

# Le KPK : un cours de physique basé sur des analogies

par **Friedrich HERRMANN**

Abteilung für Didaktik der Physik

Universität Karlsruhe - D-76128 Karlsruhe

Allemagne

friedrich.herrmann@physik.uni-karlsruhe.de

## RÉSUMÉ

*Nous allons présenter un nouveau cours de physique pour des élèves de 13 à 16 ans, le KPK. Il est basé sur une analogie de grande portée, dans laquelle les divers domaines de la physique et de la chimie se retrouvent. Dans ce cours, les grandeurs extensives jouent le rôle de grandeurs de base : la quantité de mouvement, la charge électrique, l'entropie et la quantité de matière. On commence la mécanique en introduisant la quantité de mouvement et la thermodynamique en introduisant l'entropie. Le cours est à la fois plus concis et plus simple.*

## 1. INTRODUCTION

Notre sujet est un nouveau cours de physique : « Der Karlsruher Physikkurs », ou plus brièvement, le KPK [1-2]. Il s'agit d'un cours pour le collège ou le lycée, pour des élèves de 13 à 16 ans environ. Il a été expérimenté pendant les quinze dernières années avec seize mille élèves environ.

Ce cours a été développé à l'Université de Karlsruhe, il est donc en langue allemande, mais il a été traduit en d'autres langues : en italien, en slovène, partiellement en espagnol, et des traductions en anglais et en russe sont en cours [3].

Cette approche du cours de physique est différente à plusieurs égards des cours de physique typiques d'aujourd'hui.

Nous allons essayer d'en donner une idée. Évidemment, nous pouvons à peine parler des contenus concrets, car pour ceci il faudrait plus qu'un simple article. Nous ne parlerons donc que des bases du cours, sa structure générale. À la fin seulement, nous allons esquisser quelques heures de classe, en thermodynamique.

## 2. POURQUOI UN NOUVEAU COURS ?

Nous commençons avec une remarque triviale : la quantité du savoir de la physique,

comme celui de n'importe quelle autre science, augmente sans cesse, irrésistiblement. Le temps dont nous disposons pour l'enseignement, par contre, n'augmente pas. Voici le problème. C'est un problème facile à énoncer.

Pour le résoudre, ou au moins pour l'attaquer, nous poursuivons deux stratégies :

- ◆ *La première* : il y a des sujets qui, en apparence, n'ont rien à voir les uns avec les autres, mais qui, en réalité, ont une structure commune. On va traiter ces sujets-là sous des points de vue communs. On profitera des ressemblances, des analogies, des correspondances ou des structures communes.
- ◆ *La seconde* : les contenus de l'enseignement de la physique sont le produit d'un processus d'évolution. De tels processus sont sujets à certaines règles et lois. Ainsi, il est normal que la physique, telle que nous l'enseignons aujourd'hui, reflète le processus de la genèse du savoir scientifique. Et ceci jusque dans les moindres détails.

Apprenant la physique, les élèves et les étudiants répètent ce processus historique avec tous les détours, obstacles et même des erreurs. Ce phénomène rappelle une loi bien connue par les biologistes : la règle biogénétique fondamentale de Ernest HAECKEL. Selon cette règle, l'ontogenèse est une récapitulation abrégée de la phylogenèse, c'est-à-dire le développement de l'individu est similaire au développement de l'espèce.

Il est donc normal qu'un cours de physique contienne des ruines ou des vestiges de la physique d'antan : des sujets qui, d'un point de vue moderne, sont superflus ou sont présentés d'une manière inappropriée. Effectivement, si on cherche, on trouve un grand nombre de ces « fardeaux historiques » [4-5]. Il est important de noter, que ces concepts inappropriés ne sont pas entrés dans la physique par incompétence des auteurs. Au contraire, à l'époque quand ils ont été introduits dans la physique, ils étaient raisonnables, voire indispensables.

Le fait que nous avons appris la physique telle qu'elle est présentée dans les livres, et que nous nous sommes habitués à cette présentation, nous empêche d'apercevoir ces concepts « fossilisés ». Mais pour le développement d'un cours nouveau, il est indispensable de les reconnaître et de les percevoir. En développant notre cours, nous avons essayé d'éliminer ces fardeaux historiques dans la mesure du possible.

### 3. LES BASES PHYSIQUES DU COURS

#### 3.1. Les grandeurs extensives

Dans notre cours, une certaine classe de grandeurs physiques joue un rôle particulier : ce sont les grandeurs extensives. Une grandeur est extensive, si sa valeur correspond à une région de l'espace. Une température ou une pression par exemple, correspond à un point. Un flux ou une intensité de courant correspondent à une aire ou une surface. Les grandeurs extensives correspondent à une région tridimensionnelle. Les grandeurs extensives les plus importantes sont la masse, l'énergie, la charge électrique, la quantité de matière, la quantité de mouvement, l'entropie et le moment cinétique.

Les grandeurs physiques sont des concepts abstraits, elles sont des variables mathématiques dans une théorie. Mais nous essayons de donner une interprétation intuitive à chacune d'entre elles. Il est particulièrement facile de se faire une idée intuitive des grandeurs extensives. En effet, il est possible et recommandable de s'imaginer chacune de ces grandeurs comme une substance ou comme un fluide. Quand nous disons « imaginer », nous voulons dire que l'on manie ces grandeurs correctement dans le sens de la physique, si on parle d'elles comme si on parlait d'une substance. Nous reviendrons sur ce point plus tard.

D'abord une particularité des grandeurs extensives : pour chacune d'elles on peut écrire une équation du type :

$$dX / dt = I_x + \Sigma_x \tag{1}$$

Ici,  $X$  représente une grandeur extensive quelconque. Comme chacune des grandeurs extensives, cette équation se réfère aussi à une région de l'espace.  $dX / dt$  décrit le taux de variation de  $X$  à l'intérieur de la région,  $\Sigma_x$  est le taux de production dans la région.  $I_x$  par contre, ne correspond pas à l'intérieur, mais à la surface de la région et nous l'interprétons comme l'intensité ou le débit d'un courant (flux) à travers la surface.

On voit donc que l'équation (1) établit un bilan de  $X$ . Elle nous dit que la valeur de  $X$  peut changer de deux manières : ou bien par un flux qui entre ou qui sort, ou bien par la création ou destruction de  $X$  à l'intérieur. C'est l'équation de continuité de  $X$ .

Pour certaines des grandeurs extensives, le terme de production  $\Sigma_x$  est toujours nul, c'est-à-dire  $X$  peut varier seulement par un courant qui entre ou qui sort. Ces grandeurs-là sont les grandeurs conservatives. Des exemples sont l'énergie, la quantité de mouvement ou la charge électrique. Le tableau 1 montre les équations de bilan pour quelques grandeurs extensives avec les symboles habituels.

$\frac{dQ}{dt} = I$
$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$
$\frac{dS}{dt} = I_s + \Sigma_s$
$\frac{dn}{dt} = I_n + \Sigma_n$

**Tableau 1 :** Équations de bilan pour la charge électrique, la quantité de mouvement, l'entropie et la quantité de matière.

### 3.2. Les avantages de l'emploi des grandeurs extensives pour l'enseignement

Il y a plusieurs raisons de placer les grandeurs extensives au centre d'un cours de physique. Nous allons en discuter à propos de deux d'entre elles. La première est de caractère plutôt didactique.

### 3.2.1. Le maniement linguistique des grandeurs physiques

Il avait déjà été mentionné que l'on peut parler des grandeurs extensives comme s'il s'agissait des substances, de l'eau ou de l'air, par exemple. C'est extrêmement important. Pourquoi ?

Quand nous introduisons une nouvelle grandeur physique, il ne suffit pas de la définir, et d'expliquer comment on se procure des valeurs. Il est aussi important que les élèves apprennent le maniement verbal de la grandeur. En effet, le nom d'une grandeur doit être précédé ou suivi de certains verbes, adjectifs, prépositions, etc., et en général on n'a pas beaucoup de choix. Voici un exemple :

- ◆ *la force...* « agit » ou « est exercée » ;
- ◆ *le travail...* « se réalise ».

Il n'y a pratiquement pas d'autres possibilités de s'exprimer dans ces cas.

Mais c'est très différent, quand il s'agit d'une grandeur extensive. Prenons comme exemple la charge électrique. Pour exprimer que sa valeur est non nulle pour un corps, on peut dire qu'« il y a » de la charge, « il se trouve » de la charge sur le corps, ou le corps « est chargé ». Quand la charge électrique d'un corps diminue, et celle d'un autre corps augmente, on peut dire que la charge « passe » d'un corps à l'autre, qu'elle « va » d'un endroit à un autre, qu'elle « quitte » le premier corps et qu'elle « arrive » au second. La charge électrique peut « s'accumuler », « se concentrer », « se répartir » et « se distribuer », on peut la « perdre » et on peut la « retrouver », on peut la « forcer » au travers d'une résistance, etc., etc.

On voit qu'ici on peut se servir de toutes les locutions ou expressions qu'on utilise quand on parle d'une substance, de l'eau par exemple. Le langage que l'on peut employer est familier aux élèves déjà avant qu'ils aient eu leur première leçon de physique.

La cause de cette liberté linguistique est évidente : on emploie un modèle. On imagine les grandeurs extensives comme des substances. Il est important d'être conscient que nous utilisons un modèle. Nous ne disons pas, que l'entropie ou la quantité de mouvement sont des substances. Nous disons que l'on parle correctement d'elles, dans le sens de la physique, quand on parle de ces quantités comme on parle de substances.

Il est évident que l'on peut profiter de cet avantage des grandeurs extensives seulement si leur caractère extensif est mis en évidence dans les leçons de physique. À vrai dire, dans l'enseignement traditionnel de la physique, ceci n'est pas toujours le cas. Il est vrai qu'on introduit la charge électrique ou la masse de manière que l'extensivité devient apparente. Ce n'est pas tout à fait le cas quand il s'agit de l'énergie. Rappelons que l'on dit qu'on « réalise du travail », au lieu de dire qu'il y a un « flux d'énergie ». Et on parle de « puissance » au lieu d'intensité du courant d'énergie. En ce qui concerne la quantité de mouvement et l'entropie, le caractère extensif devient encore moins apparent dans l'introduction traditionnelle de ces grandeurs.

Dans notre cours, on traite toutes les grandeurs extensives au même niveau. On les

introduit comme on introduit traditionnellement la charge électrique, c'est-à-dire qu'on les présente comme un genre de fluide. Nous verrons plus tard comment cela se réalise en détail, mais passons d'abord à une deuxième raison pour préférer les grandeurs extensives.

### 3.2.2. Structures dans la physique

Si on met l'accent sur les grandeurs extensives, on peut découvrir une analogie entre les divers domaines de la physique : une structure commune de la mécanique, de l'électricité, de la thermodynamique et de la chimie. Nous allons expliquer cette analogie au moyen du tableau 2.

Champ scientifique	Grandeur extensive	Grandeur intensive	Courant	Flux d'énergie
Électricité	Charge électrique ( $Q$ )	Potentiel électrique	Courant électrique	$P = U \cdot I$
Mécanique	Quantité de mouvement ( $p$ )	Vitesse	Courant mécanique (= force)	$P = v \cdot F$
Thermodynamique	Entropie ( $S$ )	Température absolue	Courant d'entropie	$P = T \cdot I_s$
Chimie	Quantité de matière ( $n$ )	Potentiel chimique	Courant de matière	$P = \mu \cdot I_n$

**Tableau 2 :** Dans l'analogie entre électricité, mécanique, thermodynamique et chimie se correspondent des grandeurs et des relations entre grandeurs.

Dans la deuxième colonne se trouvent les grandeurs extensives qui se correspondent : la charge électrique, la quantité de mouvement, l'entropie et la quantité de matière. À chacune de ces quantités correspond une grandeur intensive, « conjuguée » comme on dit : le potentiel électrique, la vitesse, la température absolue et le potentiel chimique, on peut les voir dans la troisième colonne. On voit que chaque ligne correspond à un domaine classique de la physique ou des sciences : l'électricité, la mécanique, la thermodynamique et la chimie. Chacune de ces matières a donc sa grandeur extensive caractéristique, et sa grandeur intensive. Mais le tableau continue encore. À chacune des grandeurs extensives correspond une intensité de courant, voir la quatrième colonne. En plus, on pourrait définir pour chaque ligne une résistance, une capacité, etc. Ainsi, le tableau représente un genre de dictionnaire, qui permet de passer d'un domaine de la science à un autre ou de « traduire » le formalisme d'un domaine dans celui d'un autre.

Ce qui est plus important est que le tableau ne permet pas seulement de traduire des grandeurs physiques entre elles, mais aussi des relations entre ces grandeurs, c'est-à-dire des équations ou des formules. En plus, il permet de faire la correspondance entre des processus, des phénomènes et même des appareils ou des machines. Les équations de bilan du tableau 1 en sont un exemple.

Un autre exemple concerne les équations de la cinquième colonne du tableau 2. Chacune de ces équations décrit un transport ou transfert d'énergie. La première décrit un transport d'énergie électrique, la deuxième représente ce qu'on appelle traditionnellement un transport de travail mécanique, la troisième un transport de la chaleur (ou transfert thermique), et la dernière un transport d'énergie chimique. On peut obtenir chacune

de ces équations par traduction formelle d'une autre d'entre elles. Il faut remarquer qu'en faisant cette traduction, on ne traduit pas l'énergie. L'énergie se traduit en elle-même. Puisque le temps aussi est un invariant dans ce système, le flux de l'énergie ne se traduit pas non plus. On peut donc dire, que dans ce dictionnaire, l'énergie (de même que le temps) est un « mot international ».

On constate d'ailleurs que, quand il y a un flux d'énergie, il y a toujours un flux « d'autre chose » : de charge électrique, de quantité de mouvement, d'entropie ou de quantité de matière. En d'autres termes : *L'énergie ne passe jamais seule d'un endroit à l'autre*. Nous appelons la grandeur, qui « accompagne » l'énergie, le *porteur de l'énergie*.

Cette analogie, qui, pour le moment, apparaît comme une analogie purement mathématique, suggère, d'employer les mêmes modèles mentaux et les mêmes idées intuitives dans les quatre domaines scientifiques du tableau 2. Ceci est une des caractéristiques les plus frappantes de notre cours. La concision du cours est essentiellement due au fait que nous profitons de cette analogie entre les modèles mentaux.

Les conséquences de cette décision concernant un cours de physique sont de grande portée. Prendre le tableau 2 au sérieux implique que l'on considère les grandeurs extensives de la deuxième colonne comme les protagonistes du domaine correspondant de la physique. Ainsi, la quantité de mouvement est le protagoniste de la mécanique, et la force est interprétée comme l'intensité de courant de la quantité de mouvement, le « courant mécanique ». La charge électrique est le protagoniste de l'électricité et l'entropie est la grandeur principale de la thermodynamique. En d'autres termes : la mécanique est la partie de la physique, qui traite de la quantité de mouvement et de ses courants, l'électricité se définit comme la matière qui s'occupe de la charge électrique et de ses courants, la thermodynamique est la branche de la physique qui traite l'entropie et les courants d'entropie et la chimie s'occupe de la quantité de matière et de ses flux et transformations. Cela veut dire, qu'on commence la mécanique en introduisant la quantité de mouvement, comme il est naturel de commencer l'électricité avec la charge électrique. Et on commence la thermodynamique en introduisant l'entropie. On peut formuler cette conclusion d'une manière encore plus frappante :

*La thermodynamique sans entropie et sans courant d'entropie est comme la mécanique sans quantité de mouvement et sans force ou bien comme l'électricité sans charge électrique et sans courant électrique [6].*

Voilà la conclusion qu'on peut tirer du tableau. Remarquons qu'elle est basée sur une analogie mathématique. Cependant, on pourrait penser qu'il n'est pas très réaliste de commencer la mécanique avec la quantité de mouvement. On pourrait penser que la quantité de mouvement est une grandeur bien trop difficile pour un débutant. Et ne serait-il encore pire en ce qui concerne l'entropie ? L'entropie étant notoirement incompréhensible ?

La réponse est : absolument pas. Il se trouve que l'on peut introduire ces grandeurs de telle manière qu'elles apparaissent comme des grandeurs particulièrement faciles, compréhensibles, inoffensives et même sympathiques. Comment cela ?

Nous introduisons la quantité de mouvement comme une grandeur qu'en termes du langage quotidien on appellerait « élan » ou « force ». Déjà DESCARTES, « l'inventeur » de la quantité de mouvement se faisait cette idée d'elle. Et nous introduisons l'entropie comme une grandeur qui en termes du langage courant s'appellerait « chaleur ». C'est essentiellement l'idée que CARNOT se faisait déjà de cette quantité. En effet, la correspondance entre le terme scientifique et le sens du mot du langage commun est quasi parfaite dans les deux cas.

## 4. EXEMPLE : LA THERMODYNAMIQUE

### 4.1. Remarques générales

Jusqu'ici, nous avons décrit la structure générale du cours. Dans ce qui suit, on va voir quelques conséquences de cette structure pour un sujet particulier : la thermodynamique.

Rappelons le tableau 2, il nous dit que l'entropie doit être le protagoniste de la thermodynamique. Nous allons donc l'introduire tout à fait au début, dès la première leçon. Nous l'introduisons comme la grandeur que l'on appelle « chaleur » dans le langage de tous les jours. En effet, la correspondance du concept de chaleur du langage quotidien avec la grandeur physique « entropie » est bien meilleure qu'avec la forme d'énergie que le physicien appelle « chaleur ». Nous connaissons tous les problèmes que nous avons avec le concept de chaleur tel qu'il est utilisé dans la physique. Par exemple, quand on fournit de la chaleur à un système, il paraît logique de penser, qu'ensuite cette chaleur se trouve dans le système. C'est comme si on laisse couler de l'eau dans un verre : après elle se trouve dans le verre. Il n'y a rien de plus évident que ça. C'est la logique courante, sur laquelle se base notre langage, qui nous le dit. Malheureusement, appliqué au concept de chaleur de la physique, on arrive à un faux résultat. On n'a pas le droit de dire que la chaleur se trouve dans le corps auquel on l'a fournie. Et si on le disait, ça serait faux. Une phrase correcte peut être celle-ci : quand on fournit de la chaleur à un système, c'est son *enthalpie* qui augmente conformément.

Par contre, on peut décrire le même processus avec la phrase suivante : on fournit  $x$  unités d'entropie à un système, et pour cela l'entropie du système augmente de  $x$  unités. Donc, l'entropie se comporte comme ce qu'on appelle « chaleur » dans le langage quotidien. En introduisant l'entropie dans notre cours, nous allons profiter de cette observation. Si on procède de cette manière, on trouve que l'entropie n'est pas seulement une grandeur qui n'est pas difficile. On trouve en effet qu'elle est une des grandeurs les plus faciles de toute la physique, comparable à la longueur ou à la masse.

D'ailleurs, c'est comme cela que la chaleur est apparue dans la physique pour la première fois. En effet, une grandeur de ce nom (« heat » en anglais) avait été introduite à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle par Joseph BLACK [7-8]. Il s'agissait d'une définition absolument correcte. La chaleur de BLACK était une grandeur extensive, et, bien sûr, une grandeur d'état. BLACK l'avait clairement différenciée de la grandeur intensive « température ». Et

il avait aussi défini une capacité calorique ou chaleur massique. Et c'est cette chaleur-là que l'on retrouve chez CARNOT, dans ses « Réflexions sur la puissance motrice du feu » [9]. Pourtant, quand au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, on introduisit l'énergie, il est arrivé un malheur : on était tellement enthousiasmé de la nouvelle grandeur, qu'on a dû croire que la grandeur de BLACK et de CARNOT, elle aussi, devrait être une forme d'énergie, ce qui n'était pas du tout le cas. Évidemment, avec cette identification, les travaux de CARNOT paraissaient erronés, et, en plus, la grandeur introduite par BLACK et CARNOT avait perdu son nom, parce que celui-ci était maintenant utilisé pour une forme d'énergie, avec des conséquences graves. D'une part, il était désormais interdit de dire, par exemple, qu'un corps contient de la chaleur. Et d'autre part, la grandeur simple et importante avait disparu. Désormais, il n'y avait plus moyen d'exprimer le contenu calorique d'un système. Néanmoins, une grandeur extensive pour le contenu en chaleur était indispensable. Par conséquence, elle fut réinventée par CLAUSIUS, sous le nouveau nom « entropie ». D'abord, personne ne se rendit compte, que cette grandeur avait déjà existé avant, et qu'elle n'était pas autre chose que ce qu'un profane aurait appelé « chaleur ». Ce spectacle fantomatique avait été mis à la lumière du jour seulement en 1911 par le thermodynamicien CALLENDAR, assez connu à l'époque. Dans un très bel article [10], il montre que l'entropie avait déjà existé cent ans avant CLAUSIUS, et qu'elle n'était autre chose que ce qu'on avait appelé « chaleur ». Finalement, en 1972 apparût un livre avec le titre « Die Entropie als Wärme », en français à peu près : « L'entropie en tant que chaleur », de G. JOB [11], qui reprend cette idée.

## 4.2. Esquisse des cinq premières leçons

Dans ce qui suit, nous allons esquisser les cinq premières leçons de thermodynamique du KPK. Nous avons choisi la forme d'un dialogue entre le professeur et « les » élèves. Ce cours a été donné un grand nombre de fois par beaucoup de professeurs et par l'auteur lui-même. Le dialogue que nous reproduisons doit être compris comme un dialogue moyen : des questions typiques et des réponses typiques. En plus, les réponses ou remarques de « l'élève » ne sont pas les mots d'un seul élève, mais ils viennent de plusieurs ou, dans le cas idéal, de tous les élèves de la classe. Il est évident aussi, que nous avons dû raccourcir ou comprimer cette discussion entre le professeur et la classe, le facteur de compression étant à peu près 4. Nous reproduisons aussi ce que le professeur pourrait écrire au tableau, mais non pas de manière complète.

### *Première leçon*

*Professeur* : Aujourd'hui, nous allons commencer un nouveau sujet : la thermodynamique. Elle traite de la chaleur, du chaud et froid d'un objet. Vous savez qu'en physique, on se sert des grandeurs physiques, c'est-à-dire qu'on décrit le monde quantitativement. Vous connaissez déjà une grandeur avec laquelle on peut décrire le chaud et le froid.

*Élève* : La température.



Professeur : Juste.

*On introduit le symbole et l'unité de mesure, pour le moment les degrés Celsius.*

Mais avec une seule grandeur on ne peut pas encore faire de la physique. La physique établit des relations entre les diverses grandeurs. Il nous faut donc une autre grandeur pour décrire le chaud et le froid. Et cette grandeur-là, vous la connaissez aussi. Elle nous dit, combien de chaleur est contenue dans un corps, c'est donc la quantité de chaleur. Une bouillotte par exemple, contient beaucoup de chaleur, pourvue que l'eau dans la bouillotte soit chaude. C'est ça notre deuxième grandeur.

Mais vous savez que les physiciens donnent souvent des noms particuliers à leurs grandeurs - pour qu'il n'y ait pas de confusion avec autre chose. La chaleur dont nous venons de parler s'appelle en physique *entropie*.

Nous l'abrégeons par le symbole « *S* », l'unité de mesure est le « Carnot », abrégé « Ct ». Pour se faire une idée de la valeur d'un Carnot, je vous dis déjà maintenant, que 1 cm<sup>3</sup> d'eau, à température normale contient à peu près 4 Ct.

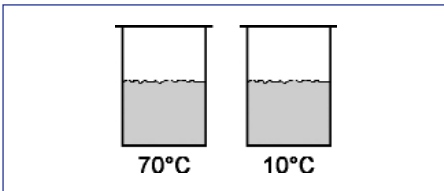
On va voir si vous avez compris. Je vais poser des questions, et dans toutes mes questions il y a le mot « entropie ». Chaque fois que je dis « entropie », vous pensez simplement : « chaleur ».

Alors, ici j'ai de l'eau froide (cf. figure 1), la température est de 10°, et ici j'ai de l'eau chaude, à 70°. La quantité d'eau est la même. Dans lequel des deux récipients y-a-t-il plus d'entropie ?

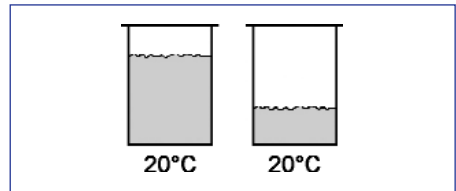
Élève : Dans celui de gauche, là où il y a l'eau chaude.

Professeur : Maintenant, on fait autre chose : il y a encore deux récipients, mais cette fois-ci, les températures sont les mêmes, mais il y a plus d'eau dans l'un des deux (cf. figure 2). Dans lequel il y a plus d'entropie ?

Élève : Dans celui de gauche, là où il y a plus d'eau.



**Figure 1** : Il y a plus d'entropie dans le récipient avec l'eau chaude.



**Figure 2** : Il y a plus d'entropie dans le récipient qui contient plus d'eau.

Professeur : Nous avons donc la règle :

Un corps contient d'autant plus d'entropie :

- que sa température est plus élevée ;
- qu'il est plus « grand ».

Maintenant, imaginons que dans cette eau (il montre un verre plein d'eau) il y a 12 Ct. Je vais verser un tiers de cette eau dans un autre récipient. Combien de Carnot y a-t-il dans celui-ci ?

Élève : Quatre Carnot.

Professeur : Et où sont restés les huit autres ?

Élève : Dans l'autre récipient.

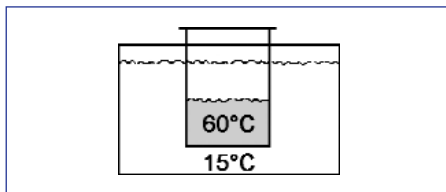
Professeur : Oui, juste.

*(Ces exercices sont importants, pour mettre en évidence le caractère extensif de l'entropie, et la distinguer de la température.)*

## Deuxième leçon

Professeur : Je plonge un verre avec de l'eau chaude dans de l'eau froide (cf. figure 3).  
Que se passe-t-il ?

Élève : La température de l'eau dans le récipient intérieur diminue, celle de l'eau à l'extérieur augmente.



**Figure 3** : L'entropie va spontanément de l'eau plus chaude vers l'eau plus froide.

Professeur : Vous pouvez m'expliquer pourquoi ? Je rappelle : quand je demande une explication, il faut me dire, ce qui se passe avec l'entropie.

Élève : L'entropie va de l'intérieur à l'extérieur.

Professeur : Nous avons donc la règle : « L'entropie va toujours de l'intérieur à l'extérieur » ?

Élève : Mais non ! Elle va du chaud au froid.

Professeur : Juste : l'entropie va toute seule ou spontanément du corps le plus chaud au corps le plus froid. Lors de ce processus, le corps le plus chaud se refroidit, et le plus froid se réchauffe. La différence de températures diminue. Quand elle a disparu totalement, le flux de l'entropie s'arrête. L'état que nous avons alors atteint, s'appelle équilibre thermique.

On peut aussi dire, qu'une différence de température est une espèce de « force motrice » pour un courant d'entropie.

*(Au tableau : « L'entropie va spontanément d'un corps plus chaud à un corps plus froid ».).*

## Troisième leçon

Professeur : On a vu que l'entropie va toute seule du chaud au froid. Elle descend la

pente de la température. Alors, souvent, on voudrait que l'entropie aille dans le sens opposé, on veut qu'elle monte la pente, du froid au chaud. Comment on peut faire ? Vous n'avez pas l'air d'avoir une idée. Pourtant, c'est un problème pas tout à fait inconnu : vous savez que l'air va tout seul de la pression plus haute à une pression plus basse. L'air sort du pneu, s'il y a un trou, il n'entre pas. Qu'est-ce qu'on fait si on veut qu'il entre dans le pneu ?

*Élève* : On se sert d'une pompe.

*Professeur* : Juste, on le force, au moyen d'une pompe à air. La pompe le pousse vers l'intérieur, contre la tendance naturelle, qui va de l'intérieur à l'extérieur. Si on veut que l'entropie aille du froid au chaud, on doit également la forcer. Et même si vous ne savez pas comment on le fait, peut-être vous pouvez me dire comment devrait s'appeler l'engin avec lequel on le fait.

*Élève* : Il devrait s'appeler « pompe à entropie ».

*Professeur* : Vous savez, que vous avez tous une pompe à entropie dans votre maison ?

*(Après une discussion prolongée.)*

*Élève* : Oui, dans le frigo.

*Professeur* : C'est ça. D'ailleurs, le nom technique de la pompe à entropie est « pompe à chaleur ».

*(Le professeur traîne un frigo authentique de la salle de préparation à la salle de classe. Les élèves cherchent et trouvent l'entrée et la sortie pour l'entropie. On discute d'autres applications des pompes à chaleur.)*

*(Au tableau : « Une pompe à chaleur transfère l'entropie d'un endroit plus froid à un endroit plus chaud ».)*

### **Quatrième leçon**

*Professeur* : Ici, j'ai une brique. Combien d'entropie contient la brique ? Combien je peux en extraire ?

*Élève* : *(Pas de réponse)*.

*Professeur* : Avez-vous remarqué au moins que je viens de poser deux questions ?

*Élève* : Eh bien non. Ce n'était pas qu'une seule ?

*Professeur* : Je répète : combien d'entropie contient la brique ? Combien je peux en extraire ?

*Élève* : Mais c'est la même chose. S'il y a une certaine quantité dedans, je peux extraire cette même quantité. Si une bouteille contient un litre d'eau-de-vie, je peux en boire un litre.

*Professeur* : Dans ce cas-là, tu as raison. Mais je connais des situations où je peux faire sortir plus d'un système que ce qu'il y a dedans.

Élève : Ah oui ! Mon compte en banque. Je viens de le mettre à découvert. Alors, j'ai touché plus d'argent que ce qu'il y avait sur le compte.

Professeur : Et voilà ! Sur ton compte, il y a maintenant de l'argent négatif. Mais peut-être pouvez-vous me donner des exemples qui viennent plus du domaine de la physique.

*(Les élèves proposent la charge électrique et la quantité de mouvement. On discute ces exemples.)*

Professeur : Revenons maintenant sur l'entropie. Vous voyez que c'était effectivement deux questions différentes, que j'avais posées. Mais quelles sont les réponses ?

*(Les élèves ne le savent pas.)*

Comment pourrait-on trouver la réponse ?

Élève : On devrait l'essayer.

Professeur : Et comment ?

Élève : On extrait de l'entropie avec une pompe à chaleur, et on verra.

Professeur : Très bien, c'est ce qu'il faudrait faire. Malheureusement, avec les moyens dont nous disposons, nous ne pouvons pas le faire ici dans la salle de classe. La pompe à chaleur dont on aurait besoin serait bien trop chère.

Mais je vais vous raconter comment les chercheurs physiciens ont trouvé la réponse dans le passé. Ils ont essayé avec tous les moyens d'atteindre des températures de plus en plus basses en construisant des pompes à chaleur toujours mieux, plus efficaces et plus chères que les précédentes. De cette manière, on atteignait des températures de plus en plus basses, jusqu'à arriver à liquéfier l'air, l'hydrogène et, finalement l'hélium. Mais les chercheurs ont dû se rendre compte, que bien que leurs pompes à chaleur étaient objectivement plus performantes que les précédentes, il devenait de plus en plus difficile d'atteindre des températures plus basses et on n'arrivait pas à des températures en-dessous de  $-273\text{ °C}$ . Vous pouvez m'expliquer la raison ?

Élève : Il n'y avait plus rien à pomper.

Professeur : Alors, si on avait employé la pompe pour sortir de l'entropie de notre brique ?

Élève : Il n'y aurait plus d'entropie dans la brique.

Professeur : Exact. Alors, on peut en déduire que, à  $-273\text{ °C}$ , un corps quelconque ne contient plus d'entropie. Et en plus : puisqu'on ne peut pas baisser la température en-dessous de moins  $273\text{ °C}$ , il ne peut pas exister de l'entropie négative.

*(On discute qu'il est logique de prendre cette température minimum comme nouvelle origine de l'échelle de la température et on introduit la température absolue.)*

*(Au tableau : « La température la plus basse qu'un corps peut atteindre est de  $-273,15\text{ °C}$ . À cette température il ne contient plus d'entropie ».)*

## Cinquième leçon

Professeur : On veut chauffer une pièce. Nous savons, ce que ça signifie : on doit s'efforcer d'augmenter le contenu d'entropie de la pièce. Comment peut-on faire ?

Élève : Allumer le chauffage.

Professeur : Et comment fonctionne le chauffage ?

*(On discute le fonctionnement du chauffage central.).*

D'où vient donc l'entropie qui sort des radiateurs ?

Élève : De l'eau qui passe par le radiateur.

Professeur : Et comment est-elle arrivée à l'eau ?

Élève : Dans la chaudière.

Professeur : Et d'où vient-elle dans la chaudière ?

Élève : De la flamme.

Professeur : Et comment est-elle entrée dans la flamme ?

Élève : Elle n'est pas entrée dans la flamme, elle y a été produite.

*(Dans cette partie du dialogue, on se rend compte que les élèves ont la préconception correcte, que l'entropie - la « chaleur » du langage courant - est créée dans une flamme.).*

Professeur : Juste. Alors, on aurait pu chauffer la pièce d'une autre manière, avec un chauffage électrique par exemple.

*(On trouve que, dans ce cas, l'entropie vient de la résistante chauffante dans le radiateur électrique.*

*Enfinement, on discute de la création d'entropie par frottement mécanique.).*

Professeur : Maintenant un autre problème : on ne veut pas chauffer quelque chose, mais refroidir. Par exemple, j'ai un verre de thé et il est trop chaud, il contient trop d'entropie. Je veux qu'il soit plus froid. Qu'est-ce que je peux faire ?

Élève : Il faut attendre.

Professeur : Oui. Et que se passe-t-il alors avec l'entropie ?

Élève : Elle va dans les environs, dans la pièce.

Professeur : Mais la pièce ne devient pas plus chaude.

Élève : Si, elle devient plus chaude. Mais on ne s'en rend pas compte, parce qu'elle est si grande et le verre avec le thé est si petit.

Professeur : Peut-on refroidir le thé encore d'une autre manière ?

Élève : On pourrait le mettre au frigo.

Professeur : Et dans ce cas-là, où va l'entropie ?

Élève : Elle sort par derrière.

*(Le professeur a essayé d'amener les élèves sur une fausse piste, mais il n'y est pas arrivé. Il devient donc plus direct.)*

Professeur : Vous m'avez dit, qu'on peut produire de l'entropie. C'est-à-dire, il y a de l'entropie qui est générée et qui ne vient pas d'un autre endroit. Ne pourrions-nous pas nous débarrasser de l'entropie de manière analogue : la faire disparaître pour de bon. Avec les deux possibilités pour refroidir le thé, que vous avez proposées, l'entropie qu'on enlève du thé apparaît ensuite à un autre endroit.

Élève : Non, ça ne va pas.

Professeur : Et pourquoi ?

Élève : Parce que.

*(Dans cette partie du dialogue se manifeste que les élèves, comme d'ailleurs n'importe quelle personne sans instruction scientifique, ont une idée assez claire du deuxième principe de la thermodynamique, et ceci dû à leurs expériences quotidiennes.)*

Professeur : Nous venons de découvrir une loi, qui est considérée comme une des lois les plus fondamentales de la science. Elle dit que l'entropie peut être produite, mais non pas anéantie.

*(Pour le moment, les élèves ne trouvent pas ce résultat très excitant.)*

Les chercheurs avaient trouvé cette loi tout à fait inouïe. Ils ont tout essayé pour montrer qu'elle n'est pas juste.

*(C'est seulement maintenant que les élèves commencent à réfléchir.)*

Élève : Ah oui, si c'est vrai, l'entropie de la terre devrait augmenter de plus en plus. C'est l'effet de serre !

*(On discute de l'effet de serre et on trouve qu'il n'a rien avoir avec la production de l'entropie. On se trouve plutôt devant un problème de la cosmologie moderne.)*

Professeur : La loi est aussi intéressante, parce qu'elle nous dit que le temps ne peut pas aller à l'envers. Si, dans un processus, de l'entropie est créée, ce processus ne peut pas aller à l'envers, parce que cela signifierait que l'entropie est anéantie, ce qui n'est pas permis selon notre loi.

*(On donne des exemples de processus réversibles et de processus irréversibles.)*

*(Au tableau :*

« De l'entropie se produit :

- lors d'une réaction chimique ;
- dans un fil qui est parcouru par un courant électrique ;
- par frottement mécanique ».

« L'entropie peut être produite, mais non pas anéantie ».

« Un processus dans lequel de l'entropie est produite, est irréversible »).

### 4.3. Commentaires

Comme nous l'avons déjà remarqué, ce dialogue, qui est fictif et typique à la fois, correspond à cinq leçons environ. Le lecteur a pu noter que dans cette petite séquence d'enseignement nous traitons le deuxième et le troisième principe de la thermodynamique.

Toute la thermodynamique du KPK comprend trente leçons environ. La partie la plus importante est consacrée à la relation entre les flux d'entropie et d'énergie. Ici se traitent les machines thermiques et leur rendement. Ensuite, nous discutons la thermodynamique des transitions de phase, et la thermodynamique des gaz et de la radiation.

## CONCLUSION

Nous revenons aux propos du début. Une reformulation des contenus de l'enseignement de la physique est nécessaire, parce que sa quantité augmente sans cesse. Le KPK est une proposition d'une telle reformulation et simplification. D'ailleurs, nous ne prétendons pas du tout que ce soit la seule solution du problème.

Nous avons essayé de montrer, qu'un cours de physique devient nettement plus concis et en même temps plus compréhensible, si on se base sur une analogie entre les divers domaines scientifiques. Cela signifie en particulier, qu'en mécanique on place la quantité de mouvement au centre du cours, et en thermodynamique l'entropie.

## REMERCIEMENTS

Je remercie Mme Miriam HECKMANN et M. Jean-François THIVENT d'avoir révisé la version française du texte de cet article.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] HERRMANN F. *Der Karlsruher Physikkurs*. Vol. 1, 2 et 3, et un livre pour le professeur, (en allemand), 6<sup>e</sup> édition, Köln : Aulis-Verlag, 2003.
- [2] HERRMANN F. The Karlsruhe Physics Course. *Eur. J. Phys.*, 2000, vol. 21, p. 49-58.
- [3] La version italienne peut être téléchargée sur le site :  
<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de>
- [4] HERRMANN F. et JOB G. The historical burden on scientific knowledge. *Eur. J. Phys.*, 1996, vol. 17, p. 159-163.
- [5] HERRMANN F. et JOB G. *Altlasten der Physik*. Köln : Aulis-Verlag, 2002. Ce livre consiste en soixante-quatre articles, chacun décrivant un « fardeau » différent.
- [6] FUCHS H. A surrealistic tale of electricity. *Am. J. Phys.*, 1986, vol. 54, p. 907-909.
- [7] BLACK J. *Lectures on the Elements of Chemistry*. Edinburg : J. Robinson, 1803.

- [8] FALK G. Entropy, a resurrection of caloric - a look at the history of thermodynamics. *Eur. J. Phys.*, 1985, vol. 6, p. 108-115.
- [9] CARNOT S. *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris : Librairie scientifique et technique, A. Blanchard, 1953.
- [10] CALLENDAR H. L. The caloric theory of heat and Carnot's principle. *Proc. Phys. Soc.*, 1911, vol. 23, p. 153-189.  
« Finally, in 1865 when its importance [the importance of caloric] was more fully recognised, Clausius gave it the name of 'entropy', and defined it as the integral of  $dQ/T$ . Such a definition appeals to the mathematician only. In justice to Carnot, it should be called caloric, and defined directly by his equation..., which any schoolboy could understand. Even the mathematician would gain by thinking of a caloric as a fluid, like electricity, capable of being generated by friction or other irreversible processes ».
- [11] JOB G. *Neudarstellung der Wärmelehre - die Entropie als Wärme*. Frankfurt : Akademische Verlagsgesellschaft, 1972.



Friedrich HERRMANN

Directeur  
du département de didactique de la physique  
Université Karlsruhe (Allemagne)