

Faire évoluer le problème de physique

par Michel HULIN
Professeur à l'Université P. et M. Curie - PARIS VI*

Les contingences docimologiques ont un impact considérable sur l'enseignement, en particulier dans les classes terminales. Une rénovation véritable de l'enseignement des Sciences Physiques suppose une bouleversement radical des habitudes acquises en matière de contrôle des connaissances. Il est essentiel que soit abandonné, en particulier, le traditionnel «problème de Physique» où toute l'analyse proprement physique est à la charge de l'auteur de l'énoncé, les candidats se voyant réserver des manipulations mathématiques ou des applications numériques sans grandeur, et sans véritable valeur comme tests de leurs aptitudes réelles.

Il faut concevoir différemment le problème pour lequel on peut définir un protocole général d'approche qui ouvre la voie à une véritable réflexion scientifique.

Un problème de physique propose en général une situation physique et vise à la prédiction, le plus souvent quantitative, des phénomènes qui s'y manifestent, et des grandeurs qui la caractérisent. Mais il est utile de faire précéder le traitement quantitatif, et «l'application des formules», d'une réflexion qualitative préalable, puis d'affiner progressivement l'analyse afin de préparer la partie vraiment quantitative et formalisée du traitement.

Ces phases préalables de l'étude peuvent être plus ou moins développées suivant le problème posé, sa difficulté et son ampleur. Mais il faut toujours songer à elles, et leur accorder, systématiquement, au moins quelques instants de réflexion. C'est à cette condition que la recherche des solutions des problèmes de physique cessera d'être une sorte de tâtonnement aveugle dans un catalogue de formules et de recettes ; c'est aussi ce qui autorisera à avancer encore certaines

* Ce texte inédit nous a été aimablement transmis par Mme Nicole HULIN. Il précise les idées présentées dans le supplément au n° 713 (Avril 1989) du B.U.P., p. 19 et 20 (N.d.R.)

prédictions alors même que le traitement quantitatif sera interdit du fait d'une trop grande complexité. C'est enfin ce qui permettra, au-delà des motivations purement scolaires, d'apprécier ce que l'analyse, dans le cadre de la physique moderne, des phénomènes naturels ou des dispositifs techniques peut assurer comme apport «culturel».

Il est souhaitable d'organiser la démarche, dans cet examen préliminaire des problèmes physiques, suivant un « protocole » assez systématisé, qui est présenté maintenant. Soulignons encore que, suivant la nature de la question posée, l'attention à accorder aux différents points du protocole peut varier considérablement ; il ne faut pas s'ingénier à dire quelques chose à tout prix sur chacun d'eux ; mais il est bon de s'interroger à chaque fois, fût-ce très rapidement, sur la possibilité de dire quelque chose de pertinent.

Décrivons maintenant le «protocole d'approche des problèmes» - (nous abrègerons désormais en «PAP») - que nous proposons. Il comporte trois étapes.

1. DESCRIPTION QUALITATIVE

Il s'agit de commencer à «sentir» ce qui se passe, en insistant sur deux aspects essentiels, mais seulement au niveau qualitatif.

A – Causalité

Une situation physique offre très généralement un contexte où s'exerce la causalité, de manière diverse : certaines « causes » y produisent certains « effets » – (par exemple : des forces apparaissent entre différents composants du système étudié, et influent sur leurs mouvements ; un générateur soumet les électrons d'un circuit à un champ électromoteur, et il apparaît un courant électrique, etc...)

Il s'agit ici, et le plus souvent cela ne demande que quelques instants, de bien affirmer dès le départ :

- quels sont les «effets» attendus de « causes » données, et qu'on prend garde de répertorier de manière exhaustive ;
- quelles sont les «causes» qu'on peut supposer à certains «effets» dont l'énoncé du problème donne la description.

Il conviendra également de repérer les conflits possibles entre les

interventions de diverses causes : la situation physique qui en découle est marquée de manière souvent essentielle par le compromis entre ces causes qui s'opposent, et il faut que ceci aussi soit explicité dès le départ.

B – Transferts de quantités se prêtant à conservation

A un niveau moins intuitif que celui de la description de l'exercice de la causalité, l'analyse physique des phénomènes fait jouer un rôle essentiel aux «conditions aux limites» imposées par la nécessité de conserver globalement - (c'est-à-dire au niveau de « l'Univers», ou plus prosaïquement, d'un système fermé et isolé au sein duquel se produit le phénomène étudié) - un certain nombre de quantités physiques, soit essentiellement :

- énergie
- quantité de mouvement
- moment cinétique
- charge électrique.

Dès l'étape de description qualitative du «PAP», il convient de compléter l'analyse des relations de cause à effet mentionnée plus haut par l'analyse qualitative des transferts d'énergie, de quantité de mouvement, etc... : si telle portion du système perd de la quantité de mouvement, telle autre en gagne ; si tel conducteur perd une charge électrique initiale, tel autre la récupère, etc...

C – Analogies et rapprochements

Indépendamment des appréciations d'ensemble qui précèdent sur la nature et les conditions de l'état ou de l'évolution du système étudié, il est judicieux d'examiner, dans cette première étape, « à quoi la situation examinée peut faire penser » : on fera ici référence à l'ensemble des situations déjà rencontrées avec lesquelles on perçoit a priori une analogie – (Avec l'expérience, la nature des analogies auxquelles on pourra être sensible pourra d'ailleurs évoluer, et s'enrichir de rapprochements plus «abstraites» qui, pour l'essentiel, marquent le souvenir de traitements quantitatifs et formalisés antérieurement menés et convenablement décantés).

2. MISE EN PLACE DE L'ÉTUDE QUANTITATIVE

Après cette première prise de contact avec le problème, il convient de passer à un traitement quantitatif ; mais celui-ci doit être préparé par la mise en place explicite d'un certain nombre d'auxiliaires.

A – Définition des systèmes et sous-systèmes

L'étude d'un phénomène physique repose essentiellement sur la description de l'évolution relative des différents corps, composants ou dispositifs qui sont pris en compte. Encore convient-il de les repérer, de les définir explicitement, éventuellement de les regrouper en ensembles eux-mêmes explicitement définis.

Alors seulement, on pourra décrire «le» système étudié, et l'opposer au «reste de l'Univers», étudier son mouvement relativement à un référentiel, son orientation relativement à un repère, ses échanges d'énergie, de quantité de mouvement, etc... avec le milieu extérieur. De la même manière, il conviendra au besoin de reconnaître explicitement, au sein du système, ses différentes parties ou « sous-systèmes», de manière à pouvoir décrire précisément leurs positions ou mouvements relatifs, leurs bilans de transfert énergétiques, ou électriques etc...

Nous insistons sur ce point trop souvent négligé des débutants : pour eux le système «va de soi» ; il n'est pas utile de le préciser. Il en résulte qu'un caractère absolu est accordé à toutes sortes d'éléments, intervenant dans la description de la situation physique considérée, qui n'ont en fait qu'un caractère relatif : les mouvements deviennent ainsi mouvements «en soi», au lieu d'être mouvement d'un objet par rapport aux autres ; les énergies, les quantités de mouvement, les charges sont gagnées ou perdues dans l'absolu au lieu d'être gagnées par un sous-système aux dépens d'un autre ou perdues au profit d'un autre. Il en résulte rapidement, comme on l'imagine, ou bien qu'on ne prend en compte que la moitié des transferts des quantités se conservant, ce qui interdit de mettre en évidence leur conservation, ou bien qu'on fait intervenir un même transfert deux fois (comme un gain et comme un perte, mais sans prendre en compte qu'il s'agit des deux facettes du même processus d'échange).

B – Définition explicite des repères et des référentiels

Il s'agit là d'un aspect particulier et plus technique du point (A) dont on vient de traiter. Tout ce qui est description des mouvements ou des positions ne peut être fait que par rapport à des repères ou

référentiels dûment précisés, les repères (ou «systèmes d'axes») permettant de repérer les positions, et devenant des référentiels après adjonction d'un ensemble d'horloges dûment synchronisées permettant de décrire les mouvements, c'est-à-dire l'évolution des positions au cours du temps.

Notre exigence est ici «relativiste» : il est dépourvu de sens, en physique, de parler de «mouvement absolu» ; le mouvement ne peut être que relatif à un référentiel. Reste à s'interroger sur les rapports qu'il conviendra d'établir entre les diverses descriptions d'un même mouvement relativement à une série de référentiels différents, autrement dit à se poser le problème du «changement de référentiel», ce qui peut se faire à différents niveaux de raffinement (relativité galiléenne, relativité einsteinienne) : ce n'est qu'une manière d'insister sur la nécessité de toujours définir positions et mouvements relativement à des repères ou référentiel dûment explicités.

(Si l'on veut, on peut noter que repères et référentiels sont en quelque sorte des «sous-systèmes» qu'on ajoute aux éléments effectivement présents dans la situation physique étudiée, qui n'ont avec ces éléments ni interactions ni échanges d'aucune sorte, et qui sont là pour donner plus de commodité et de souplesse à la définition des positions et des mouvements.

Notons enfin que, hors du «PAP» proprement dit, pendant et après le traitement quantitatif du problème, il est très souvent judicieux de s'interroger sur les modifications qu'entraînerait un changement de repère ou de référentiel : on obtient ainsi une description différente, mais dont il est instructif de s'assurer qu'elle donne une autre représentation de la même réalité physique que la description obtenue avec le premier référentiel ou le premier repère).

C – Établissement de la liste des grandeurs physiques pertinentes

Tous les sous-systèmes ou systèmes étudiés doivent être caractérisés par les valeurs - évoluant éventuellement au cours de l'expérience - de diverses grandeurs physiques qui y font référence : les vitesses de leurs points, leur masse, leur charge électrique, leur température etc...

Suivant la situation physique considérée, certains de ces paramètres peuvent sembler sans influence possible sur les phénomènes en cause : ce ne sont pas alors des grandeurs physiques «pertinentes», et on les ignore par la suite. Le traitement doit donc être préparé par l'établis-

ment de la liste des grandeurs physiques qui semblent a priori pertinentes.

Remarquons :

- que la pratique commune de l'enseignement a tendance à «gommer» cette étape : la liste des grandeurs pertinentes est fourni par l'énoncé sans adjonction ni omission. C'est une pratique regrettable à laquelle il faut remédier à l'occasion en fournissant trop ou pas assez de données dans les énoncés d'exercices ;
- que dans l'établissement de cette liste, l'intuition physique trouve déjà une première occasion de s'exercer, (ce qui rend regrettable d'évacuer le problème). En effet, il convient de «sentir» déjà ce qui peut être important, et ce qui est inutile, et on peut se tromper dès cette étape préliminaire : retenir trop de paramètres et alourdir les calculs, ou en omettre et rendre inopérant le traitement quantitatif ultérieur.

3. TRAITEMENT QUANTITATIF PRÉLIMINAIRE

Avant de passer au traitement quantitatif définitif proprement dit - celui qui fixera les équations du mouvement, précisera les intensités dans les différentes branches du circuit, etc... -, il convient de procéder à un travail, déjà quantitatif, mais encore préliminaire qui, en quelque sorte, prépare les calculs ultérieurs, les organise, et en fixe les conditions. Ce traitement préalable implique plusieurs activités successives.

A – Étude et prise en compte des symétries du problème

Soulignons l'importance de ce point : si un mouvement est plan, il faut le reconnaître avant de poser les équations du mouvement ; si un champ de vecteurs est radial, il ne faut pas s'encômbrier de trois composantes, etc...

B – Expression des lois physiques invoquées

Au point où l'étude est rendue, il convient de relier différentes grandeurs pertinentes entre elles, en exprimant comment s'exerce la causalité dans la situation physique étudiée. Ceci revient à dresser la liste des relations entre ces grandeurs auxquelles on va demander de rendre compte des phénomènes observés, ou de prédire les phénomènes qui le seront. Ces relations, après choix de symboles convenables, peuvent d'ores et déjà prendre une forme algébrique.

C – Analyse dimensionnelle *

Disposant des grandeurs physiques pertinentes et des «relations initiales» du problème, nous pouvons pratiquer l'analyse dimensionnelle (AD) du problème posé. Nous définirons ainsi le groupe maximal de changements d'unités relatif au problème posé, le nombre minimal de combinaisons sans dimensions des grandeurs physiques pertinentes, ainsi que les formes de ces combinaisons qui nous sembleront les plus commodes pour un emploi ultérieur.

En particulier, nous tenterons de mettre en évidence des «unités naturelle» pour les différentes grandeurs physiques d'intérêt.

A ce point, nous pourrons revenir sur certaines étapes antérieures à la lumière des résultats déjà obtenus :

1) une évaluation d'ordres de grandeur en «unités naturelles» peut montrer que certaines grandeurs ont des valeurs telles - par exemple très petites - qu'elles ne jouent en fait aucun rôle. Il convient de les retrancher des grandeurs pertinentes et de reprendre sans elles le traitement antérieur.

2) une évaluation d'ordres de grandeur peut éventuellement faire attendre différents «régimes» dans le comportement du système. Nous avons signalé, plus haut, qu'il pouvait y avoir «conflit» entre différentes causes : des comparaisons d'ordres de grandeur permettent ici de préciser les termes de ce conflit et, par exemple, de distinguer des situations où la cause n°1 peut être totalement ignorée au bénéfice de la cause n°2, et des situations où prévaut l'approximation inverse. Dans chaque cas, il sera alors possible de revenir sur la définition des grandeurs physiques pertinentes et des relations initiales, et de reprendre l'AD du problème.

3) d'une manière plus générale, il sera souvent judicieux d'examiner directement le comportement du système dans diverses situations limites, c'est-à-dire pour des valeurs très petites ou très grandes de certains paramètres. Il est alors souvent possible de prédire intuitivement le comportement du système, sans traitement quantitatif complet. On dispose ainsi d'un garde-fou utile pour la suite de l'étude : une fois les calculs terminés, on pourra les contrôler au moins par passage à la limite.

* M. HULIN, « Dimensional analysis : some suggestions for the modification and generalisation of its use in physics teachnig », European Journal of Physics, 1980, p. 48-55.

D – Examen des invariances et des conservations

Il est maintenant possible de préciser davantage tous les problèmes de conservation de certaines quantités, ou d'invariance de certaines grandeurs physiques caractéristiques, que nous avons déjà évoqués, en introduisant une formulation quantitative des relations correspondantes.

E – Repérage des «schèmes» fondamentaux

De même que l'approche qualitative implique d'effectuer des rapprochements ou de repérer des analogies avec des situations préalablement rencontrées, de même l'étude quantitative peut-elle s'enrichir de comparaisons similaires. Le recours au formalisme permet même de chercher plus loin les analogies que ce que permet une appréciation qualitative « naïve » : d'où, par exemple, l'établissement de liens entre systèmes électriques et mécaniques, fondés sur la similitude des formulations mathématiques.

Parmi les rapprochements auxquels il faut songer, certains concernent des analyses qu'on peut importer toutes faites d'une situation physique dans une autre. C'est ce que nous appellerons des «schèmes fondamentaux». Il importe de les repérer, au fur et à mesure de la progression, et de songer à s'y référer par la suite.

* * *

Il resterait à préciser concrètement, sur des exercices, les grandes lignes au moins de ce «PAP» qui, s'il était adopté, nécessiterait d'accroître grandement la souplesse de nos modalités d'examen mais permettrait de respecter l'authenticité des sciences physiques et leur valeur culturelle.