 7, Paris.
- CLOSSET J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse de troisième cycle de l'université Denis-Diderot-Paris 7, Paris.
- DIU B. (2000). *Traité de physique à l'usage des profanes*. Paris : Éd. Odile Jacob.
- FAUCONNET S. (1981). *Étude de résolution de problèmes : quelques problèmes de même structure en physique*. Thèse de troisième cycle de l'université Denis-Diderot-Paris 7, Paris.
- FRANCE : ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie (1998). L'effet de serre. In *Programmes et Accompagnement du cycle central (5^e, 4^e)*. Paris : CNDP, p. 92-93.
- JACOBI D. (1987). *Textes et images de la vulgarisation scientifique*. Berne : Peter Lang.
- JACQUIER B. & VANNIMENUS J. (2005). *La lumière et la matière*. Paris : EDP Sciences.
- JEANNERET Y. (1994). *Écrire la science*. Paris : PUF.
- JURDANT B. (1975). La vulgarisation scientifique. *La Recherche*, n° 53, p. 141-155.
- LÉVY-LEBLOND J.-M. (1986). *Mettre la science en culture*. Nice : Anais.
- MATHÉ S. (2006). *L'esprit critique d'étudiants peu spécialisés en physique, avant et après mise en alerte*. Mémoire de master 2 didactique des disciplines, université Denis-Diderot-Paris 7, Paris.
- MAURY J.-P. (1987). *L'atmosphère*. Paris : Palais de la Découverte : Hachette.
- MAURY J.-P. (1989). *La glace et la vapeur, qu'est-ce que c'est ?* Paris : Palais de la Découverte.
- OGBORN J. & WHITEHOUSE M. (éd.) (2001). *Advancing physics A2*. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- RADVANYI P. (2006). Un rayon vert dans la nuit blanche. *Bulletin de la Société Française de Physique*, n° 152, p. 32.
- RÉFLEXIENCES (2005), n° 2.
- ROZIER S. & VIENNOT L. (1991). Students' reasoning in elementary thermodynamics. *International Journal of Science Education*, vol. 13, n° 2, p. 159-170.
- ROZIER S. (1988). *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*. Thèse de doctorat de l'université Denis-Diderot-Paris 7, Paris.
- VALENTIN L. (1983). *L'univers mécanique*. Pais : Hermann.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en Physique*. Bruxelles : de Boeck.

- VIENNOT L. (2004). Raisonnement commun en physique : relations fonctionnelles, chronologie et causalité. In L. Viennot & C. Debru (éd.). *Enquête sur le concept de causalité*. Paris : PUF, p. 7-29.
- VIENNOT L. (2005). Les valeurs de la science. *Science et Avenir*, hors-série, n° 144.
- VIENNOT L. (2005, in press). Teaching rituals and students' intellectual satisfaction: What can we do? *Word View on Physics Éducation in 2005*. ICPE : International Conference Physics Education, University of New Delhi (Miranda House, convener Pratibha Jolly). London: World Scientific Publishing Co.
- VIENNOT L. (2006). Teaching rituals and students' intellectual satisfaction. *Physics Education*, n° 41, p. 400-408.