85e Année - Nº 732 Publication Mensuelle Mars 1991

Bulletin de l'Union des Physiciens

Association de professeurs de Physique et de Chimie

Sciences physiques telles qu'on les enseigne... et telles qu'elles se font : un divorce nécessaire ?

par Bertrand WOLFF
Sciences Physiques, Lycée Emile Zola, B.P. 518, 35006 Rennes Cedex

Ce texte est la «mise au propre» d'une intervention faite devant des étudiants en «Sciences de l'Éducation» (RENNES II), qui devait porter sur les problèmes de l'enseignement des sciences physiques.

Aucun de ces étudiants n'était bachelier scientifique et je ne suis spécialiste ni de «sciences» de l'éducation ni d'histoire des sciences. Il s'agissait donc d'un exposé fait à des amateurs par un amateur, avec toutes les limites et imperfections qui en découlent. J'aimerais qu'il ouvre un débat, et suscite les réactions critiques. On trouvera dans ce numéro les deux premières (et plus longues) parties, les suivantes devant porter sur : les rapports entre la théorie et l'expérience ; le rôle des mathématiques ; une critique de la rénovation pédagogique imposée par les textes officiels (pédagogie par objectifs, évaluation par capacités, etc...).

1. «J'AI LES RÉPONSES, J'AI LES RÉPONSES, MAIS QUI A LES QUESTIONS ?» (1)*

Électromagnétisme, mécanique, optique, thermodynamique, chimie minérale... Si vous êtes étudiant en sciences physiques vous voilà devant une série de gros tomes... des milliers de pages de réponses, mais savez-vous encore les questions ?

* **Les questions :** pourquoi le ciel est-il bleu ? pourquoi voyez-vous dans le miroir quelqu'un qui vous ressemble ? pourquoi les formes géométriques des cristaux de neige, et pourquoi la neige fond-elle ? pourquoi le soleil brille-t-il, et depuis si longtemps ? etc... etc...

J'ai pris volontairement des questions sur la « nature» (l'eau calme d'un lac peut servir de miroir...) ; on est habitué en effet à impliquer la physique dans les questions sur la «technique» : pourquoi l'avion vole-t-il ? pourquoi et comment l'émission et la réception radio, etc... ; mais la physique de l'ingénieur c'est toujours de la «science de la nature» domestiquée, et les premières questions du physicien ont été posées à la nature. Cette «évidence» doit être rappelée : je crois en effet qu'un élève du secondaire sera tout à fait prêt à accepter que les «sciences naturelles» sont des «sciences de la nature», mais souvent très étonné qu'on lui dise la même chose des «sciences physiques» ; lui sont-elles enseignées comme telles ?**

Si donc la physique qui se fait naît des questions posées à (ou sur ?) la nature, pourquoi n'en est-il pas de même de celle qui s'enseigne ?

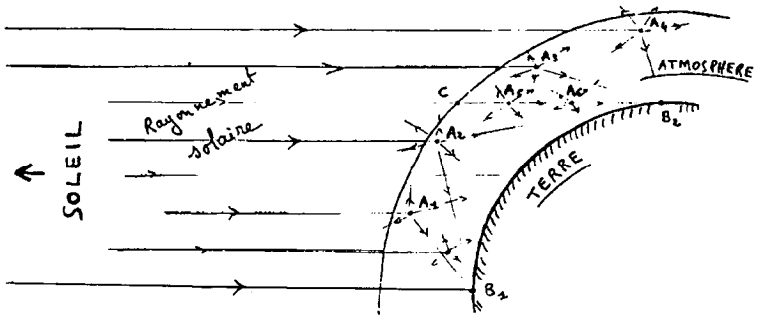
Mais vous voulez peut-être d'abord, pour le plaisir, des réponses rudimentaires ?

1 - Le bleu du ciel (2) **:** Le rayonnement solaire est partiellement diffusé par les molécules constituant l'atmosphère terrestre (processus schématisé en A_1, A_2, A_3, A_4). Et cela, davantage pour les radiations proches de l'«extrémité» bleue du spectre du rayonnement solaire que pour celles proches du rouge. C'est ainsi que, diffusée par des myriades de molécules comme en A_1 et A_2, de la lumière bleue parvient du ciel à l'observateur B_1 ; ou de A_3 et A_4 à l'observateur B_2.

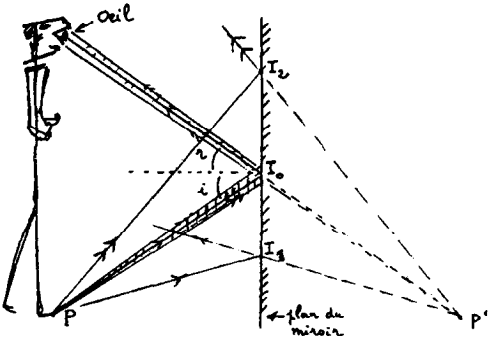
* Les notes sont placées à la fin de chaque partie.

** Que penser de l'avis du C.N.P. d'inclure la physique dans la technologie en 6e et 5e ? (N.D.L.R.).

«En prime», nous comprenons pourquoi le soleil paraît rouge au couchant : il est ici au couchant pour l'observateur B_2 ; la lumière qui lui provient du soleil selon le trajet CB_2 a suivi un long trajet dans l'atmosphère ; chaque diffusion (A_5, A_6, ...) enlève du bleu à l'intensité lumineuse transmise en ligne droite ; il reste donc le rouge. Pour l'observateur B_1 le soleil est au zénith, le trajet à travers l'atmosphère est très court et l'affaiblissement de la composante bleue est négligeable.



2 - Le miroir : Tous les rayons lumineux issus de P, qu'ils se réfléchissent en I_0, I_1, I_2, semblent, après réflexion, provenir de P', symétrique de P par rapport au plan du miroir. Notamment, ceux qui se sont réfléchis au voisinage de I_0 sont interceptés par votre œil qui les interprète comme venant de P' (faisceau hachuré). Ce raisonnement peut être appliqué non seulement à P, extrémité de votre pied, mais à tout autre point de la région située à gauche du miroir. Il s'ensuit que la personne que vous voyez dans le miroir est votre symétrique par rapport au plan du miroir : on dit, en optique, que c'est votre image virtuelle (virtuelle : P' n'est pas une source lumineuse réelle, la lumière **semble** seulement en provenir). Colle : cette personne qui vous ressemble est-elle votre double ? Réponse : Non ! levez votre bras droit, elle lève son bras gauche... Vous ne vous voyez pas comme vous voient vos amis ! (quel monde, quels hommes, quelles femmes, sont les plus beaux ? ici ou de l'autre côté du miroir ? Cette question n'est plus du ressort de la physique...).



3 - Les cristaux de neige (3) : La figure a représente la forme d'une molécule d'eau. Globalement neutre électriquement elle présente un léger déséquilibre dans la répartition de la charge, de telle sorte que des forces attractives existent entre oxygène d'une molécule et hydrogène d'une autre. D'où l'assemblage à base hexagonale (figure b). Cette structure hexagonale de base, répétée avec une extraordinaire précision un milliard de milliards de fois explique la symétrie hexagonale des cristaux visibles à notre échelle ! (figure c)

volontairement inexact !
(voir note 3bis)

Figure a

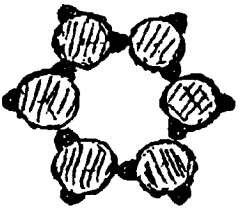


Figure b

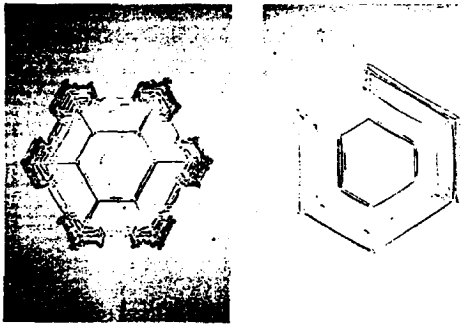
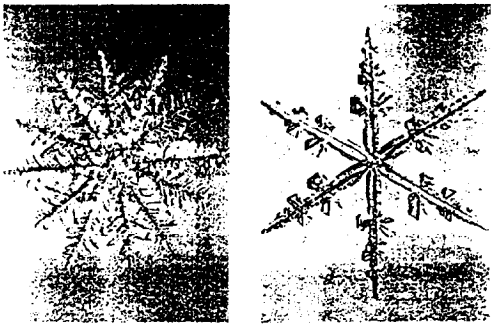


Figure c : extrait de la référence (3)



LES CRISTAUX PLATS sont en forme d'hexagone. Les deux cristaux du bout son des plaquettes, ceux du bas, des étoiles. Ce ne sont pas des moulages mais des cristaux réels. Ils ont été recueillis par Teisaku Kobayashi, de l'institut d'études des Basses Températures à Sapporo (Japon) et photographiés sur une lamelle de microscope, à la fois sous éclairage direct et en lumière réfléchie.

Et pourquoi ces cristaux fondent-ils ? Les chauffer revient à augmenter l'agitation thermique des molécules constituantes. Si cette agitation est suffisante, le réseau hexagonal se brise, les attractions intermoléculaires maintiennent encore un état condensé, mais les molécules peuvent «glisser» les unes sur les autres : ce fluide condensé est l'eau liquide. Une agitation encore plus grande provoque la «libération» complète des molécules : lors de l'ébullition, il y a dispersion des molécules ; ce fluide dispersé est la vapeur d'eau.

4 - L'énergie solaire : En un jour, l'énergie solaire rayonnée vers la terre est ≈ 100 000x consommation énergétique mondiale en un **an** ! Or la terre ne reçoit qu'une minuscule fraction de l'énergie rayonnée dans tout l'espace, et le soleil brille ainsi depuis environ 5 milliards d'années !

Cela est possible grâce aux réactions nucléaires de fusion de l'hydrogène (principal constituant des étoiles naissantes) en hélium. De façon très schématique le soleil «fonctionne» comme une gigantesque «bombe H» permanente... Et lorsque des réactions nucléaires sont en jeu, l'énergie libérée par une masse donnée de «combustible» peut être des milliards de fois plus importante que lors de réactions chimiques de combustion. Les ressources du soleil sont ainsi assez énormes pour lui permettre

de briller de façon probablement à peu près identique environ 5 milliards d'années encore...

*** Premières réflexions sur les réponses :**

1 - Les «réponses» que j'ai données sont bourrées de références **implicites** à des notions **déjà connues** (ce qu'un jargon qui me semble peu élégant nomme «prérequis»).

Dans l'exemple du «bleu du ciel» : «l'atmosphère est constituée de **molécules**», la **diffusion** de la lumière, la **décomposition** de la lumière «blanche» ; enfin la figure ne peut être comprise que si l'on a parfaitement intériorisé l'idée de la «**propagation rectiligne** de la lumière» (du moins, entre les diffusions). Et dans l'exemple du miroir ? à vous de faire la liste, je signale «seulement» : la loi de Descartes de la réflexion angle d'incidence = angle de réflexion (i = r). Dans celui des cristaux de neige : «molécule d'eau», «forces électriques», «agitation thermique»... Le soleil : énergie, noyau de l'atome et réaction nucléaire...

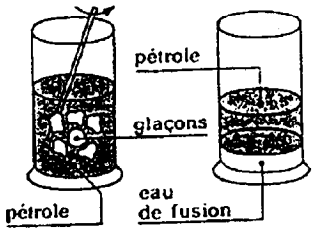
Ceci montre la difficulté qu'il y aurait à bâtir un enseignement des sciences physiques sur le principe «partir des questions».

Pourtant, l'enseignement primaire ou celui du 1er cycle des collèges «fait semblant», parfois, de le faire. Ainsi, je trouve dans un manuel de 6ème des titres de chapitres (ou §) tels que : pourquoi l'ampoule brille-t-elle ? la glace change-t-elle de masse lorsqu'elle se transforme en eau ? change-t-elle de volume ? etc... (4)

Je trouve utile l'emploi de cette forme interrogative, mais mon expérience en 6ème m'a parfois cruellement montré à quel point les questions ont été soigneusement triées et ordonnées en fonction de l'ordre établi par «l'Éducation Nationale». Cet ordre est souvent allègrement bousculé par les écoliers. Jugez en :

La question au programme porte sur le changement de volume lors du changement d'état (solide → liquide) de l'eau. Je fais l'expérience suivante :

(la figure est tirée de la référence (4). L'éprouvette est graduée ; le choix du pétrole ou de l'alcool s'explique par la nécessité d'une densité moindre que celle de la glace, de sorte que cette dernière soit immergée).



volume des glaçons + volume du pétrole > volume de l'eau de fusion + volume du pétrole

donc : volume des glaçons > volume de l'eau de fusion

Elle marche très bien. Mais voilà qu'un empêcheur d'enseigner en rond bondit : «M'sieur, ça fondrait plus vite ou moins vite si c'était de l'alcool et pas du pétrole ?». Je me tire d'un piège préalable : pensait-il bien fusion et non dissolution ? puis je me dérobe par une 1ère réponse : «ça dépend de la température de l'un ou l'autre liquide». Mais j'avais le «devoir» de l'encourager à revenir à la charge en étant plus précis : «pris à la même température, bien sûr !». Supposons maintenant un étudiant ayant non seulement les bases d'un bac scientifique, mais ayant étudié ensuite les phénomènes de propagation de la chaleur ; bien qu'ayant en principe toutes les connaissances nécessaires, il risque fort de ne pas savoir **analyser** le problème (= le décomposer en questions réductibles à ces connaissances de base) puis regrouper ces connaissances en fonction du problème. Quand à moi... j'ai bredouillé quelques phrases où je n'ai pu éviter les termes : «température», «chaleur», «échanges thermiques» (or la distinction des notions de température et de chaleur n'était pas encore supposée acquise...). Qu'en est-t-il en effet ? alcool et pétrole ont des «chaleurs massiques» différentes. Connaissant leurs valeurs, un élève de 1ère S devrait savoir en déduire quelle masse minimum de l'un ou l'autre, pris par ex. à 20° C, permettra de faire fondre la masse de glace donnée ; mais on est encore loin de la réponse demandée : la fusion est-elle plus ou moins **rapide** ? Cela dépend de l'excédent par raport à la masse minimum calculée, mais aussi de la rapidité des échanges thermiques, c'est-à-dire aussi du comportement de l'alcool ou du pétrole vis à vis de la conduction et de la convection. Là, on est bien au delà du bac : je ne sais pas répondre ! Ajoutez en plus les échanges avec l'air ambiant, le fait que la glace soit pilée ou en gros blocs...

Alors, que peut-on répondre à mon écolier ? 1. «la réponse est hors programme»... 2. une réponse rigoureuse mais incompréhensible... 3. «le pétrole et l'alcool se comportent différement dans les «échanges thermiques», c'est-à-dire au cours du processus

dans lequel le liquide chaud réchauffe la glace jusqu'à ce que les températures s'égalisent. Mais l'étude de ces comportements est très compliquée, demanderait de plus de longs calculs : je ne sais pas te répondre»...

A votre avis, lesquelles de ces réponses feront passer le plus sûrement toute envie de se poser des questions physiques authentiques à cet élément perturbateur ? 1. et 2. bien sûr, qui sont les plus «confortables» pour le professeur ! Mais, au fait, n'y a-t-il pas une 4ème réponse, la meilleure ? «fais l'essai, et donne nous la réponse la prochaine fois !»... (si ça n'a pas été votre réflexe, c'est que la pratique scolaire vous a déjà habitué à vous intéresser à l'exercice théorique plutôt qu'à la réponse à votre question !) Si en plus vous ajoutez quelques mots dans le genre de la réponse 3., *vous aurez enseigné que l'expérience est reine, et que dans beaucoup de problèmes complexes, il est bon de la faire d'abord, tant mieux si vous savez expliquer le résultat après !*

2 - *Les «vraies» questions appellent en général des réponses qui bousculent les barrières des chapitres et même des tomes,* et souvent seule la littérature de «vulgarisation» fait ce travail de regroupement et de mise en ordre de connaissances spécialisées, n'en gardant que l'indispensable, dans le but de répondre à une question précise. *Cela montre à mon avis la noblesse, et aussi l'extrême difficulté, de la vulgarisation de qualité.*

* Autres réflexions : où s'arrête la chaine des « pourquoi» ?

A peine ai-je «expliqué» le bleu du ciel, vous me dites : Oui, mais pourquoi les molécules diffusent-elles plus dans le bleu que dans le rouge ? La théorie de l'interaction entre le rayonnement et une molécule est un «classique» de l'enseignement supérieur de l'électromagnétisme, et elle explique pourquoi une molécule diffuse plus le bleu. Mais... si vous étiez très calés vous sauriez me montrer que lorsque des milliards de milliards de molécules interviennent, alors il « suffit» qu'elles soient régulièrement disposées pour que les lumières diffusées «interfèrent destructivement» : à l'échelle macroscopique, il n'y aurait que de la lumière transmise : Finalement si le ciel est bleu c'est aussi parce que les molécules y son distribuées au hasard, du fait de leur agitation désordonnée... «Mais quel esprit maniaque imaginerait que les particules qui diffusent le rayonnement puissent être ordonnées ?» si vous objectez ainsi, vous avez raté des questions et des réponses ! Molécules ou ions régulièrement ordonnés ? voilà des cristaux, ils ne diffusent pas

la lumière, mais la transmettent ou la réfléchissent, et vous savez maintenant pourquoi Ordonnez maintenant des atomes d'un métal : c'est l'état métallique et vous savez qu'une surface métallique bien propre et polie ne diffuse pas mais réfléchit ! (2)

Les cristaux de neige : pourquoi la forme de la molécule d'eau, pourquoi sa dissymétrie électrique ? pourquoi l'évaporation existe-t-elle en dessous de 100º C, et même la sublimation (passage direct glace → vapeur) en dessous de 0º C, tandis qu'il n'y a pas de fusion possible en dessous de 0º C ? mais aussi, pourquoi sur la base hexagonale se construisent tantôt des hexagones, tantôt des étoiles, tantôt des aiguilles ? Et pourquoi les uns ou les autres sont-ils si étonnamment réguliers même à notre échelle alors qu'on pourrait imaginer des figures comme (a) ?

On trouve des éléments de réponses à ces deux dernières questions dans (3). J'en reprends seulement la figure (b). (Les auteurs terminent de plus pas un petit calcul dont la conclusion est : il est très vraisemblable qu'il n'y ait jamais eu deux cristaux de neige identiques !)

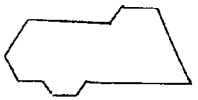


Figure a

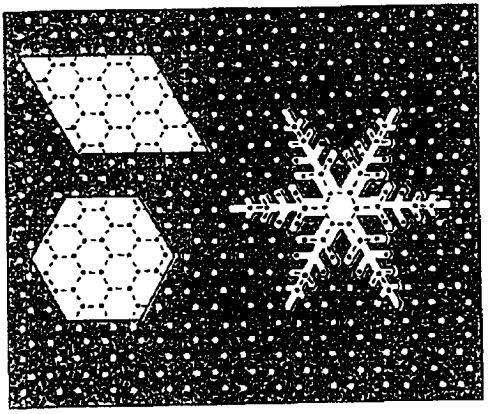


Figure b : LES FACES D'UN CRISTAL DE NEIGE *(formes blanches)* ne sont pas orientées n'importe comment par rapport au réseau des molécules *(en pointillé)* qui composent le cristal. Certaines faces du cristal croissent plus vite que d'autres et donnent naissance à des formes cristallines dont la symétrie hexagonale macroscopique reflète la symétrie interne de l'organisation des molécules d'eau.

Le soleil : nous sommes habitués à ce que les réactions qui libèrent beaucoup d'énergie se propagent si rapidement qu'elles deviennent explosives (en chimie : mélanges tonnants, en physique nucléaire : bombes à fission ou à fusion...) ; pourquoi alors le soleil n'explose-t-il pas, dissipant d'un coup la formidable énergie qu'il nous distribue si aimablement en un régime permanent étalé sur quelques milliards d'année ?

Peut-on conclure ? Deux attitudes peuvent exister, schématiquement, dans l'enseignement :

1) on est tenté de ne pas compliquer encore la vie de l'élève en lui ôtant la sécurité du «j'ai compris», «je sais» ;

2) on peut préférer l'aider à voir qu'il ne fait que **passer d'une ignorance première à cette «ignorance qui se connait»** dont parlait Pascal (5), et qu'il en est ainsi non seulement de lui mais peut-être de toute l'humanité... (6)

*** Plus les questions sont «informées», plus elles sont captivantes (et souvent ne peuvent surgir que de cette information préalable)**

Le soleil : connaissant sa masse, la puissance qu'il rayonne, supposant qu'il soit le siège des réactions chimiques les plus libératrices d'énergie que l'on connaisse, on a pu calculer dès le début du 19ème siècle qu'il aurait ainsi brûlé toutes ses réserves en moins de 2 500 ans !

Puis au milieu du 19ème siècle, Helmholtz et Kelvin cherchent à expliquer l'énergie solaire par l'échauffement produit par la contraction gravitationnelle de l'énorme nuage de gaz dont serait issu le soleil... on arrive péniblement à quelques millions d'années. Bref, aucun processus alors connu ne pouvait expliquer qu'il brillait - comme on le savait déjà - depuis tellement plus longtemps !

Dire cela, et non le cacher, c'est *faire participer le «débutant» à l'attrait du mystère non élucidé, lui apprendre non une réponse mais que son «pourquoi» reste (restait, dans ce cas) un pourquoi pour toute l'humanité !*

Il me semble que le silence volontaire sur les questions qui n'ont pas trouvé de réponses est un vieux scandale de notre enseignement.

Quand j'étais lycéen, il y avait à apprendre un chapitre assez long sur le magnétisme terrestre, l'«inclinaison» et la «déclinai-

son», l'évolution de ces deux grandeurs selon le lieu, le jour et l'heure... En négligeant les petites variations locales tout se passe comme si la terre contenait un barreau aimanté, de direction voisine de l'axe Sud Nord géographique. Mais la question «pourquoi» était soigneusement évitée. Peut-être parce qu'il aurait fallu, à l'époque, avouer qu'**on ne savait pas**, et, plus intéressant, qu'on ne **savait** même qu'une chose, c'est que malgré son noyau constitué principalement de fer et de nickel, la terre ne pouvait pas contenir un tel aimant : la température du noyau est très supérieure à la température à laquelle les matériaux ferromagnétiques se désaimantent ! Peut-être aurait-on même pu épaissir le mystère en ajoutant qu'il y avait eu plusieurs inversions totales des pôles de cet «aimant» dans l'histoire de la terre, inversions qui sont devenues des moyen de datation géologique (des aimantations «fossiles» sont les «mémoires» de ces inversions)...

> Il se trouve qu'il existe actuellement une théorie qui «marche» à peu près : il y aurait une sorte d'effet «dynamo» lié aux mouvements de la masse conductrice relativement fluide du noyau terrestre (des conducteurs en mouvement dans un champ sont le siège de courants, qui produisent alors eux-mêmes un champ... ; le problème délicat est celui de la naissance du champ permettant «l'amorçage» de la «dynamo»...). Aussi cache-t-on moins la question, quitte à écrire : «ça s'interprète par la magnétohydrodynamique» (ce qui est pire à mon avis que de ne rien répondre du tout !)

En résumé, je regrette que l'on ne considère comme matière à enseigner que ce qui est (ou semble) bien établi, au lieu de signaler aussi les «trous» de la connaissance, qui existent en marge du moindre cours de niveau élémentaire. Je me rappelle avoir longtemps cru que je ne pourrais savoir sur quelles questions on pouvait faire de la recherche que si j'avais appris «jusqu'au bout» les théories les plus avancées !

Les questions plus «informées» sont plus captivantes : en voici encore un exemple. Repartons du bleu du ciel ; pour commencer la question est plus vive chez celui qui, ayant lu par exemple «on a marché sur la lune» (les aventures de Tintin ; Hergé ; ed. Casterman) a vu «de ses propres yeux» que le ciel apparaît sur cet astre d'un noir d'encre même au voisinage immédiat du soleil, pourtant éblouissant... Mais surtout, vous êtes vous demandé pourquoi ce ciel **noir** ? Certes, si nous vivions dans un monde clos renfermant, outre le soleil, quelques milliers d'étoiles, ce serait évident (7) mais si comme on a pu le penser

après la révolution copernicienne, nous vivons dans un univers infini (8) indéfiniment semé d'étoiles, alors, quelles que soient les étoiles «entre» lesquelles vous regardez, vous en trouvez d'autres ; si lointaines direz-vous que leur éclat est imperceptible ? mais Hubert Reeves vous expliquera (cela s'appelle le «paradoxe d'Olbers») que l'infinité des faibles éclats des étoiles de plus en plus éloignées «doit» au contraire rendre éblouissante chaque portion de la voûte céleste (9) ; la question «pourquoi la nuit étoilée est-elle noire ?» sort de son apparente banalité ; elle implique rien moins que l'évolution cosmique !

*** Les questions contre les fausses évidences de l'habitude :**

Peut-être à propos de l'obscurité de nos nuits étoilées avez-vous remarqué à quel point l'habitude peut nous tenir lieu d'évidence. J'aimerais en donner deux autres exemples.

* L'espace existe-t-il indépendamment de la matière qu'il «contient» ? Tout élève de lycée a appris en maths à «travailler» dans un espace dit euclidien à trois dimensions (chaque point est repéré par un x, un y, un z, etc...), puis, quand il fait de la physique, il ne s'étonne pas de placer les événements réels (mouvement d'un projectile, etc...) dans cet espace des mathématiciens, comme s'il s'agissait d'une «scène» préexistant aux acteurs qui viennent, sans la modifier, y jouer leur rôle. Il serait étonné d'apprendre que Newton tenait si peu cela comme allant de soi qu'il en a fait l'objet d'un des principes qu'il énonce (10) (il existe «l'espace absolu, sans relation aux choses externes, qui demeure toujours similaire et immobile»). Mais à la même époque Descartes répugnait à regarder l'espace comme indépendant des objets corporels et pouvant exister sans la matière ; le contenant (espace) est le produit du contenu (matière). Or la théorie de la relativité générale d'Einstein «confirme (...) la conception de Descartes», nous dit Einstein (11) : les «acteurs» modèlent la scène, la matière «courbe» l'espace, sa géométrie n'est pas euclidienne !

* Les orbites célestes : elles s'expliquent par la loi de Newton de la gravitation universelle. C'est-à-dire : toute masse attire toute masse, et la force attractive entre deux objets massifs est proportionnelle à chacune des masses, et inversement proportionnelle au carré de la distance. D'autre part (2ème loi de Newton) l'accélération communiquée à un corps de masse m par une force $\vec{F}$ est $\vec{a} = \vec{F}/m$. Ces deux grandes lois de la mécanique newtonnienne, d'énoncé très simple, jointes à la «loi de l'action et de la réaction» (3ème loi de Newton), permettent à elles seules de déterminer (c'est un peu moins simple) les

trajectoires possibles des planètes autour d'un centre attracteur (ellipses ayant ce «centre» comme foyer), les trajectoires d'un projectile (obus, fusée), mais aussi l'existence et les formes de ces groupements d'étoiles que sont les galaxies, etc... Ainsi s'est-on habitué à ce qu'une action **à distance** explique toute la mécanique céleste, comme on s'est habitué aux forces électriques ou magnétiques **à distance** ; un cours de 3ème classe tout «naturellement» les forces en deux catégories : «de contact» et «à distance». Eh bien l'idée d'action gravitationnelle à distance était si peu «naturelle» pour Newton qu'il écrivait :

> «je désirerais que vous ne m'attribussiez point la gravitation innée. Que la gravitation soit innée, inhérente et essentielle à la matière, de sorte qu'un corps puisse agir sur un autre, à distance, dans le vide, sans aucune médiation à travers et par laquelle leur action et leur force puisse passer de l'un à l'autre, c'est pour moi une si grande absurdité que je crois qu'aucun homme doué d'une faculté compétente de penser en matière de philosophie ne pourra jamais y tomber.»

Ce sentiment d'insatisfaction fondamental de Newton est totalement passé sous silence par les «newtoniens» du 19ème siècle, obnubilés par la puissance extraordinaire de sa mécanique, au point que même Feynman se trompe en écrivant (12) que «Newton s'est satisfait du comment» !! Comme dans l'exemple précédent, on voit que les questions des précurseurs nous amènent en plein cœur des problèmes de la physique moderne. Ainsi la question de la propagation et de la transmission des actions est au cœur de la «mécanique quantique» moderne : des échanges de «particules» seraient responsables des actions à distance ; le «vide», siège de ces échanges, loin d'être un néant, grouille d'«agents de transmissions», devient une forme particulière de la matière...

*** Quelques conclusions provisoires et pistes pour une discussion** :

* Si la physique qui s'enseigne semble tellement loin des questions qui lui ont permis de se faire, il faut «donc» révolutionner son enseignement ?

Ce n'est pourtant pas ce que j'ai voulu dire, si l'on entend par là bâtir un enseignement sur les «questions». J'ai même particulièrement insisté sur les difficultés que cela présenterait : je ne crois même pas que placé devant un élève unique, un pédagogue «omniscient» (mettez si vous préférez des microordinateurs chargés par des multitudes de

programmeurs de multitudes d'«arbres» de questions et réponses et assez «interactif» pour permettre des multitudes d'enchaînements) puisse lui enseigner «la physique» simplement en suivant l'enchaînement particulier des questions de cet enfant... Et pas seulement pour des raisons de difficulté, mais pour des raisons philosophiques essentielles : la «physique qui se fait», c'est aussi la recherche incessante de théories sans cesse plus fondamentales et plus puissantes. *«L'ordre» de la physique enseignée n'obéit pas seulement à des impératifs techniques de commodité, mais il traduit la cohérence des théories physiques...*

* Les méthodes de la vulgarisation peuvent-elles être celles de l'enseignement ? Je ne le pense pas non plus. Adaptée à un sujet précis (répondre à **une** question, présenter **une** découverte), la vulgarisation devient vite lourde et répétitive dès que se multiplient les sujets. Et, là encore, l'acquisition progressive des «bases» n'est pas seulement un moyen **technique** d'éviter les répétitions, elle est nécessaire à la compréhension de ce qu'est la physique, de sa nature « hypothético-déductive» comme on disait dans mon cours de philo en terminale.

* Bien, mais si vous nous privez de révolution, **quelles réformes ?**

1) Apprendre à **préserver les questions**, même lorsqu'on les écarte temporairement. Les mettre en évidence plutôt que les camoufler... On l'a vu, c'est déjà un vaste programme !

Éviter la «protection par le jargon», qui tue les questions. Si un élève de 6ème vous demande pourquoi les bulles de savon sont irisées, ne répondez pas «c'est un phénomène d'interférences lumineuses» ! Si vous vous sentez de taille, peut-être pourrez-vous vulgariser à son niveau ce phénomène, mais vous avez le droit, pour respecter un programme qui n'est pas nécessairement idiot, de ne pas en prendre le temps et de lui dire quelque chose comme : «n'oublie pas ta question, quand tu en auras plus appris sur la lumière, tu pourras la reposer et comprendre...».

2) Cela dépend donc largement de l'attitude personnelle de chaque enseignant. Mais programmes et instructions officielles peuvent contribuer positivement ou négativement. Pourquoi serait-il interdit d'introduire dans un programme «**questions** sur l'origine du champ magnétique terrestre», ou, après l'étude de la réaction chimique « expliquer que l'énergie solaire ne peut **pas** être d'origine chimique» ?

3) Quitte à alléger certains programmes, ne pourrait-on y ménager des «trous» pour qu'un minimum (obligatoire ?) d'heures soit consacré à :

a) profiter de nouveaux acquis pour traiter un ou deux thèmes (à choisir dans une liste ?) sur le ton de la vulgarisation : dans certains livres, il y a des «lectures» dans cet esprit, mais cela reste très timide.

b) fabriquer avec la classe des énoncés d'exercices, en apprenant à simplifier astucieusement une question réelle, en général trop complexe, en un énoncé abordable avec les moyens du cours...

4) D'ailleurs les proportions entre enseignement des «bases» (et exercices d'automatisation) d'une part et «conférences de vulgarisation» (+ exposés d'élèves, etc...) d'autre part, doivent-elles être les mêmes pour tous les élèves du primaire et du secondaire ? Jusqu'à la fin de la 2de, la réponse officielle, au nom du principe démocratique, est «oui» (on parle de «pédagogie différenciée», mais dans le cadre de classes et programmes qui, eux, ne sont pas censés être différenciés !). On peut en discuter...

5) Il me semble que ça «cloche» actuellement des deux côtés. Les futurs «non scientifques», contraints à apprendre «les bases» de la même manière que ceux qui continueront, se voient privés des réponses qualitatives qu'on pourrait leur donner. Quant aux « scientifiques», se souviennent-ils seulement qu'il y avait des questions ? Je disais au début que les tomes des manuels étaient bourrés de réponses, mais est-ce vrai ? ou plutôt, qui s'en aperçoit ? Les lois qu'on apprend deviennent un but en soi. Bref, on apprend l'alphabet des réponses, mais pas les réponses...

6) Je disais plus haut que l'attitude personnelle de l'enseignant importe peut-être plus que programmes et directives ; c'est pour cela que **l'esprit de la formation que futurs enseignants et chercheurs reçoivent dans l'enseignement supérieur me semble devoir être profondément transformé. Il faudrait leur «réenseigner les questions»**, noyées dans le flot d'exposés axiomatiques et déductifs. Qu'à la fin de tel chapitre d'électromagnétisme, vienne un appendice : «ce que nous venons d'apprendre permet de répondre à la question du bleu du ciel...», ou de tel chapitre de thermodynamique «cela nous permet-il de comprendre la formation d'un nuage d'orage ?».

Un défaut universitaire français me semble être le mépris de la vulgarisation (quel qu'en soit le niveau ; il existe de la «haute

vulgarisation» utile - pour ne pas dire nécessaire - aux professeurs et chercheurs de haut rang...). Voyez donc les articles de maths et certains des articles de physique de l'Encyclopaedia Universalis : souvent illisibles même par le presque-spécialiste !

Le succès des collections «Pour la science» (chez Belin), «Points sciences» (au Seuil) et l'essor récent de quelques autres marque heureusement un renouveau ; Et, dans l'enseignement supérieur, des fascicules tels «la physique en questions» (de J.M. Lévy-Leblond) et la traduction du merveilleux «cours de physique de Feynman» (Interéditions).

Reste que j'aimerais bien qu'on demande à un candidat au CAPES ou à l'AGREG une réponse «grand public» à quelques unes des questions qui ouvraient cet exposé...

(1) La tradition hassidique rapporte qu'un rabbin apostrophait ainsi, dans la rue, les habitants de son «shtetl» (bourgade juive d'Europe Centrale). (Le hassidisme est un courant mystique apparu au 18^{e} siècle, en Pologne d'abord, au sein du judaisme)

(2) Bleu du ciel, diffusion par les molécules :

a) «Le Carnaval de la Physique» Jearl Walker - Interéditions

b) «Le cours de physique de Feynman» - Interéditions (Tome «mécanique n^{o} 2» p 89 à 93)

(3) «Les phénomènes naturels» Bibliothèque « pour la Science» Belin (article «les cristaux de neige» C. et N. Knight)

(3 bis) La référence (3) admet cette structure hexagonale, qui dans 2(a) ou (b) semble attribuée à l'angle représenté dans ma figure (a). Mais un élève de 2de pointilleux objecterait que son livre de chimie donne 105^{o} pour la molécule d'eau («libre»). Un manuel plus spécialisé ajoutera que cet angle est contraint à passer à 109^{o} dans la glace «classique», où la struture de base est tridimensionnelle. Mais je n'y ai pas trouvé l'explication des 120^{o} et de la base hexagonale plane des cristaux de neige ! D'où deux remarques :

(a) mon «explication» lors de cet exposé était un peu du bluff ! Je ne sais pas expliquer, mais je sais que ça «devrait être» l'explication (ce passage du microscopique au macroscopique «marche» pour des cristaux que je connais mieux)

(b) il est fort instructif que ni les manuels spécialisés, ni l'Encyclopaedia Universalis (gros articles sur : eau, glace,...) ne s'intéressent à notre question, alors que des considérations sur les structures moléculaires de l'eau et de la glace y sont surabondantes !

(4) Sciences Physiques 6^{e} - Hachette

(5) «Les sciences ont deux extrémités qui se touchent : la première est la pure ignorance naturelle où se trouvent tous les hommes en naissant. L'autre extrémité est celle où arrivent les grandes âmes qui, ayant parcouru tout ce que les hommes peuvent savoir, trouvent qu'ils ne savent rien, et se rencontrent en cette même ignorance, d'où ils étaient partis. Mais c'est une ignorance savante qui se connaît» (Pascal. Pensées)

(6) Y compris dans les temps à venir ? Ce n'est pas l'avis de Stephen Hawking, qui dans «Une brève histoire du temps» (grand succès de librairie en 1989 - Flammarion), écrit : «je crois qu'il y a quand même des bases d'optimisme prudent qui nous permettent d'espérer la fin prochaine de la quête des lois ultimes de la nature». Mais j'aurais de sérieuses objections à l'encontre de son point de vue...

(7) Si, du moins, les dimensions de ces étoiles sont assez petites pour qu'elles n'occupent pas, à elles seules, toute la «voûte céleste».

(8) «Du monde clos à l'univers infini», titre d'un livre de Alexandre Koyré (Idées Gallimard)

(9) Hubert Reeves «Patience dans l'azur. L'évolution cosmique» (Seuil Collection «science ouverte») pp 60, 61. Vous pourrez y lire que Képler, dès le début du 17^{e} siècle, demandait déjà : «si les étoiles sont des soleils, pourquoi est-ce que la somme de toutes leurs lumières ne dépasse pas l'éclat du soleil ?». Après avoir expliqué pourquoi une répartition sensiblement uniforme d'étoiles dans un univers infini dans l'espace et dans le temps donnerait un ciel partout lumineux, Reeves explique que l'obscurité du ciel est un argument en faveur des théories actuelles sur «l'expansion de l'univers».

(10) Isaac Newton. Principes mathématiques de la philosophie naturelle. Traduction de la marquise du Châtelet et commentaires de Clairaut. (Ed. fac. similé par A. Blanchard ; 9, rue de Médicis, Paris 1966).

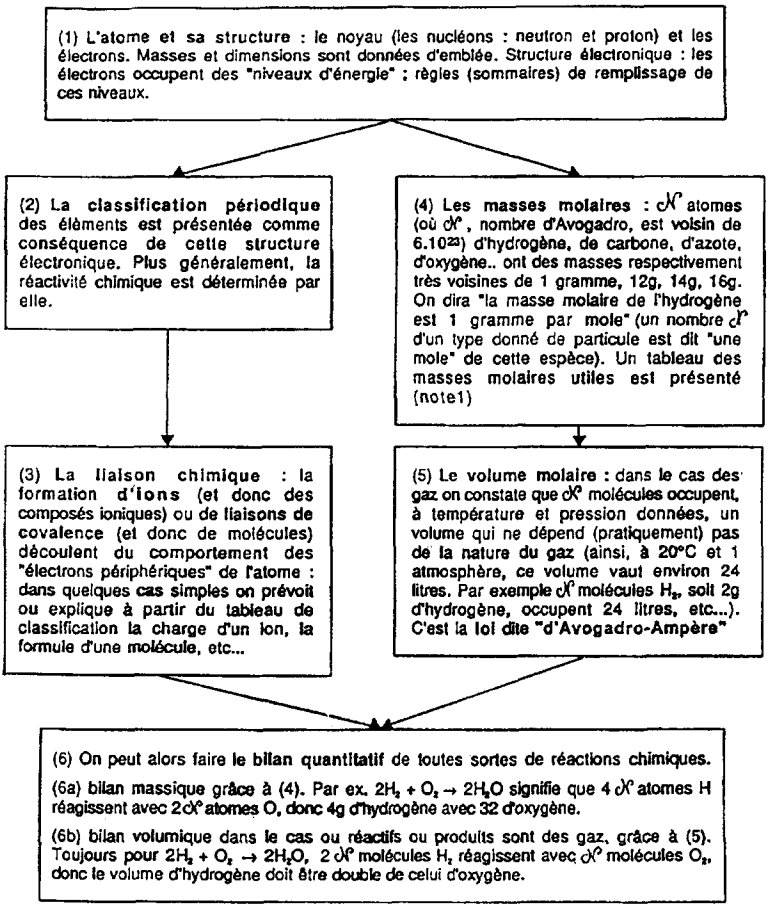
(11) Einstein «la relativité et le problème de l'espace», article publié en 1953, passionnant notamment d'un point de vue philosophique, inclus comme dernier chapitre dans : Einstein. La relativité - Petite bibliothèque Payot - j'ajouterais que dans la polémique Descartes - Newton - Leibniz l'argumentation est essentiellement théologique : voir référence (8). Par ailleurs bien que la pensée philosophique, métaphysique, joue un très grand rôle dans la démarche d'Einstein, sa «confirmation» de la conception de Descartes la renouvelle et la déplace assez radicalement...

(12) Dans «la nature de la physique» (Ed. Seuil - Collection points-science). Un merveilleux livre par ailleurs !

2. «L'ORDRE PÉDAGOGIQUE»... ET «L'ORDRE» HISTORIQUE

«Ordre pédagogique» : l'exemple du programme de chimie de seconde :

En gros l'enchaînement logique y est le suivant :



En résumé, la démarche est essentiellement déductive, à partir de la structure de l'atome posée dès le départ. La prédiction des bilans quantitatifs des réactions est un aboutissement.

«Ordre historique» : (note 2)

(A) Les éléments se combinent selon des **proportions en masse bien définies** (vers 1800) (note 3)

Le bilan quantitatif (6a) est ici point de départ !

(B) **L'hypothèse atomique** permet d'interpréter (A). Dalton 1808 : à chaque élément chimique correspond une sorte d'atome. Chaque sorte d'atome a une masse fixe. Les combinaisons chimiques se font atome par atome, et on appelle «molécule» la plus petite quantité du composé ainsi formé. Des proportions (A) découle un premier **tableau des «poids atomiques»** donné par Dalton (note 4), mais il est faux, car pour l'eau Dalton fait en 1808 l'hypothèse la plus simple : « HO» et non H_2O.

De (6a) à l'embryon de (4)

(C) Lorsque des gaz se combinent, alors il existe entre leurs volumes un rapport simple (1809 : Gay Lussac)

Le bilan quantitatif (6b), deuxième point de départ .

(D) **L'hypothèse d'Avogadro-Ampère** : (C) s'interprète en admettant qu'un volume donné de gaz (à température et pression données) renferme toujours le même nombre de **molécules**, quel que soit ce gaz. (1811 : Avogadro ; indépendamment, 1814 : Ampère) (note 5)

De (6b) à (5)

(E) Cette hypothèse permet de deviner, de proche en proche, les formules des molécules et du même coup de corriger les «poids atomiques» (note 6)

Voilà notre tableau de «masses molaires» de (4)

(F) Mendeleïev peut donc arriver : il peut en effet ranger les nombreux éléments maintenant connus, et de «poids atomique» établis avec précision, par ordre de poids atomique croissant et découvrir ainsi le retour «périodique» de propriétés chimiques (et physiques) analogues. (1869 : le fameux tableau mettant en lumière cette périodicité).

Nous sautons à (2) - sans explication par la structure interne de l'atome bien sûr - et à la prévision «d'affinités chimiques» comme en (3), à la nature de la liaison chimique près, bien sûr.

(G) Mais combien d'atomes réels dans ce qu'on appelle «l'atome gramme» (1g d'hydrogène, 16 d'oxygène, etc...). Très longtemps on n'en aura su qu'une chose, c'est que leur dimension est très en dessous de ce que peut atteindre le plus puissant microscope ! Tout au plus (par ex. en considérant la finesse ultime des feuilles d'or) pouvait-on dire que cette dimension étant **inférieure** à telle valeur, $\mathcal{N}$ devait être **supérieur** à telle autre valeur (en gros 10^{16} avec cet ex.). Pas de mesure directe possible (note 7). Seuls des calculs très indirects, fondés sur la théorie cinétique des gaz, et la mécanique statistique appliquée aux émulsions, au mouvement brownien, à la diffusion de la lumière par l'atmosphère - calculs entamés dans la 2ème moitié du 19ème siècle : Maxwell, Boltzman, etc... - ont pu converger vers la valeur de $\mathcal{N}$ donnée par Jean Perrin en 1913 (note 8).

(H) Nous voilà du coup avec dimension et masse individuelle de l'atome et de la molécule, «il ne reste qu'à» élucider sa structure. C'est le travail, en gros, du 1er quart du 20ème siècle. L'électron existe : 1897 ; l'atome a une structure lacunaire, existence du noyau : 1911 (Rutherford) ; modèle planétaire de l'atome : 1913 (Bohr) ;. la mécanique «ondulatoire» ou quantique (De Broglie 1924) expliquera l'existence des «niveaux d'énergie» discontinus occupés par les électrons.

C'est là dessus que s'ouvre - (1) et (2) - le cours de seconde.

Et... le neutron n'est découvert qu'en 1932 ; l'élucidation expérimentale et théorique du remplissage progressif des niveaux d'énergie est longue et difficile...

*** Deux ordres contradictoires :**

On voit sur cet exemple à quel point l'ordre historique largement «inductif» et partiellement «hypothético-déductif» , peut être différent - dans cet exemple il est même, en gros, contraire - de l'ordre d'exposition le plus «économique», déductif.

Bien d'autres exemples illustreraient une opposition parfois aussi tranchée, et de façon plus générale, au minimum une grande hétérogénéité. Ce pourrait être l'histoire de la radioactivité et du noyau atomique ou l'histoire de la mécanique, du moins jusqu'à Newton...

Cette hétérogénéité des deux «ordres» est-elle nécessaire, ou prouve-t-elle seulement la malignité, la perversion du système d'enseignement ? Pourquoi ne pas «revivre» les «découvertes» ?

*** Tentations et tentatives... :**

Lorsque j'ai commencé à enseigner, le cours de seconde débutait encore par l'apprentissage des distinctions fondamentales entre mélanges et corps purs, puis corps purs simples et composés, distinctions d'**abord** fondées sur des opérations expérimentales d'analyse immédiate (technique permettant de passer du mélange aux corps purs) et d'analyse élémentaire (par ex. la décomposition chimique ou électrolytique de l'eau). Cela occupait plusieurs leçons avant qu'on ne passe à «l'interprétation microscopique» (note 9). La loi des proportions définies de Proust était encore explicitement citée dans le manuel que j'utilisais, comme conséqence et preuve de la validité de l'hypothèse atomique (note 10).

Cette entrée en matière rendait facile et tentante une inversion de cette dernière démarche : «faire sentir» par les élèves ce qui pouvait bien expliquer la discontinuité des proportions dans les corps composés, bref faire «revivre» l'hypothèse de Dalton, retrouver «qu'il y a besoin des atomes» en ayant oublié un instant qu'aujourd'hui tout le monde le sait !

Ruser ainsi avec le programme de seconde n'est plus possible quant aux proportions massiques (11), mais avec les volumes... je ne résiste pas toujours : j'inverse un instant l'ordre d'exposition (mole → volume molaire → bilans volumiques) et je demande : que vous suggère la proportion 2 litres d'hydrogène pour 1 d'oxygène ? Pour l'élève de seconde sachant déjà l'équation ($2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$), mettre en relation 2 litres et 1 litre et les coefficients 2 et 1 «devrait» rendre évidente l'idée qu'il y a le même nombre de molécules par litre, qu'il s'agisse de H_2 ou O_2 !

Ayant ainsi «découvert» l'hypothèse d'Avogadro, je ne résiste pas non plus (sous forme de petits exercices : j'en ai déjà donné le principe note 6) à nous ramener en 1811 «avant les formules moléculaires correctes», pour jouer à les redécouvrir.

Et bien sûr, je résiste encore moins au couplet lyrique sur l'audace extraordinaire des hypothèses atomiques et moléculaires au début du 19ème siècle (voir note 5), sur l'extraordinaire jeu de devinettes (formules et même géométrie des molécules, valences, etc...) au bout duquel on sut à la fin du même siècle une grande partie de ce que l'atome «réel» de la physique et ses couches électroniques allaient **comprendre** et... prévoir après coup !

Hélas... si au début, le néophyte peut sourire des «croyez-en ma vieille expérience» de ses conseillers pédagogiques («tout ça est passionnant, mais malheureusement ce qu'il faut à l'élève c'est un strict minimum de notions et formules faciles à retenir et utiliser, il a déjà bien du mal, alors ne lui compliquez pas la vie par tous ces tatonnements») il est bien obligé de reconnaître quelques années après qu'il a «largué» parfois ses élèves au moment même où il se faisait plaisir ! (12) Et de se demander pourquoi : c'est qu'il est facile d'**utiliser** une connaissance, beaucoup plus difficile de **formuler une hypothèse** : que les proportions définies de Proust suggèrent les «briques élémentaires» de Dalton ne venait pas si facilement à l'élève, et très rares sont ceux qui savent formuler concrètement l'hypothèse d'Avogadro : «Monsieur, les coefficients sont les mêmes !» Prof : «D'accord mais qu'est-ce que ça veut dire ? Comment l'expliquer ?» Élève : «... ?»

Il est même amusant de voir que si la «constatation» (même rapport entre volumes qu'entre coefficients) ne choque pas, l'interprétation concrètre lorsque quelqu'un la donne enfin (même nombre de molécules par litre) suscite des réactions : «mais ce n'est pas normal, il n'y a pas de raison !», d'autant plus que ces élèves savent déjà à quel point les molécules diffèrent ne serait-ce qu'en masse. Il faut que je donne un minimum d'explications théoriques : « mais si, il y a des raisons», pour qu'on veuille bien y croire. Bref, ce qui est **déduit** est **cru plus facilement qu'une hypothèse «imposée par l'expérience»**, mais inexpliquée !

Cela pourrait être un signe d'une déformation produite par tout un système d'enseignement, qui privilégie le déductif tant dans les hiérarchies entre disciplines qu'au sein des disciplines. Et ça l'est effectivement ! Mais ce n'est pas tout, les élèves ont raison d'une certaine manière, l'expérience «n'impose» pratiquement jamais, et **historiquement**, tout le problème est bien qu'elle n'a rien imposé, et c'est pourquoi...

* Il n'y a pas d'ordre historique simple, l'histoire vraie des sciences est celle du désordre, et elle est compliquée !

Ainsi ce que j'ai appelé plus haut «l'ordre historique» est grossièrement simplifié, et s'il est des approximations légitimes, on verra que certaines, ici, peuvent mener au contresens complet, d'un point de vue philosophique.

1) D'abord, j'ai omis les sources extérieures à la chimie. Quelques allusions y ont déjà été faites en note. Mais il ne s'agit pas seulement de l'étude thermodynamique des gaz. Des méthodes physiques ont été très tôt des adjuvants puissants dans la détermination des «poids atomiques». Dès le début du 19^{e} siècle Dulong et Petit constatent sur divers exemples que la quantité de chaleur nécessaire pour élever le 1 degré la température d'un échantillon solide d'un corps simple de poids égal au «poids atomique» est toujours la même, quel que soit ce corps simple (13). Si on admet qu'il s'agit d'un loi générale, on peut déterminer ou vérifier d'autres «poids atomiques». A la même époque Mitscherlich attribue l'isomorphisme de certains cristaux à des formules de composition analogues. (14)
Cela donne deux moyens de résoudre les ambiguités de formules moléculaires qui furent, en fait, largement préférés à l'hypothèse d'Avogadro au moins jusqu'au milieu du 19e siècle.

2) Ensuite, j'ai fait naître l'atomisme avec Dalton. Or chacun sait que l'hypothèse atomique a largement précédé les débuts de la chimie quantitative. Les atomistes grecs ont inspiré Giordano Bruno et Galilée (15). Newton était atomiste, Boyle (1664 : the sceptical chymist) aussi ; les grands chimistes du 18^{e} siècle (comme Lomonossov ou Lavoisier) l'étaient au moins implicitement... On dira qu'il s'agissait chez les atomistes grecs de «spéculation philosophique», et chez Dalton d'une «théorie scientifique». Bien, mais la distinction n'est pas si facile, lorsqu'on y réfléchit (ce pourrait être un excellent exemple pour un cours de philo de terminale !). Plutôt que de la discuter longuement, je me contenterai de faire remarquer que la «coupure» éventuelle dans le statut de l'atomisme n'a pas été perçue comme telle par ses acteurs ! Avec les «pneumaticiens» des 17^{e} et 18^{e} siècle, avec la distinction nettre entre mélanges et combinaisons chimiques par Boyle, puis avec l'élaboration de la notion moderne d'élément (Lavoisier), l'attrait explicatif de l'atomisme se renforçait progressivement. Avec Dalton et l'attribution d'une masse fixe à chaque atome (16), la nouveauté est le pouvoir de prédiction quantitative : des mesures peuvent éventuellement infirmer la théorie. Mais si cette possibilité de «mise à l'épreuve» de l'expérience fait pour nous accéder l'atomisme à la dignité de théorie scientifique, Dalton ne perçut sans doute pas ce «saut». Car la présentation que j'ai donnée plus haut dans l'ordre (A) → (B) malmène l'histoire au sens où Dalton était atomiste d'**abord**. C'est parce qu'il l'était déjà qu'il s'est intéressé aux mesures **massiques** alors en plein essor. Et il l'était pour des raisons philosophiques et culturelles d'une

part, et à partir de considérations sur la météorologie et l'air d'autre part !

Bref, la correspondance «pédagogique» : un fait expérimental → un élément de théorie, n'a pas plus existé dans ce cas qu'elle n'existe en général.

Peut-être la théorie est-elle «en dernier ressort» issue des faits ? Mais alors dans un cas comme celui de l'atomisme, c'est selon un chemin, où plutôt des chemins extraordinairement détournés, moyennant de longs détours par la pensée spéculative...

3) Enfin, après avoir fait naître l'atomisme bien tard ; je l'ai fait triompher bien hâtivement !

Les «bases expérimentales» elles-mêmes furent contestées. Par exemple, Berthollet, au début du 19ème siècle, opposait aux «proportions définies» de Proust l'idée que le produit dépendait de façon continue des quantités relatives des réactifs. C'est qu'il confondait l'influence des proportions initiales sur le caractère plus ou moins total d'une réaction et la composition pondérale de la combinaison obtenue. Erreur ridicule ? Non ! Berthollet était tombé sur ce que nous appelons des équilibres chimiques ($A + B \rightleftarrows C + D$), et il fallait apprendre à distinguer **deux** problèmes (masse de A utile à «déplacer la réaction» dans le sens favorable à la production de C, ou masse de A réellement consommée dans les nouveaux produits). Alors « l'erreur» de Berthollet devient féconde : l'étude de l'influence des proportions initiales sur les équilibres chimiques débouchera sur toute une branche de la chimie quantitative («loi d'action de masse»).

D'autre part la détermination des masses molaires («poids atomiques») ne suivit guère la voie royale linéaire (A) → (B) → (C) → (D) → (E). J'ai indiqué (note 6) comment la confusion entre **atome** et **molécule**, pour les corps simples fut une cause de «mauvais fonctionnement» et de disgrâce de l'hypothèse d'Avogadro. Pour achever de compliquer les choses, les molécules de certains gaz sont dissociées partiellement aux températures où on mesurait les volumes gazeux. Faute de le savoir on aboutissait à des incohérences encore plus grandes.

Si la plupart des chimistes abandonnèrent donc pendant un demi-siècle l'hypothèse qui rétrospectivement, paraît la plus fructueuse, il faut reconnaitre qu'ils avaient quelques excuses.

Par ailleurs, dès 1813, une puissante opposition, celle des «équivalentistes», se dressa contre l'atomisme. Elle fut si durable que l'atomisme dans l'enseignement secondaire français fut censuré jusqu'en 1895 !

L'idée était que l'on pouvait fort bien garder les «poids atomiques» si utiles à la compréhension des combinaisons chimiques sans faire d'hypothèse sur leur cause, c'est-à-dire sur la structure de la matière, et on les rebaptisa pour les besoins de la cause poids «équivalents». La philosophie de cette école est particulièrement bien résumée par J.B. Dumas : «Si j'en étais maître, j'effacerais le mot atome de la science, **persuadé qu'il va plus loin que l'expérience** ; et jamais en chimie nous ne devons aller plus loin que l'expérience» (1836) (17). Elle triomphe particulièrement en France, d'autant mieux qu'elle s'accomode bien du désordre et des incohérences qui continuent à régner jusqu'en 1860 dans les valeurs admises pour les poids «équivalents» ou «atomiques» : dans l'idée d'une science positive, descriptive, empirique et non embarrassée de dogmatisme il n'est guère gênant que «l'équivalent» ait pour certaines réactions une valeur, et pour une autre le double ou la moitié. Ce n'est pas plus compliqué à apprendre que des formules moléculaires différentes.

Le «tableau de Mendeleiev» balaya la plus grande partie des dernières résistances «équivalentistes», mais Marcelin Berthelot (1827-1907) (18) tint bon jusqu'à sa mort, ce qui eut des conséquences néfastes pour l'eseignement français de la chimie du fait des pouvoirs qu'il détenait (Ministre de l'Instruction Publique en 1886).

Ceci explique pourquoi **en 1913 encore**, Jean Perrin écrivit «les atomes» comme un ouvrage militant explicitement pour que triomphe enfin la théorie atomique !

On raille un peu facilement «l'équivalentisme» de Berthelot. Autant, me semble-t-il, la volonté «mandarinale» d'établir le monopole d'une seule école sur l'enseignement et sur les publications est facile à condamner (hum ! et les censures et monopoles de diverses «chapelles» dans les publications scientifiques et dans l'Université actuelle ?) autant la question philosophique n'est pas à négliger : à partir de quel

moment le pouvoir explicatif d'un être imaginé par la théorie «prouve»-t-il l'existence réelle de cet être ou, comme disait Jean Perrin, de cet «invisible simple» («expliquer du visible compliqué par de l'invisible simple») ? Plus récemment : les quarks «expliquaient» la physique des particules du noyau, existaient-ils ou n'étaient-ils qu'une commodité théorique ? Aujourd'hui ils existent... mais sur la «réalité physique» de la «fonction d'onde» ou «vecteur d'état», concept théorique essentiel de la mécanique quantique, la polémique n'est pas close, depuis 1925 ! L'attitude dominante (ça ne sert qu'à connecter des résultats de mesure) est, curieusement, très proche du positivisme que l'on reproche à Berthelot.

Qu'il s'agisse de l'hypothèse héliocentrique de Copernic ou de l'hypothèse atomique, nous avons tendance à considérer que la théorie qui explique plus économiquement un plus grand nombre de choses est celle qui correspond à une **vérité** plus profonde, et ce indépendamment de critères de précision quantitative (le système de Ptolémée en astronomie, la théorie des équivalents en chimie, n'étaient pas inférieurs de ce point de vue). Mais pourquoi ? Et cette vérité est-elle automatiquement assurée quelle que soit la théorie considérée ?

* L'histoire des sciences... c'est encore plus difficile que les sciences !

On retient une partie du roman... parce qu'on en connait la fin. C'est ce que j'ai faif au début de cet exposé ! Résultat : on ment (involontairement) beaucoup plus facilement encore qu'en histoire politique. Nous sommes tellement imprégnés par le contexte conceptuel des sciences telles qu'elles sont développées aujourd'hui que la simple compréhension des théories finalement tombées dans le discrédit ou l'oubli est parfois impossible. Même les évidences (surtout les évidences !) d'alors nous déroutent, faute de pouvoir à la fois effacer ce que nous savons de notre mémoire et y incorporer le contexte de l'époque. Une fois que vous avez les concepts de courant électrique et d'intensité, de force électromotrice d'un générateur et de tension, essayez donc de comprendre comment de 1800 à 1820 on interprétait le fonctionnement d'une pile en circuit fermé (en terme par exemple de succession de «décharges») : le départ ne s'était pas fait de l'électrocinétique d'avec l'électrostatique, où circuit fermé impliquait décharge et donc perte de la «tension». Vous verrez que la gymnastique consistant à chasser ce que vous savez en 1989, et à intégrer ce que vous êtes censés savoir en 1800 n'est pas facile ! (19)

Conséquence : s'il n'est pas déjà pas facile d'être un professeur de physique polyvalent quant aux diverses branches de la physique, il est impossible d'avoir en plus une connaissance sérieuse de l'histoire de ses différentes branches. Déjà beau si en s'y spécialisant à plein temps on peut s'y retrouver dans un domaine et une époque déterminés.

Conclusion essentielle : prétendre enseigner selon «l'ordre historique» serait non seulement difficile, long, tortueux, mais plus sûrement encore serait une imposture. Corollaire : ce qui précède confirme toutes les critiques qui ont pu être faites aux démarches dites de «redécouverte», au sens où cette dernière est une illusion : l'élève (ou le prof !) à qui les «proportions définies» suggèrent l'atome n'est pas «aussi génial que Dalton» (et plus que Berthelot), il est simplement conditionné par toute une culture !

Certains ont pu rejeter la «démarche de redécouverte» globalement en même temps que son caractère illusoire, prônant, contre cette illusion de la redécouverte et contre les récritures «pédagogiques» de l'histoire, un enseignement dogmatico-déductif où l'expérience n'intervienne strictement que pour «vérifier» ou « appliquer» la théorie (20). On aura compris que je préfère le bricolage à cette fausse rigueur. Moyennant un peu de prudence, il **faut** mettre l'élève en situation active (qu'il s'agisse de la réflexion sur une expérience qu'il vient de faire, ou sur un résultat expérimental historique) : qu'il cherche à «redécouvrir», quitte à lui signaler que la découverte fut moins simple. De même, pourvu qu'on ne prétende pas faire **L**'histoire-**De** la physique, on peut mettre **De**-l'histoire - **Dans** la physique qu'on enseigne. On peut, et, je pense, on le doit :

✻ De l'histoire des sciences dans l'enseignement des sciences physiques. Pourquoi ?

* En premier lieu, pour des raisons dépassant l'efficacité propre de cet enseignement : **pour qu'il garde,** ou même qu'il retrouve, **un contenu culturel authentique** (21).

1) En réintégrant les sciences dans ce qu'on pourrait appeler l'aventure humaine au sein de l'Univers :

a) les questions oubliées, dont j'ai parlé dans la 1ère partie, sont souvent ressuscitées par l'histoire
b) nos techniques et connaissances ne doivent pas être intemporelles, mais situées, et ainsi nous relier à notre histoire.

2) En ramenant les sciences dans la Société, pas seulement par leur «retombées technologiques» aujourd'hui évidentes, mais par leur origine même :

– «Au début était le travail humain» : le levier et autres machines simples ne sont pas comme on pourrait le croire à l'issue d'un cours de 2nde des «conséquences du théorème des moments» . L'homme les avait inventés avant qu'Archimède ne réfléchisse à leurs lois. Les arsenaux de Venise inspirèrent Galilée, et ses fontainiers Torricelli : sans eux, la nature eût-elle dès cette époque oublié son «horreur du vide» ?

– Mais c'est aussi au nom d'une analyse des sociétés que des historiens «internalistes» contestent cette vision d'une science issue des pratiques de production : dans l'Antiquité par exemple, tradition artisanale et pensée spéculative étaient séparés, et la pensée rationnelle s'est développée, selon eux, par un travail interne, mené en quelque sorte sur elle même, quitte à ce qu'ensuite les révolutions survenues dans la pensée retentissent sur toute l'humanité et sa vision d'elle même (par exemple lorsque la révolution copernicienne la priva d'un Cosmos signifiant pour l'Homme) (22). A quoi les «externalistes» rétorquent que la pensée savante était elle-même profondément structurée par l'état des techniques et l'organisation sociale et, par exemple, la façon de vivre le temps ou l'espace qui en découlaient...

– Le débat est loin d'être clos, mais ces polémiques mêmes, le fait que non seulement le développement des sciences mais celui de leur histoire se fassent au travers de bagarres dont celle entre « atomistes» et «équivalentistes» n'est pas la plus violente, suffisent à situer les sciences dans les Sociétés bien humaines...

3) En mettant en lumière le rôle du questionnement philosophique (théologique éventuellement) dans l'évolution des idées en physique (23) (et voir note 11 de la 1ère partie)

Ainsi lorsqu'Einstein analyse la genèse de la théorie de la Relativité, il écrit, à propos des notions d'espace et de temps : «au point de vue logique, ce sont des créations libres de l'esprit humain, des instruments de la pensée, qui doivent servir à établir un lien entre les expériences. La tentation de nous rendre compte de leur origine empirique montrera jusqu'à quel point nous sommes effectivement liés à ces notions. Nous prenons ainsi conscience de notre liberté...»
Or son esposé a montré que cette «tentative de nous rendre compte...» prend largement sa source chez Berkeley, Hume, Kant, Mach...

* En second lieu, les raisons d'efficacité pédagogique (mais l'intégration à une Culture n'est-elle pas l'âme d'une pédagogie ?) ne sont pas moindres :

1) Contre l'ennui scolaire :

Je me suis souvent demandé pourquoi les élèves trouvaient passionnants le nucléaire ou les microordinateurs et s'ennuyaient si souvent en mécanique. Parce que, d'un côté, c'est le nouveau, et de l'autre des vieilleries bien connues depuis longtemps ? Mais cela suffit-il à en ternir l'attrait même pour eux, qui connaissent bien mal, ou pas du tout, ces «vieilleries» ? Le point de vue historique n'est sûrement pas le seul moyen de réveiller la curiosité et l'intérêt. Mais c'est un bon moyen : le «suspense», l'aventure revivent.

Le «principe de l'inertie» ne sort pas seulement, immédiatement «visible», de la table à cousin d'air, il s'impose difficilement contre l'évidence des sens (d'Aristote à Newton...).

Un cours qui pourrait être facilement insipide sur : porteurs de charge électrique, intensité d'un courant et tension prend sens si l'on voit un phénomène marginal (l'électrostatique de salon au 18^{e} siècle) se transformer avec les nouveaux générateurs électriques en une base essentielle de notre civilisation technique, et aussi devenir la base de notre compréhension de la matière (l'atome). Et pour cela 3 parenthèses de 10 minutes, ou une fiche polycopiée, peuvent suffire.

2) Contre les fausses «évidences» de l'habitude.

J'ai illustré déjà ce point dans la première partie : on a vu que les «évidences» sur l'espace et le temps, ou sur les «actions à distance», étaient des produits historiques, qui furent choquants en leur temps, et qu'inversement un peu d'histoire peut aider à s'en affranchir.

3) Affronter les conceptions fausses au lieu de les contourner : l'ordre déductif seul non seulement ne permet guère la surprise ou l'émerveillement, mais il est dangereux. Il laisse souvent subsister conceptions et représentations fausses au lieu de les contester. Bien que la thèse selon laquelle le développement de la pensée de l'enfant repasse systématiquement par les mêmes stades que ceux qui vont, dans l'histoire, de la pensée préscientifique à la science, me semble douteuse sous cette forme généralisatrice, il en est parfois ainsi, soit parce que les conceptions anciennes étaient comme celles de l'enfant «trop

proches» de l'évidence sensible, soit encore parce que le «langage naturel» est largement héritier de conceptions rejetées par la science moderne (de la «voûte céleste» aux «atomes crochus»...).

C'est particulièrement vrai en mécanique : faute d'une critique des conceptions prégaliléennes sur le mouvement, ces conceptions et représentations persistent chez les élèves lorsqu'ils analysent la «nature» hors exercice scolaire, même si **à côté** ils ont accepté sans difficulté principe de l'inertie et loi F = ma de Newton.
Or l'histoire de l'erreur et de sa réfutation est souvent la critique la plus efficace.

En chimie je ne suis pas sûr que l'élève moderne de seconde muni d'une **définition** rigoureuse de la distinction mélange/combinaison chimique, n'en ait pas moins une **perception** nulle ou fausse de cette distinction.
En combiner l'appréhension expérimentale et des remarques historiques sur le rôle qu'elle eut dans l'avènement de la chimie moderne est un moyen de **donner sens** à ce qui est autrement apprentissage mécanique...

En 6ème, même quand des élèves ne disent pas d'eux-mêmes que «la lampe brille parce que ce qui sort du + de la pile et ce qui sort du – s'y rencontrent brutalement», il m'arrive de dire qu'à l'époque de l'invention de la pile on a cru à l'explication de l'échauffement par le «conflit», **et que c'est faux**... avant d'affirmer que c'est la circulation d'un «courant» qui produit l'échauffement...

4) Exercer la pensée imaginative, apprendre à faire des hypothèses :

J'ai indiqué à quel point utiliser de façon déductive une connaissance était plus facile pour l'élève que former une hypothèse pour interpréter les phénomènes. C'est une question de difficulté, mais aussi de mentalité : quelle meilleure école de l'audace à tenter des hypothèses que l'histoire des sciences ?

* De l'histoire des sciences. Comment ?

Je serai aussi peu révolutionnaire, aussi platement réformiste (mais sur la nécessité de ces réformes il faut être je crois intransigeant) qu'à la fin de la première partie, puisqu'on ne peut pas plus bâtir un enseignement des sciences à partir de leur histoire qu'à partir des «questions»... **Il ne s'agit pas de renverser «l'ordre didactique»**.

Les quelques exemples cités au fil de l'exposé montrent ce qu'on peut faire : une parenthèse ici, une lecture là, un exercice... (24)

Tout de même des mesures institutionnelles peuvent y aider. D'abord en abandonnant le culte de l'ordre d'exposition linéaire le plus économique : dans un livre, ou en classe, pas d'excursions, pas de redites, de changements d'angle, ça surchage l'élève et ça perd du temps ! Oui, mais **ça l'ennuie** aussi, et ça n'est pas une mince cause de temps perdu. Un manuel tantôt déductif (là où c'est ça qui est le plus beau et le plus exaltant), tantôt historique (quand l'histoire vaut d'être racontée) est-ce impossible ? (25). Quand je disais plus haut mes difficultés, les élèves «largués»... il me restait à ajouter : pas plus largués qu'autrement ! Et il suffit de distinguer assez clairement ce qui est à retenir, à apprendre, de ce qu'on raconte, stylos posés, «pour la curiosité» pour que la «physique utile» ne soit pas plus mal apprise, avec en plus (même si l'on n'a pas tout compris et encore moins retenu) le sentiment que ce n'est pas seulement quelque chose qui s'apprend, mais quelque chose qui s'est fait...

Ensuite, il faudrait là aussi des libertés, des trous dans le programme et non des impératifs (seul impératif : servez-vous de ces libertés pour faire au moins une ou deux fois dans l'année «quelque chose» ; je frémis à l'idée de ce que serait un chapitre historique imposé). Quelles libertés ?

Oserais-je avouer que j'ai souvent eu envie de substituer à un pseudo-TP de «mise en évidence expérimentale» un exposé de vulgarisation historique ? Je reviendrai dans la 3ème partie sur la critique de certains de ces TP, et sur les raisons pour lesquelles, les court-circuiter me poserait tout de même problème !
Parmi ces «envies» = substituer au TP «principe de l'inertie» en seconde une demi-heure d'exposé de vulgarisation sur la façon dont Galilée, qui, lui, ne pouvait «supprimer le frottement», put «deviner» ce qui arriverait si on le supprimait, ou à un TP de mesures sur la chute des corps (fastidieuses en même temps que précises, grâce à des chronos électroniques déclenchés par cellules photosensibles) un récit nous reportant aux conditions dans lesquelles Galilée l'étudiait, muni de son pouls comme chronomètre...

En cours aussi, l'expérience «historique» rudimentaire liée à un bref récit de son contexte, met parfois mieux en lumière le nouveau phénomène qu'on veut étudier que sa présentation parfaite par un

appareil moderne (bien sûr, il faut se familiariser avec les appareils dernier-cri, et il nous en manque ; de cela aussi, je reparlerai).

*** Comment cacher l'histoire en faisant semblant de la révéler ?**

Voici un exemple de ce qu'à mon avis il ne faut pas faire. Il y a un sujet sur lequel presque tous les manuels de seconde proposent un «document» plus ou moins développé : l'histoire du tableau de Mendeleïev. On y trouve à peu près invariablement ceci : l'idée de familles d'éléments s'est developpée auparavant, puis vient Mendeleïev et en 1869 «**classant les éléments par ordre de masse atomique croissante**, il définit des périodes»... (26), on souligne l'audace qu'il a eue de laisser des cases vides, prédisant les caractéristisques d'éléments qu'on allait en effet découvrir des années plus tard, enfin on conclut sur la fécondité de ce tableau... Cette «belle histoire» escamote ce qui est historiquement l'essentiel : la chose à dire, qui pourrait exciter la curiosité et l'émerveillement, c'est bien que Mendeleïev ait disposé en 1869 des «masses atomiques».
Il me semble que par cette phrase où tout semble aller de soi on espère la passivité de l'élève là où on devrait souhaiter qu'il se demande : «ça alors, il ne savait rien de ce que je viens d'apprendre sur les atomes, et il avait l'ordre des masses croissantes ?». On ne peut lui répondre dans le détail, mais n'est-ce pas l'occasion de lui faire entrevoir le gigantesque jeu de recoupements, mené par les chimistes du 19ème siècle ?

Bien sûr c'est déjà «mieux que rien» si l'on donne ce genre de repère chronologique, mais est-ce positif de développer en même temps la mentalité : «apprendre sans se poser de question ?» . Et cela, peut-être toujours par la faute du même postulat que j'ai critiqué en 1ère partie, qui est de ne jamais laisser une question ouverte...

*** Une formation pour les enseignants :**

J'ai dit qu'un enseignement de l'histoire des sciences proprement dite était excessivement difficile, et que ce n'était pas le rôle de l'enseignant de sciences physiques. J'ai dit aussi qu'il y avait à mettre en œuvre de façon souple un «état d'esprit» historique plutôt que de bouleverser l'ordre de l'enseignement (tout de même, une «conscience historique» éviterait certaines erreurs aux auteurs des programmes !). Cela suppose l'acquisition de cet état d'esprit, et je crois pour cela que des cours **spécifiques** d'histoire des sciences doivent faire partie de tout cursus d'enseignement supérieur scientifique. Lorsque cela existe en France, c'est en général au niveau de la haute spécialisation. Or une

introduction élémentaire à l'histoire et à l'épistémologie scientifique devrait être accessible à tout étudiant au cours même du 1er cycle universitaire !

«Introduction élémentaire» non pas au sens d'un vague ensemble de généralités, mais au sens où un ou deux **exemples** seraient traités par l'enseignant chargé de ce cours, variables selon le lieu et l'année...

Ainsi, il ne s'agirait pas d'imposer au futur enseignant scientifique une histoire générale des sciences, mais si on lui fait approfondir au moins un thème historique au cours de sa formation, il aura peut-être acquis une curiosité historique plus générale ?...

(1) On pourrait s'attendre là aussi à une présentation déductive appuyée sur (1) : les noyaux d'hydrogène, carbone, azote, oxygène sont respectivement constitués de 1, 12, 14 et 16 nucléons (du moins les noyaux «normaux» c'est-à-dire les plus abondants dans la nature, mais il existe des «isotopes» des mêmes éléments plus riches en neutrons : ainsi le «carbone 14» a 14 nucléons). $\mathcal{N}$ est tel que $\mathcal{N}$ x masse d'un nucléon ≈ 1g. Les masses molaires semblent donc découler directement de la composition du noyau.
De nombreux élèves s'en aperçoivent, cependant cette démarche est proscrite afin d'éviter de soulever toute une série de difficultés :

a) j'ai négligé ci-dessus la masse - faible - des électrons ; protons et neutrons n'ont pas exactement la même masse ; pire - mais excitant ! - la masse d'un noyau est inférieure à la somme des masses des nucléons constituants (c'est la fameuse «perte de masse» de la physique nucléaire). Du coup si on choisit $\mathcal{N}$ de sorte que pour le carbone 12 la masse molaire soit exactement 12g, alors aucune autre n'est **exactement** entière.

b) la plupart des éléments sont des mélanges d'isotopes, aussi les masses molaires «utiles» peuvent être nettement plus éloignées encore des valeurs entières (ex : 35,5 pour le chlore, mélange de chlore 35 et chlore 37).
C'est donc par souci de simplicité qu'on «parachute» sans explication un tableau de valeurs utiles ainsi que la définition légale (mais absconse) de la mole fondée sur le carbone 12. Ou plutôt par souci d'une précision et d'une rigueur dont l'utilité n'apparaitra qu'en

terminale scientifique (en 2de des valeurs suffisamments arrondies sont utilisées pour que les difficultés indiquées en a) ne se manifestent pas !).

(2) Je me suis servi de :

a) «histoire de la chimie» de B. Wojtkowiak (Ed. Technique Documentation - Lavoisier)

b) un article de Bernadette Bensaude - Vincent (les tribulations de l'atome...) dans le numéro hors série de Science et Vie « 200 ans de science» (Mars 89)

c) l'article Chimie (histoire de la) de l'Encyclopaedia Universalis et articles biographiques

d) «les atomes» de Jean Perrin (1913) - Voir note 8

(3) Entre 1792 et 1804, Richter le premier puis Proust et Dalton énoncent diverses lois des proportions «définies», « multiples», etc... concernant les masses. Pour les illustrer reprenons l'exemple de la synthèse de l'eau :

a) oxygène et hydrogène sont toujours consommés dans la proportion de 32 à 4 donc de 8 à 1. C'est ce que généralise la loi des «proportions définies» (Proust 1801).

b) il existe aussi une combinaison, plus rare : l'eau oxygénée, H_2O_2 en écriture moderne. On trouve alors une proportion de 32 à 2 donc de 16 à 1, qui est multiple simple de la précédente. C'est ce que généralise la «loi des proportions multiples» (Dalton 1804. Mais l'eau oxygénée ayant été découverte en 1818, ses exemples étaient différents). Cette dernière conforte Dalton dans l'hypothèse atomique : les atomes étant combinés en molécules par nombres entiers simples, on passe d'une proportion à la proportion multiple lorsque change un de ces entiers.

(4) L'idée est de poser égal à 1 le «poids atomique» de l'hydrogène. Supposant alors que l'eau est «HO», la proportion 8 à 1 [rappelée en a), note précédente] entraîne un «poids atomique» 8 pour l'oxygène (Dalton donne en fait 7) et ainsi de suite, de proche en proche.

(5) Une hypothèse aussi extraordinairement audacieuse - qu'étaient les molécules ? et 24 litres en contiennent-ils 100 000, 36 millions... ou 6.10^{23} ? et par quel miracle en même nombre même si de composition et masse totalement différentes ? - si forte soit son pouvoir explicatif en chimie (simplicité des proportions volumétriques) n'aurait sans

doute pu être formulée sans arguments extérieurs, venus de la physique : la remarquable identité des comportements thermodynamiques des gaz.

(6) Voici comment, dans un premier temps, l'hypothèse (D) permit de corriger l'erreur de Dalton (O deux fois trop faible) : puisque le volume d'hydrogène est double de celui d'oxygène, les molécules en sont aussi deux fois plus nombreuses, ce que Gay Lussac écrira $2H + 0 \rightarrow H_2O$ ce qui donne bien, si H = 1, O = 16 à partir des proportions massiques. Mais l'idée que la molécule d'un corps simple (comme oxygène et hydrogène) pouvait ne pas être monoatomique manquait, bien qu'Avogadro en ait émis l'idée, d'où toutes sortes d'incohérences qui entrainèrent même une longue disgrâce de l'hypothèse d'Avogadro.
L'idée de l'hydrogène diatomique pouvait pourtant à son tour être suggérée par exemple par la synthèse du gaz chlorure d'hyrdogène : le volume de chlore est le même que celui d'hydrogène, le volume de chlorure d'hydrogène obtenu est double. Si on admet pour ce dernier la formule la plus simple HCl, alors d'après l'hypothèse d'Avogadro, ces volumes sont en désaccord avec $H + Cl \rightarrow HCl$, mais en accord avec $H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl$. Par cet exemple (que je propose parfois aux élèves à titre d'exercice «historique»), je montre le **principe** des hypothèses et recoupements successifs possibles, **mais ne prétend pas qu'il représente l'ordre historique** par lequel s'est imposé en pratique «H_2» au lieu de H. La difficulté est qu'il faut toujours faire quelque part des hypothèses de simplicité (j'**admets** HCl... je pourrais être échaudé par l'échec de HO !) = les tâtonnements et recoupements successifs n'ont abouti à un système cohérent que vers 1860.
En 1818 d'abord (42 éléments), puis en 1826, Berzelius avait certes donné des tables très précises C : 12,2 Cu : 63,4 S : 32,2 - mais par utilisation presque exclusive des proportions massiques. Les travaux, fondés sur la loi d'Avogadro, de Gerhardt et Wurtz, conduiront enfin à doubler certaines valeurs fausses (années 50). Au 1er Congrès International de Chimie (Karlsruhe 1860) Cannizzaro plaide brillamment pour le système de «poids atomiques» ainsi édifié, mais l'unanimité n'est pas faite pour autant.

(7) On reprend parfois en 2de, pourtant, une expérience inspirée de Lord Rayleigh et de Devaux, utilisant l'étalement maximum d'une gouttelette d'huile de volume connu à la surface d'une eau parfaitement calme. L'épaisseur de la couche formée est alors calculée aisément. Si cette couche est monomoléculaire et rigoureusement ininterrompue on atteint donc «l'épaisseur» de la molécule d'oléine. Mais ces hypothèses

sont discutables, selon Jean Perrin (note suivante). L'ordre de grandeur du résultat obtenu est cependant correct.

(8) Jean Perrin «les atomes» 1913 («Rédaction nouvelle» 1935 Ed. Alcan). Ce livre est à la fois un historique et un plaidoyer complet pour faire enfin triompher définitivement l'hypothèse atomique et moléculaire.
Le premier calcul de $\mathcal{N}$ (dès 1865) utilisait la théorie cinétique de la viscosité des gaz. En 1908, Jean Perrin confirme (et précise) ce résultat par l'étude d'un phénomène totalement différent : la répartition en altitude des grains d'une émulsion ; puis par des calculs sur le mouvement brownien... C'est la remarquable convergence d'une dizaine de méthodes de calcul fondées sur des phénomènes étonnamment divers (et qui «imposent tous au nombre d'Avogadro une valeur comprise dans un intervalle qui converge de plus en plus vers la valeur $6.1.10^{23}$ généralement admise») qui lui semble la preuve enfin irréfutable de la réalité moléculaire : les molécules des théories utilisées dans ces calculs ne sont pas un «truc explicatif» marchant par hasard, mais une réalité !

(9) Cela a-t-il été simplement reporté en 1er cycle ? Non ! En $6^{ème}$, on étudie des combustions, en se limitant à quelques idées simples : consommation des réactifs, formation de produits nouveaux, l'eau et le dioxyde de carbone comme produits communs de la combustion d'une grande variété de combustibles usuels. Puis, dès la 5ème, depuis 1987, les molécules et atomes sont parachutés comme point de départ. Par ex. : dans «Sciences Physiques 5ème» Hachette les titres de chapitre sont 1) les molécules 2) molécules et atomes. En 1) ce manuel fait référence à l'histoire : le modèle moléculaire est imaginé au 19ème siècle et permet alors d'interpréter facilement les propriétés physiques des gaz (j'ai signalé en effet - note 5 - le rôle des arguments extérieurs à la chimie, «venus de la physique»). Le reste du texte «décrit» l'état gazeux, les atomes, les molécules... Viennent ensuite 3) combustion du carbone et du soufre (rappel de $6^{ème}$, mais surtout occasion de donner la définition **microscopique** des corps simples et composés) 4) le fer et l'air 5) cycles de réaction du soufre etc... Outre leur intérêt et leur attrait immédiats ces chapitres permettent de donner les définitions microscopiques des distinctions mélanges/corps purs et corps purs simples/composés (à nouveau). Un des chapitres suivants porte sur la conservation de la masse (Lavoisier est cité) dont on note la concordance avec la conservation des atomes. Cette démarche semble permettre, sans difficultés graves, et en maintenant un équilibre

satisfaisant entre réactions intéressantes «par elles-mêmes» et notions fondamentales, de mettre très tôt de jeunes élèves «dans le bain» des conceptions modernes. Et sans doute, le contexte culturel est tel qu'il est souhaitable de le faire ? Mes objections portent donc non sur le cours de 5ème mais sur le bilan global (de la 6ème à la Terminale) :

1) Quand des sources historiques de la théorie chimique sont mentionnées, pratiquement aucune n'est interne à la chimie !

2) Surtout, **les conditions mêmes de la chimie** - conditions non seulement historiques, mais encore aujourd'hui techniques - **semblent avoir disparu de son enseignement** (sauf par allusions, comme pour la distillation des pétroles) = comment dispose-t-on de corps «**purs**», quelles sont les opérations macroscopiques concrètes par lesquelles on distingue, et prépare, mélanges et corps purs, corps composés et corps simples ?

(10) «Cours Baîssas» - Dreyfus - Chimie 2de CT Hachette 1966.

(11) Du moins, pas en ménageant le «suspense». Bien sûr, je fais remarquer, mais a posteriori, comment les rapports de masse, calculés à longueur d'exercices, ont, en sens inverse, fourni une base à l'hypothèse atomique.

(12) Je dirai plus loin pourquoi je trouve qu'il faut quand même s'entêter !

(13) En écriture moderne c x M = Cte. Ou : Une mole d'atomes d'un solide a toujours même capacité calorifique.

(14) l'idée est : si $X_m\ Y_nZ_x$ cristallise comme $A_mB_nC_p$ c'est que sans doute l'atomicité x de l'élément Z est la même que celle connue, p, de l'élément C.

(15) Son atomisme fut peut-être cause bien plus essentielle de ses démêlés avec l'Église que son héliocentrisme. Cf Galilée hérétique, de Pietro Redondi (Gallimard 1985)

(16) Les «atomes» grecs différaient, eux par les formes : pointus, arrondis...

(17) Et, encore plus tardivement, Sainte-Claire Deville (le découvreur de l'aluminium) : «je n'admets ni la loi d'Avogadro, ni les atomes, ni

les molécules, refusant absolument de croire ce que je ne puis voir, ni imaginer...»

(18) Ne pas confondre avec Berthollet. Par ailleurs chimiste remarquable, par exemple par ses synthèses en chimie organique, il fut, en philosophie un «positiviste» convaincu.

(19) Voir dans le bulletin de l'Union des Physiciens nº 713 (4/89) les articles : «formation des concepts d'électrocinétique» par A. Benseghir et «G.S. Ohm» par B. Pourprix et R. Locqueneux.

(20) C'est je crois le défaut majeur du pamphlet de Despin et Bartholy «le poisson rouge dans le Perrier» (Ed. Criterion 1983) qui contribua à l'époque de façon féroce et parfois réjouissante (mais excessive ?) à une polémique contre le «spontanéisme» des « pédagogies de l'éveil» et des «méthodes actives».

(21) Voir ma contribution aux Cahiers de Beaulieu nº 8 (l'enseignement des sciences physiques a-t-il un contenu culturel ?)
(C.C.A.F.E. Campus de Beaulieu - 35042 Rennes Cedex).

(22) Voir notamment A. Koyré (référence citée note 8 de la 1ère partie).

(23) «L'évolution des idées en physique» est justement le titre d'un merveilleux petit livre de Einstein et Infeld (Petite bibliothèque Payot). Les auteurs avertissent qu'«à travers le labyrinthe des faits et des concepts nous avons dû choisir quelque grande route, celle qui nous paraissait la plus caractéristique et la plus significative», donc une histoire largement réordonnée en fonction de sa conclusion moderne. Cela n'en fait pas moins une sorte d'hymne au pouvoir d'inspiration et de découverte... des théories fausses, et plus généralement au rôle de la pensée imaginative.

(24) Sans parler de ce qu'on peut faire (ou plutôt qu'on pourrait faire si la charge de travail du professeur de physique n'était pas plus écrasante encore que celle du professeur en général ?) hors du cadre de l'horaire obligatoire : club d'histoire et vulgarisation scientifiques, documents écrits et notes de lectures échangés en lecture libre entre élèves intéressés et prof, etc... L'expérience semble prouver que le caractère facultatif de ces suppléments, loin de les déprécier, les valorise aux yeux des participants.

(25) Des collègues me disent qu'en français aussi, le souci de rédiger des grammaires «simples» les a rendues... inutilisables et incompréhensibles. Je voudrais insister : la tendance chez les enseignants de physique est à écarter les manuels comportant trop de «lectures», compléments, remarques en petits caractères, soupçonnés «d'inflation». «C'est très bien pour le prof mais pas pour l'élève», dit-on. «Il lui faut, un livre où il n'y a que le minimum, où il sache d'avance que tout est à lire et à retenir». Je ne crois pas que cela repose sur une enquête sérieuse. Lire 10 fois le même passage, qu'on comprend mal, dans un livre où il n'y a rien à rechercher est désespérant, tandis que la même notion reprise sous un angle différent (par exemple «historiquement, comment est-elle apparue ?») et, plus généralement des remarques «en marge du programme», peuvent éclairer soudain le point sur lequel on bute.

(26) Ma victime est ici Physique-Chimie 2de collection Eurin-Gié Hachette mais cette présentation est donnée partout !