

L'enseignement de la physique et de la chimie

par Cédric Deffayet¹

1. Sur l'enseignement de la physique-chimie en France en général et pour moi en particulier

Je vais donner quelques éléments sur ma trajectoire professionnelle, non par esprit narcissique, mais pour expliquer certains aspects de mes propositions que je détaillerai plus loin, qui pourraient sembler biaisées.

Je suis chercheur, physicien et non – je le souligne – chimiste. Je suis aussi un physicien théoricien (je rappelle qu'en simplifiant, il y a deux « races » de physiciens, ceux qui font des expériences et ceux qui font des calculs ; c'est à ce dernier type que j'appartiens). En ce sens, je ne suis sans doute pas représentatif de la majorité des physiciens qui sont principalement des gens versés sur le côté expérimental. Par ailleurs, je travaille sur des sujets – les théories de gravitation relativiste et la cosmologie, c'est-à-dire l'étude de l'univers à très grande échelle et de son histoire – éloignés de toute application industrielle. Mais je me suis efforcé de m'extraire de ma condition particulière au sein des sciences physiques et chimiques (SPC dans la suite) pour mener la réflexion souhaitée en ce séminaire d'une façon que j'espère assez neutre. Ce qui me paraît assez clair, cependant, c'est que cette réflexion n'a pas atteint, de mon point de vue, une complète maturité. Ce sont donc de simples pistes que je vais proposer ici, plutôt que des propositions réellement abouties. Je pense par ailleurs que de telles propositions – qui seraient pleinement abouties – gagneraient à être formulées plutôt par un travail collectif de collègues physiciens et chimistes (et cela me semble aussi être vrai pour les autres disciplines), tant chacun peut avoir un avis différent sur des points qui ne sont pas des détails. En particulier, j'avoue, même si j'ai quelques souvenirs de mon agrégation et des classes préparatoires, ne pas me sentir suffisamment expert en chimie pour juger complètement de la pertinence de l'étude de tel ou tel sujet plutôt que tel autre, notamment avec comme perspective des aspects liés au monde professionnel actuel de la chimie que je connais mal.

Pour finir, j'ajouterai que je n'ai jamais enseigné au collège ou au lycée (même si je suis agrégé). J'ai cependant une expérience de l'enseignement, puisque j'enseigne à l'École polytechnique et que j'ai enseigné pendant longtemps à l'École normale supérieure, ainsi

¹ Directeur de recherche au CNRS, Institut d'astrophysique de Paris et Institut des Hautes études

qu'autrefois en première année de médecine à l'université. Ne pas enseigner (ou avoir enseigné) dans le secondaire est peut-être un défaut pour l'exercice auquel je me livre aujourd'hui. Mais c'est peut-être aussi une qualité, puisque cela me permet d'avoir un certain recul sur l'enseignement secondaire.

Le sujet de cet exposé invite bien sûr, de façon préalable, à considérer les programmes et l'enseignement actuel des SPC dans le secondaire et à les comparer à ce qui se fait ailleurs ou à ce qui se fit autrefois. En préambule à cette interrogation, je voudrais donc dire que, curieusement sans doute pour quelqu'un qui est devenu physicien, les enseignements que j'ai reçus en SPC au collège et au lycée, où j'étais élève entre 1984 et 1990, sont parmi ceux dont j'ai gardé le plus mauvais souvenir... J'avais, bien souvent, l'impression d'être gavé de recettes et astuces ayant pour seul objet de résoudre des problèmes, sans que le professeur n'explique rien de fondamental, rien des soubassements des choses que nous apprenions, ni d'ailleurs ne semble lui-même comprendre ces choses avec toute la profondeur souhaitable. Ce n'est qu'en classe de Mathématiques spéciales que j'ai eu (enfin !) un professeur qui m'a donné l'impression inverse. Mais mon intérêt pour la physique et mon souhait de devenir physicien s'étaient fait jour plus tôt, et ils se sont largement développés en marge de l'enseignement public où j'ai fait toute ma scolarité (et auquel je reste très attaché).

En préparant cette intervention et en me remémorant mes années de collège et de lycée, il me semble que mon désamour pour la physique-chimie telle qu'elle me fut enseignée lors de ces années était sans doute principalement et malheureusement le fait des professeurs que j'ai eus, ainsi que, secondairement, le fait d'une partie – une partie seulement – des programmes et des méthodes suivis. Ainsi, même si l'on a souvent la tentation de penser que « c'était mieux avant », surtout lorsque l'on parle de l'enseignement, cela ne me semble pas impliquer, dans le cas particulier des SPC, qu'il faille revenir aujourd'hui totalement – même en faisant abstraction des progrès scientifiques et technologiques – à ce qui se faisait dans le secondaire d'autrefois. Pourtant, comme on le verra, ce que je propose pour les programmes de SPC est beaucoup plus proche de ce qui se faisait il y a 25-30 ans que de ce qui se fait aujourd'hui, dont je dirai un mot dans un instant. Cette proximité est apparue finalement pour moi comme une certaine surprise, compte tenu de ce que je viens de dire ; je m'en suis rendu compte qu'après avoir élaboré mes propositions. Or le fait qu'un enseignant veuille, à son insu, se rattacher à la façon dont il a lui-même appris constitue peut-être un biais.

Je poursuis en conjecturant que, même si je n'ai pas étudié la question de façon très approfondie, il se pourrait que les SPC soient des matières dont l'enseignement était dans une position particulière jusqu'il y a peu en France, par rapport à celui, disons, des mathématiques ou d'autres disciplines. Cela pourrait refléter la situation elle-même particulière des sciences physiques en France après la fin de la Seconde Guerre mondiale. Après la guerre, la physique, en France, était en mauvaise posture, coupée sans doute en grande partie des progrès les plus récents. Il a fallu beaucoup d'efforts pour que les jeunes physiciens français d'après-guerre puissent « recoller » aux développements les plus récents. Ces efforts ont été rendus possibles, en particulier, par une école très dynamique, mais de faibles effectifs, travaillant à l'ENS. Cette situation était due sans doute, en premier lieu, à la décimation de toute une génération de jeunes physiciens par

les deux guerres mondiales, aux effets matériels de la Seconde Guerre mondiale², mais aussi au rôle néfaste de certaines grandes figures académiques ayant acquis leur prestige avant-guerre mais ayant été coupées ensuite des avancées les plus récentes. Puisque les jeunes et moins jeunes chercheurs ont dû faire ces efforts particuliers pour rattraper le retard, ces efforts n'ont peut-être porté tous leurs fruits que tardivement dans l'enseignement supérieur où faisaient leurs classes les futurs professeurs du secondaire, et donc dans l'enseignement secondaire lui-même. Cela pourrait expliquer que cet enseignement ait souffert quelque peu et que des failles de nature diverse aient pu perdurer longtemps. Ce n'est là qu'une hypothèse, qu'il conviendrait d'étayer par des recherches savantes.

Je me suis penché aussi sur les programmes de physique-chimie actuellement en vigueur (je ne parle pas ici des nouveaux programmes appliqués à la rentrée 2016) et la situation me paraît à cet égard très mauvaise.

Certaines des intentions des programmes et des méthodes proposées telles que j'ai pu les lire – en faisant abstraction du style très irénique et « performatif » dans lequel ces programmes et leur préambule sont rédigés – me semblent intéressantes et à retenir (et elles me semblent d'ailleurs aussi différer significativement de ce qui était fait lorsque j'étais moi-même au collège). Par exemple, je trouve intéressante – j'y reviendrai – l'idée de présenter dans le secondaire certains de ces éléments fondamentaux de la physique du ^{xx}e siècle que sont la relativité restreinte ou la mécanique quantique, ou encore le fait d'enseigner la démarche expérimentale, ou, dans certains cas, de partir d'un fait expérimental pour enseigner son explication théorique. Il n'en reste pas moins que la façon dont ces programmes s'incarnent concrètement me semble mauvaise. En effet, dans le secondaire actuel, l'enseignement des SPC paraît se réduire à une vasque presque impressionniste principalement descriptive (et très peu explicative), couvrant un très grand nombre de sujets, mais très superficiellement, sujets qui concernent bien souvent des applications de lois fondamentales qui ne sont pas elles-mêmes énoncées, ou des techniques ou technologies en elles-mêmes souvent intéressantes, mais dont la cohérence et les principes sous-jacents ne sont pas donnés. On peut en avoir une idée en consultant des manuels scolaires où la pensée est par ailleurs, lorsqu'elle est présente, découpée au scalpel de façon ridicule en différentes pseudo « compétences » artificielles : « raisonner, calculer », « mobiliser ses connaissances, exploiter un graphique », « raisonner, argumenter », « extraire des informations, raisonner », « comprendre un énoncé ». Cela illustre un mode de pensée manifestement cher à certains hiérarques qui président à la rédaction des programmes, dont on se demande vraiment à quelle représentation étrange de la pensée complexe il correspond.

Me semble ainsi manquer cruellement un enseignement des fondements des lois physiques et de ces lois elles-mêmes, au profit d'un survol d'éléments souvent anecdotiques, qui seront sans doute vite démodés. En outre, l'aspect mathématique est réduit à une portion très congrue, les exercices se résumant souvent à de simples analyses ou paraphrases de documents sans aucune formule ou à de simples graphiques.

² Le père de l'ancien Premier ministre Michel Rocard, Yves Rocard, qui eut un rôle majeur dans la reconstruction du laboratoire de physique de l'ENS, a ainsi dû largement puiser dans du matériel militaire, allemand notamment, pour remonter le laboratoire de physique après-guerre !

On peut ainsi citer comme exemple le sujet du baccalauréat de Terminale S (la section scientifique) de 2014, dont le premier exercice portait sur le LHC, le grand accélérateur de particules du CERN à Genève³. Les premières questions « À propos du boson de Higgs » étaient :

« 1.1. En quoi l'observation du boson de Higgs permet-elle de compléter la théorie du modèle standard ? »

« 1.2. À quelle période de l'Univers l'observation du boson de Higgs nous ramène-t-elle ? »

Les réponses à ces questions (en tout cas celles qui étaient attendues par le jury, car ces questions sont bien sûr très complexes, et les réponses proposées étaient en elles-mêmes très schématiques et incomplètes) figuraient noir sur blanc dans deux textes présentés comme « document(s) », dont l'un était tiré du journal *Science et avenir* qui, comme on sait, est un journal de vulgarisation. En quoi s'agit-il là de physique et non de français ? Certes, je partage pleinement le point de vue de Laurent Lafforgue, énoncé ici même, selon lequel la bonne maîtrise de la langue est un préalable indispensable aux bonnes mathématiques ou, en étendant son propos, à la bonne science, mais il ne suit pas de là que la science se réduise à cette bonne maîtrise et ne présente pas de spécificités qu'il s'agit d'enseigner.

Dans ces conditions, il n'est pas surprenant, ainsi que me l'ont raconté plusieurs collègues universitaires, qu'il arrive à des étudiants entrant en première année d'université de découvrir avec un certain étonnement qu'en physique, on a besoin de mathématiques...

Par ailleurs, sans doute en vertu de l'orientation vers l'enseignement de techniques et technologies au détriment du fond, ainsi que nous l'avons souligné plus haut, il me semble que la chimie a pris une place considérable dans les programmes et que les notions qui y sont enseignées sont souvent plus complexes qu'en physique et que ce qui se faisait auparavant. Ainsi, en Terminale S, voit-on aujourd'hui les notions de chiralité, de liaisons polarisées ou encore de chromatographie sur couche mince... Ce sont des notions intéressantes, mais je m'interroge sur les lacunes que laisse l'étude de telles notions complexes qui se fait au détriment de choses plus simples et sans doute plus fondamentales, dont la bonne compréhension et l'assimilation sont nécessaires pour aller plus loin.

2. Quelques questions et considérations préliminaires et transdisciplinaires pour l'enseignement secondaire

Avant de m'interroger sur ma discipline en particulier, il me semble important de définir les objectifs à assigner à l'enseignement secondaire de façon générale. Que voulons-nous atteindre au collège-lycée pour nos enfants ? C'est évidemment une réflexion à mener ensemble et non de façon cloisonnée par disciplines, et je n'ai pas la prétention d'apporter ici une réponse

³ LHC : « Large Hadron Collider », « Grand collisionneur de hadrons » ; CERN : « Conseil européen pour la recherche nucléaire » (1952) devenu ensuite « Organisation européenne pour la recherche nucléaire », l'acronyme CERN étant conservé.

générale. Mais il me semble important de préciser les quelques pistes qui ont guidé ma réflexion à ce sujet avant qu'elle ne se concentre par la suite sur ma propre discipline.

Cette question est aussi liée à l'organisation que nous voulons donner à l'enseignement secondaire. On n'envisagera pas les choses de la même manière selon que l'on est dans un système avec un collège voire un lycée uniques, ou que les élèves sont séparés tôt dans leur cursus. En fonction de ce choix d'organisation, le contenu des programmes de SPC peut changer radicalement.

Sans même parler de l'organisation générale de l'enseignement, le volume horaire accordé aux différentes disciplines importe aussi à l'évidence. Par exemple, aujourd'hui, si l'on suit les directives de l'Éducation nationale, on enseigne la physique-chimie uniquement à partir de la classe de 5^e de façon indifférenciée jusqu'à la classe de 2^{de}, puis plus du tout dans certaines filières au-delà. Il est clair, par exemple, que cela serait bouleversé si l'on avait un « lycée unique » (et je ne dis pas que c'est une chose souhaitable), ou, de même, si l'on renonçait au collège unique (ce qui serait peut-être plus souhaitable). Cet état de fait a aussi changé dans le passé : ainsi, en France⁴, on a enseigné la physique en 6^e à partir de 1977, puis cet enseignement a été supprimé en 6^e et 5^e à partir de 1990-1991, puis rétabli à partir de la 5^e (mais pas de la 6^e) en 1996... Aujourd'hui, par comparaison avec le passé récent et au-delà de la seule question de la physique-chimie, on peut déplorer une baisse considérable du volume horaire consacré aux disciplines scientifiques. Le volume horaire total consacré aux sciences (mathématiques, SPC, sciences de la Vie et de la Terre ou SVT) pour les deux années de série S « avec spécialité mathématiques (ou SPC ou SVT) en Terminale » était, en 2013, de 848 heures (dont seulement 8 heures de mathématiques hebdomadaires avec l'option Mathématiques en Terminale, et 4 heures en 1^{re}) alors que les mêmes matières totalisaient (pour la série C) 976 heures dans la période 1983-1994. Cela représente une baisse de près de 15 % (avec respectivement 9 heures et 6 heures de mathématiques hebdomadaires en 1^{re} et Terminale⁵). Je ne vois aucune raison à cette baisse horaire qui conduit par exemple au fait qu'aujourd'hui un bachelier S avec spécialité Mathématiques aura fait moins de mathématiques en cycle terminal qu'un bachelier D des années 1990, et je plaide pour un retour à des volumes horaires plus conséquents.

Je ne vais cependant pas trancher ici la question de l'organisation idéale de l'enseignement secondaire et je prendrai comme base horaire et principe d'organisation ce qui est actuellement en vigueur, c'est-à-dire un enseignement de SPC indifférencié jusqu'en classe de 2^{de}. Cela dit, les programmes que je proposerai ici peuvent aisément s'adapter à un retour à un volume horaire plus conséquent et j'en resterai donc à un niveau de détail qui ne donne pas de volume horaire précis. La question des programmes et de leur incarnation précise pourrait certainement être discutée conjointement avec les autres disciplines et précisée *in fine*. Dans le même ordre d'idée, je ne discuterai pas des filières techniques que je connais mal.

Une autre question préliminaire que l'on peut se poser dans la perspective de l'élaboration de nouveaux programmes est celle de l'articulation de ces programmes et de l'enseignement leur

⁴ Cf. par exemple : <http://www.senat.fr/questions/base/1990/qSEQ900711139.html> et aussi <https://www.snes.edu/Quelques-dates-importantes.html>

⁵ Cf. par exemple : <http://www.fabienbesnard.fr/article-le-bac-s-de-2013-sera-un-sous-bac-d-de-1993-107565176.html>.

correspondant dans d'éventuelles écoles hors contrat avec l'enseignement actuel. En l'espèce, deux possibilités semblent exister. La première est celle d'écoles hors contrat coexistant avec un nombre bien plus grand d'écoles publiques ou sous contrat, où l'enseignement se fait, ou se ferait, en accord avec les programmes de l'éducation nationale. Dans cette première perspective, on devrait nécessairement se soucier du devenir des élèves qui quittent les écoles hors contrat, ou du moins où nos nouveaux programmes seraient suivis, pour revenir dans le giron d'écoles suivant les programmes de l'Éducation nationale, ce qui peut se produire (et se produit dans des écoles hors contrat existant aujourd'hui) pour diverses raisons, mutations professionnelles des parents, passage dans des cycles supérieurs où les écoles hors contrat n'existent pas, etc. Dans ce cas, il faut nécessairement tenir compte de ce qui est fait dans l'Éducation nationale pour que les élèves puissent s'y réadapter rapidement (et soient à même de passer les examens nationaux que sont le brevet des collèges ou le baccalauréat).

Une deuxième perspective est plus utopique et correspond, je pense, à l'hypothèse de travail du présent séminaire. Il s'agit d'imaginer sans lien aucun avec l'extérieur (au moins pour ce qui concerne les niveaux secondaires) des programmes idéaux. C'est cette perspective que j'ai suivie. Il est clair qu'il faut garder à l'esprit l'aspect utopique de la chose si l'on veut, un jour prochain, où vraisemblablement l'Éducation nationale existera encore, appliquer véritablement ces programmes dans des écoles réelles.

Je reviens maintenant à ma question initiale en tenant compte de ce que je viens d'exposer. Avec le système actuel d'organisation de l'enseignement secondaire, qu'attendons-nous du collège et du lycée ? On pourrait peut-être résumer leur objectif premier ainsi : il s'agit de conduire les enfants sortant du primaire à acquérir une pensée capable de comprendre le monde naturel et le monde social, capable d'interagir avec lui et d'être véritablement libre et autonome.

Pour acquérir une telle pensée libre, il faut, me semble-t-il, se fonder sur le savoir ou la pensée des autres, de nos semblables les plus illustres, sur la culture des hommes, et je réfute l'idée, qui semble hélas assez répandue chez certains penseurs de la chose pédagogique, qu'une pensée ayant les attributs donnés plus haut puisse se construire sans apprentissage conséquent, en qualité et en quantité, de connaissances. Le petit humain ne peut pas, à chaque génération, redécouvrir seul tout ce que ses prédécesseurs ont construit avant lui et qui le font véritablement humain.

De même, pour comprendre le monde, ces connaissances doivent être disponibles immédiatement à l'esprit et non *via* un média comme Internet, et j'ai donc le regret de ne pas partager l'idée exprimée parfois jusque dans des cercles éduqués et savants que « maintenant qu'il y a Internet il ne sert à rien de transmettre des connaissances puisque tout se trouve sur Web... », traduisant en cela une des doxas inspirant certaines réformes actuelles et conduisant aussi certains établissements secondaires à ne plus acheter de livres au motif que tout se fera bientôt sur des tablettes connectées. D'ailleurs, l'idée même qu'un média seul puisse suffire pour accéder au savoir est absurde, car un média, par définition, ne fait que « médier » et il faut, pour en tirer profit, savoir beaucoup. De nombreux enseignants constatent d'ailleurs que les enfants qui utilisent le mieux Internet sont ceux qui savent le plus. Je plaide donc pour que l'enseignement, et en particulier celui de physique-chimie, transmette des connaissances et non seulement des compétences (pour utiliser un jargon cher aux rédacteurs des programmes). D'ailleurs, comme disait le Philosophe, on se demande bien à quoi un pur esprit pourrait penser.

Viennent ensuite des objectifs que je dirais secondaires et plus contingents au système d'enseignement, à son organisation, ainsi qu'à la façon dont la société traite les jeunes, notamment pour ce qui concerne l'entrée dans le monde du travail : premièrement, faire en sorte que les élèves au sortir du lycée puissent suivre, pour ceux qui en ont les capacités et le goût, un enseignement supérieur de qualité, et, deuxièmement, préparer plus directement l'entrée des élèves dans le monde du travail, et c'est là, bien sûr, un objectif plus propre à l'enseignement professionnel.

Pour ma part, je ne pense pas que l'enseignement secondaire général (par opposition à l'enseignement secondaire professionnel) doive se soucier outre mesure du « monde du travail » (alors même qu'on lui reproche souvent de ne pas le faire assez), ou même du monde quotidien des élèves, comme le défendent certains « pédagogues » ainsi que les directives officielles (par exemple, dans le « préambule pour le collège » des programmes de physique-chimie du Bulletin officiel, on peut lire parmi les objectifs du programme qu'il s'agit « d'être ancré sur l'environnement quotidien et ouvert sur les techniques pour être motivant et susciter la curiosité et l'appétence des élèves pour les sciences, conditions nécessaires à l'émergence des vocations scientifiques »). Je pense au contraire que deux conditions sont nécessaires au bon enseignement. D'une part, il faut un dépaysement, qui seul peut créer une véritable ouverture sur une pensée, des connaissances nouvelles et radicalement différentes ; par définition, on n'apprend rien si l'on reste avec soi-même. D'autre part, à côté du dépaysement, il faut aussi un enracinement. Les notions de dépaysement et enracinement, qui impliquent toutes deux une certaine transformation, renvoient au fait que, pour apprendre, il faut bouger, se déplacer, se remettre en cause et en souffrir un peu, souffrance causée par la nouveauté, dont on ne peut se dispenser. En d'autres termes, l'enseignement ne peut être simplement ludique, amusant, facile et ouvert sur le quotidien, ni même y être « ancré ».

Ainsi, arguer par exemple que le latin, ou l'étude des astres pour prendre un exemple dans mon champ direct d'intérêt, ne sont pas d'une utilité immédiate dans le monde du travail, ou encore ne sont pas ancrés dans le quotidien, et de ce fait pourraient être supprimés de l'enseignement, me paraît foncièrement faux. Cela revient à confondre le résultat de l'enseignement avec l'enseignement lui-même, erreur souvent commise dans certains discours sur l'enseignement. Il est vrai que très peu d'adultes utilisent le latin dans leur vie quotidienne. Mais il ne suit pas de là que le latin n'ait pas joué un rôle important dans leur formation intellectuelle⁶. Donc je plaide pour un enseignement au contenu nécessairement dépayasant et dérangeant pour les élèves, même si on ne doit pas s'interdire aussi d'évoquer des choses plus proches de leur quotidien.

Un autre argument allant dans ce sens est aussi le souhait, louable évidemment, de réduire les inégalités sociales *via* l'enseignement. Comment y parvenir si l'on refuse à l'enseignement de transmettre des éléments qui sortent du quotidien des élèves, quotidien qui, par définition, ne dépend que de leur milieu social et est donc d'autant plus pauvre culturellement que ce milieu est « défavorisé » ? Péguy serait-il devenu Péguy si on ne lui avait pas donné le loisir de lire la

⁶ La même erreur me semble aussi présente quand on explique que, puisque nous lisons apparemment (et cela même semble contesté par certains neurobiologistes) les mots de façon « globale », il faudrait apprendre à lire de la même façon.

grande littérature et si on l'avait confiné à son quotidien très modeste de fils d'une rempailleuse de chaises ?

La physique est d'ailleurs une matière privilégiée pour apprendre à sortir de son quotidien. En effet, si elle est fondée sur l'observation de phénomènes souvent facilement accessibles, elle explique ces mêmes phénomènes souvent d'une façon totalement contre-intuitive. La physique est véritablement, en ce sens, une école d'exotisme et de dépaysement intellectuel. Songeons à cette très belle phrase de Paul Valéry (dans *Mélanges*) : « Il fallait être Newton pour apercevoir que la lune tombe, quand tout le monde voit bien qu'elle ne tombe pas. »

3. Pourquoi et comment enseigner la physique-chimie dans le secondaire ?

Venons-en maintenant plus spécifiquement à ce qui concerne les SPC et interrogeons-nous sur les raisons qui justifient l'enseignement de la physique-chimie dans le secondaire.

Viennent tout d'abord quelques raisons évidentes : la physique et la chimie ont bien entendu une importance capitale pour comprendre le monde qui nous entoure, la façon dont il fonctionne, mais elles ont également une grande importance technologique, tant nous sommes entourés d'objets n'existant que grâce à la compréhension des lois de la physique et de la chimie. Cependant, il me semble qu'il existe d'autres raisons non moins importantes pour lesquelles on peut vouloir enseigner la physique-chimie et qui, une fois explicitées, doivent nous permettre aussi d'orienter la façon dont ces matières doivent être enseignées.

La nature est écrite en langage mathématique

La physique est sans doute l'archétype de la science exacte et savoir un peu de physique me semble donc très important pour comprendre d'une part ce qu'est une science et d'autre part pour comprendre comment le monde se présente à nous. Dans cet ordre d'idée, il me semble donc crucial de faire passer dans l'enseignement de la physique l'idée qu'il existe des lois de la nature écrites sous forme mathématique, une idée qui intéresse non seulement les physiciens mais aussi sans doute les philosophes et tout un chacun. Pour comprendre cela, il est sans doute nécessaire d'apprendre et d'utiliser avec un certain degré de détail certaines de ces lois dans leur expression mathématique. Il semble que cet aspect des choses ne soit pas toujours bien transmis par l'enseignement actuel, comme le montre l'anecdote évoquée plus haut illustrant l'ignorance dans laquelle se trouvent certains étudiants entrant en première année à l'université de ce que la physique s'exprime avec des mathématiques. Vouloir ainsi débarrasser l'enseignement de la physique des mathématiques nous semble relever de la même confusion que nous avons déjà évoquée entre l'enseignement d'une matière et la façon dont un savant aborde cette même matière bien longtemps après l'avoir apprise. Ainsi, il me semble nécessaire de revenir vers un enseignement de la physique où les mathématiques aient toute leur place, ce qui ne peut se faire que de façon coordonnée avec l'enseignement des mathématiques elles-mêmes. On peut d'ailleurs regretter la tendance que nous observons depuis des années à réduire comme peau de chagrin l'enseignement des mathématiques en France, alors même que nous avons dans notre

pays une grande tradition dans ce domaine, reconnue non seulement par nos médailles Fields, mais aussi, beaucoup plus largement, par la qualité de nos ingénieurs ou de nos informaticiens. Un récent rapport de l'Agence pour les mathématiques en interaction avec l'entreprise et la société (Amies), cité dans le journal du CNRS⁷, évaluait ainsi à 15 % du PIB la valeur ajoutée apportée par les mathématiques en France. La société Veolia prévoit de faire passer de 8 à 20 % la proportion de « mathématiciens » dans ses effectifs ingénieurs au cours des 10 prochaines années (même source).

Apprendre à modéliser

Deuxièmement, la physique me semble devoir jouer un rôle capital dans la formation de l'esprit, rôle qu'on ne lui a peut-être jamais assez fait jouer dans notre pays. En effet, un aspect important de la démarche du physicien est celui de la modélisation, c'est-à-dire la construction d'une représentation, souvent sous forme en partie mathématique, d'un phénomène « réel » (et je ne me lance pas ici dans une discussion sur le statut de cette réalité, mais adopte un point de vue naïvement « réaliste »), représentation qui pourra et devra être confrontée au phénomène. Sans tenter ici de faire de la (mauvaise) philosophie, il me semble que l'enseignement de la physique doit, d'une part, faire passer l'idée que le phénomène et sa représentation sont deux choses différentes (idée qui me semble très mal comprise dans le grand public, ce qui est source de nombreuses confusions et malentendus) et, d'autre part, conduire l'élève à pouvoir lui-même comprendre le processus de modélisation d'un phénomène et à pouvoir se livrer lui-même à une telle démarche. On pourrait dire ainsi, en empruntant ces termes à Pascal, que la bonne physique cherche à mettre de la finesse dans la géométrie ou de la géométrie dans la finesse, qu'elle doit allier esprit de finesse et esprit de géométrie et que cette démarche doit être enseignée.

Je crois cet aspect d'autant plus important qu'il touche à beaucoup d'autres domaines que celui de la physique à proprement parler. Ainsi, aujourd'hui, est-on amené à modéliser de façon mathématique des phénomènes biologiques (c'est une démarche qui prendra selon toute vraisemblance de plus en plus d'importance dans l'avenir), des phénomènes économiques voire sociaux, ou encore, à l'heure des « Big Data », des flux et des contenus d'informations. Cette démarche de modélisation n'est pas transmise par l'enseignement des mathématiques pures (le mathématicien peut rester dans ses « galeries de glace » comme le disait Saint-John Perse), et celui de la physique est certainement le lieu de cette transmission nécessaire.

Ainsi, je crois qu'un bon enseignement de la physique doit contenir un enseignement de la modélisation mathématique d'un phénomène, qu'il faut non seulement construire (la géométrie), mais dont on doit aussi donner les limites (la finesse). Cet aspect de la modélisation peut prendre des formes très diverses selon le niveau de la classe enseignée. Les limites de la modélisation doivent aussi être enseignées avec une introduction à ce que l'on appelle souvent aujourd'hui la notion de « théorie effective », c'est-à-dire le fait que la description d'un même phénomène ou objet peut être réalisée de différentes façons selon les questions que l'on cherche à résoudre, et selon le domaine – par exemple celui des échelles de taille – que l'on étudie. Ainsi l'eau pourra-t-elle être décrite avec la même « véracité » comme un milieu continu liquide ou comme une assemblée de molécules, donc, en l'espèce, selon une description totalement « discrète ». On

⁷ <https://lejournal.cnrs.fr/articles/les-maths-dopent-leconomie-francaise>.

soulignera que chacune des deux descriptions est aussi valable que l'autre : tout dépend des échelles que l'on cherche à décrire.

Dans ce même ordre d'idée – contribuer à la formation de l'esprit –, il me semble important d'insister sur l'observation des phénomènes. Cette démarche d'observation doit venir avant la démarche de modélisation et d'expérimentation. Or elle me semble souvent être laissée de côté à l'époque actuelle. Je suis ainsi partisan de faire réaliser aux enfants des observations visuelles de diverses natures qui seront transcrites par exemple sous forme de dessins : la démarche du dessin permet d'être seul avec soi-même et l'objet observé, et elle invite l'élève à porter toute l'attention requise aux détails. Il faut laisser à celui-ci tout le temps nécessaire pour mener cette démarche à son terme, démarche qui me semble d'autant plus bénéfique qu'elle va à l'encontre d'une certaine tendance à l'agitation, au zapping, au superficiel, qui caractérise notre époque et qui me semble faire peser un gros risque sur l'intériorité et la profondeur de pensée. Je vois donc le dessin d'observation, auquel se livraient les scientifiques du passé, et qui est une méthode qui peut être appliquée également avec profit dans d'autres disciplines comme les sciences de la vie où elle est peut-être encore plus naturelle (j'ai d'ailleurs noté avec plaisir qu'Yves Barral, dans sa contribution sur les SVT⁸, défendait le même point de vue sans que nous nous soyons concertés – sans doute un exemple de « convergence évolutive »), comme une méthode prophylactique contre une certaine superficialité. Pour être provocateur, je dirai qu'il est plus important d'encourager les enfants à dessiner ce qu'ils voient, en leur laissant le temps nécessaire pour atteindre une grande précision, qu'à faire des recherches sur Internet. L'observation et le dessin sont peut-être ainsi à la science actuelle (ou à son enseignement) ce que la poésie est à la littérature. On peut ainsi se souvenir que le grand physicien Pierre-Gilles de Gennes passait lui-même beaucoup de temps à dessiner, et ce n'est peut-être pas qu'anecdotique. Je pense d'ailleurs qu'il n'est pas nécessaire de consacrer beaucoup de temps dans une année scolaire à la chose, mais consacrer quelques séances à cette activité me semble déjà bénéfique pour les enfants.

La physique : science expérimentale

Un autre aspect important de la physique est l'aspect expérimental. La démarche expérimentale est sans doute également cruciale pour la formation de l'esprit, démarche qui peut-être, sans doute même, doit être enseignée *via* la physique qui en présente beaucoup de situations archétypiques.

Il me semble important, cependant, de s'efforcer de ne pas singer la démarche expérimentale. En particulier, ce risque me semble très présent dans une démarche inspirant les programmes actuels qui, partant souvent de l'intention peut-être louable que les élèves doivent découvrir les choses par eux-mêmes, prétendent faire découvrir des lois *via* un travail expérimental ou d'observation : cela me semble parfaitement utopique et absurde de faire cela pour tout, utopique car cela demanderait un volume horaire bien supérieur à ce qui est disponible et, d'autre part, même si je précise que je n'ai pas moi-même assisté ou participé à de telles séances récemment, il me paraît clair que c'est nécessairement une démarche artificielle et donnant en fait une fausse idée de la science. Les grandes ou petites découvertes se font rarement

⁸ Voir le chapitre suivant, p. 179-202.

– jamais peut-être – de façon « prévisible » et linéaire, sans tâtonnements, échecs ou essais infructueux, toutes choses que l'on n'a pas le temps d'expérimenter dans le volume horaire imparti à l'enseignement secondaire. Pour que les élèves puissent ainsi découvrir les choses par eux-mêmes, il faudrait nécessairement leur mâcher le travail considérablement, au détriment de ce que serait une véritable démarche scientifique. Cela revient donc en fait à mentir en partie aux élèves (lorsque j'étais collégien, cet aspect des choses m'apparaissait déjà présent particulièrement dans les sciences naturelles, où on nous demandait de déduire des choses à partir d'observations d'une façon qui me semblait bien souvent très artificielle et ne laissant pas la place à la complexité du monde).

Je suis cependant attaché à l'idée de transmettre ce qu'est une démarche expérimentale. Pour ce faire, il paraît fructueux de faire mener à la classe, ou à des groupes d'élèves, un très petit nombre de projets scientifiques sur une longue durée : par exemple un projet pour toute l'année de 5^e où le temps serait véritablement laissé pour errer, se tromper et, parallèlement à cela, d'avoir des cours magistraux traditionnels illustrés par des travaux pratiques (et j'insiste sur le rôle d'illustration du cours que, dans mon esprit, les TP doivent avoir, plutôt que de singer une démarche expérimentale de recherche).

Acquérir une culture scientifique pour comprendre et penser le monde

Une dernière raison d'enseigner la physique dans le secondaire est d'offrir aux enfants une formation d'honnête homme. Dans notre pays, la culture générale et la culture scientifique semblent bien souvent disjointes, et je suis souvent frappé de l'inculture de beaucoup de nos concitoyens en matière de science. Un exemple parmi d'autres de cet état de fait me semble être la grande presse, dont le niveau des journalistes et celui des suppléments scientifiques sont souvent très bas – il suffit par exemple de comparer les suppléments « science » des grands quotidiens français avec celui du New York Times... Certains pourraient penser qu'au fond cela importe peu – et c'est sans doute l'attitude que l'on rencontre souvent, même dans une certaine élite : on s'offusque qu'un ministre de la Culture ne connaisse pas les livres de Modiano, mais il est chic de dire dans un salon que l'on ne comprend rien à la relativité d'Einstein. Mais ce n'est pas mon avis et, au-delà même de cette dévalorisation de la culture scientifique face à la « grande » culture, le fait d'avoir un minimum de culture scientifique me semble indispensable non seulement pour aborder certains débats de société, par exemple ceux sur l'énergie nucléaire, les énergies renouvelables ou les nanotechnologies, mais aussi tout simplement pour penser.

4. Quels objectifs précis pour la physique- chimie au collège-lycée ?

À côté des raisons et objectifs généraux que nous venons de discuter, il existe des objectifs plus précis que nous pouvons assigner à l'enseignement des SPC dans le secondaire. Je parlerai d'abord d'un certain nombre d'objectifs que l'on pourrait qualifier de « transversaux », puisqu'ils concernent toute la physique-chimie et non pas certaines lois particulières.

Objectifs transversaux

– *Apprendre la notion d'unité et de système d'unités.* Notion centrale qui est plus qu'un simple outil, car un système d'unités est en lien profond avec une certaine représentation du monde. Par exemple, on sait qu'on ne « mesure » plus la vitesse de la lumière dans le vide : sa valeur est fixée depuis 1983 à 299 792 458 mètres par seconde, ce qui traduit le fait qu'une distance et un temps sont une même grandeur physique, idée elle-même intimement liée à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein.

– Liés aux notions d'unité et de système d'unités, viennent ensuite la notion d'homogénéité et l'apprentissage (difficile) de la capacité à trouver la solution d'un problème par un raisonnement uniquement dimensionnel.

– *Apprendre à calculer des ordres de grandeur.* Cet apprentissage, comme d'ailleurs celui que nous venons d'évoquer, est lié à la notion de modélisation dont nous avons parlé plus haut. Pour ce qui est des ordres de grandeur, on peut imaginer introduire cette notion assez tôt dans le cursus, en donnant des exercices simples avec plus ou moins d'indications et en faisant réfléchir aux incertitudes du résultat, par exemple sous forme de problèmes du type : estimez le nombre de grains de sable sur une plage (une façon de faire est de calculer un ordre de grandeur du volume de sable sur une plage, par exemple en supposant sa longueur de 1 km, sa largeur de 100 m, son épaisseur de 10 m, puis de diviser par le volume d'un grain de sable que l'on aura aussi estimé, et où l'on pourra aussi introduire une correction par un facteur mesurant le remplissage imparfait de l'espace par des grains ou des sphères juxtaposés). Je pense que ce genre d'exercice est très formateur. Il est assez difficile, car il requiert une certaine autonomie intellectuelle. Il devrait être saupoudré tout au long du cursus secondaire.

Objectifs précis pour la fin de la 2^{de}

Nous plaçant ici dans une démarche quelque peu utopique, comme expliqué plus haut, interrogeons-nous d'abord, avant de préciser le contenu d'éventuels programmes, sur le point d'aboutissement auquel nous souhaitons parvenir dans l'enseignement de la physique-chimie dans le cycle secondaire. Un niveau naturel pour définir un premier point d'aboutissement me semble être la classe de 2^{de}, puisque c'est le dernier niveau indifférencié et qu'il correspond également à la fin de la scolarité obligatoire (16 ans révolus en France depuis 1959), en tout cas pour l'enseignement général. On peut aussi remarquer que les élèves, même ceux qui ont les moins bons résultats scolaires, sont de plus en plus orientés aujourd'hui en fin de 3^e vers des 2^{des} générales (en raison notamment de l'absence de redoublement) qui devient ainsi *de facto* un premier niveau indifférencié d'un lycée unique.

Que voulons-nous donc que nos élèves sachent en fin de 2^{de} ? Le niveau souhaitable pour ce premier point d'aboutissement peut être vu de deux façons différentes, en fonction de ce que nous avons dit plus haut. Nous pouvons considérer, d'une part, le niveau que nous souhaiterions pour un « honnête homme » qui ne se destine pas particulièrement à faire des études scientifiques et qui même ne fera plus par la suite de SPC (même si je pense souhaitable que celles-ci continuent

à être étudiées dans toutes les sections jusqu'au baccalauréat). Nous pouvons avoir en tête, d'autre part, ce qui est nécessaire pour celui qui veut poursuivre de telles études scientifiques.

Dans ces deux perspectives, il me semble important que soient connues et comprises en fin de 2^{de} les notions suivantes :

- La façon dont l'univers est structuré, des plus petites échelles (particules, atomes, molécules...) aux plus grandes (étoiles, galaxies, amas de galaxies), en ayant une idée des ordres de grandeur associés. Savoir quels sont les constituants et les interactions fondamentales de l'univers et avoir une idée de son histoire (depuis le Big Bang).

- Avoir compris ce qui distingue le « fondamental » des descriptions « effectives » : par exemple comprendre que la description de l'eau sous forme d'un liquide, milieu continu, n'est pas aussi « fondamentale » que sa compréhension en termes de molécules H₂O, et que ces molécules peuvent elles-mêmes être décrites de façon plus fondamentale. Mais avoir aussi compris que la description de l'eau sous forme de milieu continu peut être parfois plus pertinente que celle sous forme de molécules H₂O.

- Avoir une idée succincte (il ne s'agit pas bien sûr de proposer un contenu très complet en histoire des sciences, au détriment de l'enseignement des notions elles-mêmes) de la progression des idées concernant la connaissance du monde physique.

- Savoir que la nature est régie par des lois exprimables de façon mathématique, être capable de comprendre et d'utiliser certaines de ces lois. En particulier, les lois élémentaires de la mécanique de Newton et de la gravitation, de l'optique géométrique et ondulatoire, de l'électricité, ainsi que quelques éléments de thermodynamique : différents états d'un corps, changements d'état. Une partie de ces lois pourra être cependant exposée uniquement de façon qualitative dans un premier temps (avant d'en donner une version mathématisée dans le cycle terminal).

- Avoir compris quelques aspects de la physique du XX^e siècle, parmi lesquels des aspects, précisés plus loin, de la relativité restreinte et générale et de la mécanique quantique. Ce dernier aspect est sans doute celui qui pourra soulever le plus d'interrogations et qui relève le plus clairement de l'utopie mentionnée plus haut. Cependant, il est central dans mon esprit. Il ne me paraît pas souhaitable que l'on puisse sortir de l'enseignement général en ignorant tout de ce qui est sans doute parmi les plus grandes avancées scientifiques du XX^e siècle : la mécanique quantique et les relativités. Entendons-nous bien : je ne propose pas d'enseigner ces théories, très complexes sur le plan mathématique, en classe de 2^{de}, mais il me semble possible de présenter de façon principalement qualitative (mais pas uniquement) des éléments de ces théories, si l'on y prépare les élèves peu à peu à partir de la classe de 5^e. D'ailleurs, en ce sens, cet aspect qualitatif aussi présent dans les programmes actuels me semble pouvoir être conservé à condition d'être réduit et de ne pas constituer l'essentiel de l'enseignement.

- Pour ce qui concerne plus particulièrement la chimie, il me semble important que soit connue de tous la classification des divers éléments chimiques et de même pour des grandes catégories de corps chimiques et de réactions. Je préciserai tout cela par la

suite. Je pense cependant que le programme actuel fait une place beaucoup trop importante à la chimie par rapport à la physique – et c’est bien dans l’esprit de la « technologisation » du programme. Il s’agit souvent d’enseigner bien plus des techniques que des lois au fondement des choses⁹ et l’enseignement actuel donne ainsi trop de place à ces techniques souvent en lien avec la chimie (mais mes collègues chimistes seront sans doute d’un avis différent).

5. Propositions de programme pour le collège et le lycée

Au collège

Je propose de partir de leçons assez descriptives en 5^e, en introduisant peu à peu le formalisme mathématique et en ayant à l’esprit les notions transversales (unité, mesure, ordre de grandeur, modélisation, expérience) qui devront être appliquées à chaque sous-sujet. Une partie très importante de l’enseignement des SPC au collège me semble devoir être centrée en premier lieu sur les points suivants.

1. Le mouvement et la mécanique newtonienne

Ces sujets sont véritablement au fondement de toute la physique. L’étude de ces sujets visera à introduire les principes de base de la cinématique et de la mécanique, notions pour lesquelles devront être introduites auparavant les notions d’espace, de référentiel et de repère. Mon idée serait, entre autres, de revenir sur ces notions à plusieurs périodes du cursus de collège-lycée,

⁹ Il me paraît aussi peu important dans la vie quotidienne de savoir ce qu’est une réaction acide-base que d’avoir compris quelques éléments de relativité restreinte, mais la relativité restreinte me paraît beaucoup plus importante pour la pensée que les réactions acide-base. au fur et à mesure que les connaissances nécessaires auront été vues dans le cours de mathématiques.

On pourrait ainsi commencer en 5^e par un chapitre intitulé « Étude descriptive de l’univers aux grandes échelles ».

1. Étude descriptive de l’univers aux grandes échelles : système solaire, planètes, étoiles, galaxies, amas de galaxies, superamas. On donnera les ordres de grandeur des distances. On distinguera les astres qui brillent par eux-mêmes (en aboutissant à la question « Comment brillent-ils ? ») et les autres. Cela permettra aussi de mentionner la question de l’existence de différentes radiations comme moyen d’accès au cosmos. On finira en revenant sur le mouvement des planètes dans le système solaire. On peut évoquer ici les mouvements rétro-grades tels que vus depuis la Terre et faire travailler les enfants sur des modèles types centrés sur la Terre, puis avec des épicycles... et évoquer ainsi l’histoire des sciences. On

aboutirait aux mouvements elliptiques, puis aux trois lois de Kepler (qui n'ont pas à être introduites toutes les trois au même moment dans le cursus).

2. Cette thématique pourrait donner lieu à un atelier expérimental ou observationnel, qui peut s'étaler sur toute une année (par exemple l'année de 5^e), atelier d'observation du mouvement du soleil dans le ciel, des planètes et de leur mouvement, pouvant aussi être fait en partie de façon informatique (conduisant ainsi à la constatation du mouvement rétrograde et de la nécessité des épicycles). Cet atelier expérimental peut aussi être complété par un autre atelier visant à construire un petit télescope.
3. On pourrait ensuite passer à un chapitre décrivant des propriétés simples de l'espace de la mécanique galiléenne. *La mesure de l'espace* (qui peut donner lieu à un TP simple : on invite les élèves à mesurer la position de points sur une feuille avec une règle et l'on introduit de cette façon, en comparant ensuite toutes les mesures, la notion d'erreur de mesures, en distinguant erreurs statistiques et erreurs systématiques). On pourra y revenir plus tard dans le cycle d'enseignement par des mesures de distances *via* des parallaxes, une fois que la trigonométrie aura été introduite. *La mesure du temps* à l'aide d'un dispositif périodique en partant par exemple du dispositif périodique naturel offert par le mouvement de la Terre et du soleil, puis en lien avec la mécanique et de possibles TP (par exemple sur les pendules simples : faire constater la dépendance de la période du pendule dans ses paramètres) ; on pourra aussi introduire des notions d'histoire des sciences et de sciences actuelles (horloges atomiques, GPS : mesure de l'espace grâce au temps) – on fera sentir le caractère absolu du temps et de l'espace de Newton. *Ses calculs et mesures de surfaces et de volumes* (qui peuvent être faits également *via* des TP : pour les volumes, par déplacement de liquide, pour les surfaces, par exemple en laissant tomber des aiguilles sur un disque, à la « Monte-Carlo »). On discutera aussi les mesures de distances astrophysiques et, en lien avec cette question, la finitude de la vitesse de la lumière et sa valeur.
4. Ensuite, on peut passer à *la définition et l'étude de mouvements simples*: rectilignes, uniformes, circulaires, etc. Les notions de vitesse et d'accélération peuvent être ensuite introduites assez tôt dans le cursus, même avant que les dérivées soient connues, en faisant par exemple des calculs à vitesses constantes. Sur des mouvements dont la trajectoire est affine par morceau, on pourra faire passer la notion d'accélération. Ce sera aussi l'occasion d'introduire les notions de *référentiel*, puis, plus tard dans le cursus, de référentiel *inertiel et non inertiel*, et de forces définies comme les causes de l'accélération. On introduira ensuite les lois de Newton de la mécanique dont le principe d'inertie, puis le caractère relatif du mouvement en considérant le même mouvement vu de différents référentiels, et on aboutira aux lois de composition du mouvement de la théorie newtonienne, d'abord de façon très simple sous la forme de composition des vitesses, puis on pourra introduire la notion de forces d'inertie.
5. *Étude et typologie des forces* : poids d'un corps, forces de réaction, forces gravitationnelles, forces de ressort et force d'Archimède à l'équilibre dans un liquide. Ayant introduit les forces les plus simples, et leur classification, on discutera ensuite de façon qualitative (sans calculs) la classification de toutes les forces de la nature en lien avec une partie du programme discuté plus bas traitant de la structure de la matière. On fera ressortir la différence entre les forces «

fondamentales » – comme la gravitation – et les forces « effectives » comme les forces de contact, ou les tensions de ressort ou de cordes qui ont un sens macroscopique et dérivent de forces fondamentales. On introduira le principe d'équivalence pour la gravitation et on fera le lien avec les forces d'inertie : universalité de la chute libre de même qu'universalité des forces d'inertie (en préparation de l'initiation à la relativité générale proposée au lycée).

6. On aboutit ainsi, à la fin du collège, à pouvoir traiter des *problèmes simples de mécanique du solide* et de poulies (principalement de statique), et on pourra introduire la notion de *moment d'une force* (notion qui pourrait cependant être différée et qui me paraît moins fondamentale que celle de force). Il faut aussi veiller à ce que la notion de *vecteur* soit introduite suffisamment tôt en mathématiques pour que les forces puissent être présentées sous forme vectorielle.
7. On introduira enfin en 3^e la notion de *phénomène ondulatoire*, dont on donnera des exemples mécaniques (les phénomènes ondulatoires électromagnétiques seront abordés au lycée). On définira la *longueur d'onde*, la *fréquence*, etc. Un point d'introduction possible pour l'étude de ces phénomènes peut être un réseau de pendules couplés mécaniquement. On pourra aussi introduire de façon qualitative la notion d'oscillation forcée, celle de frottement, et celle de résonance (balançoire) et introduire progressivement, là aussi, un peu de quantitatif.

2. Structure et propriétés de la matière

Un deuxième grand chapitre concerne la structure et les propriétés de la matière.

1. On peut là aussi partir d'un *chapitre descriptif* : quels sont les différents « types » de matières autour de nous et leurs propriétés (poudre, solide, continu, liquide, visqueux, mou, dur, état cristallin, etc.) ? On aboutit à la notion d'état. On peut distinguer différentes propriétés physico-chimiques de la matière et faire sentir que différents états peuvent être assez difficiles à distinguer en pratique. Par exemple, le verre coule ou l'expérience de la goutte de poix⁹. Ce chapitre pourra donner lieu à des séances d'observations dessinées. On introduirait ensuite quelques propriétés macroscopiques discriminantes de la matière : masse, masse volumique (avec expériences de type Archimède), viscosité, caractère isolant et conducteur, propriétés magnétiques (diamagnétisme, ferromagnétisme, etc.), propriétés optiques (optique linéaire ou non linéaire). Ce chapitre sera l'occasion de montrer la grande diversité des propriétés physico-chimiques sous forme de « leçons de choses » qui pourront piquer la curiosité des enfants. On pourra, par exemple, montrer des fluides non newtoniens ou des phénomènes de super-conductivité, de superfluidité, des liquides magnétiques (ferro fluides par exemple), des mélanges miscibles et non miscibles, des mélanges réactifs, l'idée étant de montrer la diversité du monde et de susciter un certain émerveillement, mais aussi de faire passer

⁹ <http://www.smp.uq.edu.au/content/pitch-drop-experiment>.

l'idée que cette grande diversité peut être classifiée.

2. On dégagera les notions d'état, de changement d'état et plus généralement de transition de phase. On pourra montrer aussi des propriétés non triviales de la lumière : laser, spectres, etc. Ces leçons de choses peuvent occuper une partie importante de l'année de 5^e (et idéalement aussi de 6^e si l'on pouvait commencer à enseigner la physique dès la 6^e), donner lieu à beaucoup d'observations, également à l'utilisation d'instruments tels que le microscope ou la loupe, dont les principes de fonctionnement peuvent aussi être expliqués à cette occasion. Cela peut aussi donner lieu à des projets documentaires sous forme d'exposés (par exemple sur les « dunes qui chantent », la physique des tas de sable ou certains sujets mentionnés plus haut).
3. On introduira ensuite, de façon qualitative, la *structure microscopique de la nature* : éléments et atomes, molécules, particules élémentaires, forces fondamentales. On donnera les ordres de grandeur des distances et des tailles des objets.
4. *Classification des états de la matière et de ses transformations*. On fera référence à leur explication microscopique : agencement et liaisons différentes des constituants, notion de réaction chimique.
5. *Quelques réactions chimiques simples et leurs équations*. Exemples : combustion du carbone, du soufre, du fer, du méthane, ou propane, butane ; oxydation du cuivre, du fer, etc. On introduira la notion de quantités conservées (masse) ou de transformation de quantités simples (volume).
6. On introduira les *réactions chimiques ioniques*, en lien avec la notion de courant électrique.

3. *Électromagnétisme, électricité*

1. On pourra partir des notions introduites plus haut d'ion et d'électron pour introduire ou discuter plus avant la notion de *charge électrique*.
2. *Électrostatique* : quelques phénomènes simples liés à l'électricité statique. On pourra terminer par la loi de l'électrostatique, faire le parallèle avec la gravitation et souligner la différence également concernant le principe d'équivalence.
3. *Le courant électrique*. La notion sera introduite de façon microscopique, puis macroscopique, en utilisant les notions de circuit, de générateur et celles d'intensité et de tension ainsi que les lois reliées (Kirchhoff, composition des intensités et tensions, lois des nœuds et des mailles).

4. *Rudiments d'optique géométrique*

À aborder à la fin du collège, par exemple en 3^e. On commencera avec la question des lois de la réfraction, de la réflexion (de façon qualitative) ; on présentera des exemples simples de lentilles, miroirs, sans formules.

Au lycée

1. En classe de 2^{de} :

1. *Mouvements, mécanique.* On revient sur la notion de mouvement, de référentiel galiléen, de changement de référentiel de façon, maintenant, quantitative. On donne les lois de transformation des vitesses, les lois de transformation de Galilée (uniquement pour des référentiels en translation rectiligne uniforme). On revient aussi sur la notion de force d'inertie, de façon plus quantitative (par exemple en calculant l'accélération d'inertie dans un ascenseur avec, en tête, le principe d'équivalence d'Einstein et l'ascenseur du même Einstein). On introduira la quantité de mouvement, le centre d'inertie, puis le principe fondamental de la dynamique. On reverra les principales forces et l'on présentera les premières applications simples du principe fondamental de la dynamique.

2. *Rudiments de relativité restreinte et de relativité générale.* L'introduction à la *relativité restreinte* peut se faire par le biais des changements de référentiel, en faisant passer l'idée que la lumière n'obéit pas aux lois de transformations galiléennes. On en tire alors, en admettant la constance de la vitesse de la lumière, la non-universalité de la simultanéité, la contraction des longueurs et la dilatation des temps. On peut ensuite introduire les transformations de Lorentz. On terminera par une introduction simple à la notion d'espace-temps. Pour la *relativité générale*, on peut partir du principe d'équivalence (qui aura été introduit plus tôt au collège, puis rappelé en 2^{de}), en faisant remarquer que le principe d'équivalence peut s'exprimer comme le fait que tous les corps tombent de la même façon dans un champ gravitationnel, donc que force gravitationnelle et force d'inertie sont du même type. On donnera alors une version intuitive de la gravitation selon Einstein, en montrant que l'on peut obtenir le principe d'équivalence en supposant que les mouvements des corps sont déterminés par la géométrie de l'espace-temps. Ici, il n'est bien sûr pas question d'introduire les notions compliquées et abstraites de métriques ou de tenseurs, mais uniquement des choses qualitatives. On utilisera des analogies bidimensionnelles.

3. *Énergies.* Différents types d'énergie, unités, énergie mécanique, chimique. Notion de travail d'une force.

4. *Structure et histoire de l'univers.* Rappel sur la façon dont l'univers est structuré à grande et à petite échelle, ordre de grandeur, discussion plus particulière de la structure atomique et des différents types de radioactivités.

Tableau périodique des éléments.

Brève histoire de l'univers : un point de branchement avec ce qui précède, les rappels sur la structuration de l'univers et la question de l'origine des éléments chimiques.

5. *Physique ondulatoire, rudiments de mécanique quantique*. Introduction au *caractère ondulatoire de la lumière*. Différentes longueurs d'onde. Classification du spectre électromagnétique. Notion d'interférence Les interférences seront d'abord traitées pour les phénomènes mécaniques, puis électromagnétiques. À la fin de l'année, rudiments de mécanique quantique : dualité onde- corpuscule, aspect probabiliste. Il faut pour cela que certaines notions des probabilités aient été introduites auparavant dans le cours de mathématiques, par exemple en se restreignant à des probabilités discrètes. Cela peut se faire en partie au collège *via* des méthodes de mesures de type « Monte-Carlo » (par exemple, mesurer la surface d'un disque et de cette façon calculer π , en jetant des aiguilles sur un disque).
6. *Chimie*. Notions quantitatives et retour plus quantitatif sur certaines choses vues au collège en lien avec l'introduction du tableau périodique des éléments. Numéro atomique. Structure de couche. Liaisons chimiques covalentes. Introduction de la mole et concentration molaire de la masse molaire.

2. Cycle terminal (classes de 1^{ère} et Terminale en spécialité science)

Dans le cycle terminal de spécialité, on ne revient pas sur les notions de relativité et de mécanique quantique introduites en classe de 2^{de}. Ce cycle a comme objectif l'établissement de bases solides et utilisant un formalisme mathématique à partir de ce qui aura été vu auparavant au collège et en classe de 2^{de}. On peut envisager que certaines notions étudiées dans ce cycle de façon quantitative et mathématique dans les spécialités ou filières scientifiques soient étudiées plus succinctement et qualitativement dans les filières non scientifiques.

1. *Mécanique*. Formulations différentielles des grandeurs et lois pertinentes, en lien avec le cours de mathématiques sur les dérivées (vitesse = dérivée temporelle de la position ; accélération = dérivée de la vitesse...). Mouvement de rotation (introduction des grandeurs pertinentes). Principe fondamental de la dynamique, application quantitative. Retour en détail et de façon mathématisée sur les notions d'énergie, de travail, d'énergie cinétique et potentielle. Mouvement soumis à la force de gravitation, oscillateur harmonique.

2. *Électromagnétisme et électricité*. Champ électrostatique, magnétostatique, énergie potentielle, puissance électrique, loi d'Ohm, de Joule, différents montages électriques standard, circuits RLC en régime forcé et non forcé, notion de résonance.

Bilan énergétique.

Action des champs sur la dynamique des particules chargées et sur les circuits électriques.

Induction. Les ondes électromagnétiques et leur génération.

3. *Thermodynamique et physique des milieux continus*. Notion de pression, lois des gaz parfaits, gaz et liquide à l'équilibre (loi d'Archimède vue de façon quantitative).

Notions de température et de chaleur, en lien avec l'agitation des constituants.

Transfert d'énergie thermique, en lien avec l'étude de quelques réactions chimiques exothermiques et notion d'énergie de liaison : retour, à cette occasion, sur les différentes radioactivités.

4. *Optique*. Lentilles, prismes, lois de la réflexion, réfraction, de façon quantitative.

Diffraction.

5. *Chimie*. Bases de la chimie organique : les composés carbonés, alcanes, alcènes, alcynes, aromatiques, composés organiques oxygénés, alcools, acides carboxyliques, structure et nomenclature. Formes et rôles naturels. Réactions simples impliquant ces composés : estérification-hydrolyse, oxydation des alcools, saponification, polymérisation. Exemples de polymères. Chimie minérale : réactions d'oxydoréduction et réactions acido-basiques (impliquant l'introduction des couples acide-base, oxydant-réducteur), solutions aqueuses (notion de pH). Électrolyses, dosages. Éléments de cinétique chimique et de mécanismes réactionnels. Pour toutes les réactions et tous les composants abordés, on fera usage de la classification périodique des éléments et on donnera les éléments utiles et principaux de la structure des composés considérés.