

## Énergie et temps en première S

*Se laisser emporter par le flux du temps ou le regarder passer...*

par J. GRÉA

Professeur des Universités

IUFM Lyon - Université Lyon 1 - Directeur du LIRDHiST

et G. BISSUEL

Professeur au Lycée Lumière

Lyon 8 - INRP & LIRDHiST

LIRDHiST (Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche  
en Didactique et en Histoire des Sciences et des Techniques)

Université Claude Bernard - Lyon 1 - Bât 711 -

43, boulevard du 11 Novembre 1918 - 69622 Villeurbanne Cedex

---

### RÉSUMÉ

*L'enseignement de l'Énergie en première S est justifié dans les programmes officiels par son aspect thématique. Le problème de la pertinence de l'enseignement de la physique se trouve alors mis en jeu. Dans cet article, nous ne nous placerons pas du côté de l'élève, c'est-à-dire du côté de l'apprentissage, mais du côté du professeur, c'est-à-dire du côté de l'enseignement et de ses références à la physique. Nous nous limiterons donc à l'analyse du contenu physique à enseigner tel qu'il est prescrit par les directives officielles. Cette analyse nous amènera à nous intéresser particulièrement aux relations entre l'énergie et le temps dans le contexte de la physique enseignée. Nous concluons cette étude par une proposition de contenu d'enseignement.*

### 1. LES DIRECTIVES D'ENSEIGNEMENT EN PREMIÈRE S [1]

On demande aux professeurs de produire un enseignement de l'énergie qui transforme les notions appréhendées par les élèves dans les classes précédentes en concepts intégrés dans une structure théorique acceptable du point de vue de la physique. A ce niveau d'enseignement, les concepts principaux sont ceux de conservation, de conversion et de transfert de l'énergie : «Le principe de conservation d'un système isolé est le point de départ de toute analyse. Le système isolé est constitué de sous-systèmes dont l'énergie totale varie au travers des différents échanges (transferts)" ([1], p. 41) et «A l'exception du condensateur chargé (...) dans lequel

l'énergie électrique est sous forme potentielle, "L'énergie électrique" se manifeste sous forme **de transfert de puissance** électrique, le rôle du générateur étant celui d'un convertisseur chimique (pile et accumulateurs), (...)» ([1], p. 42).

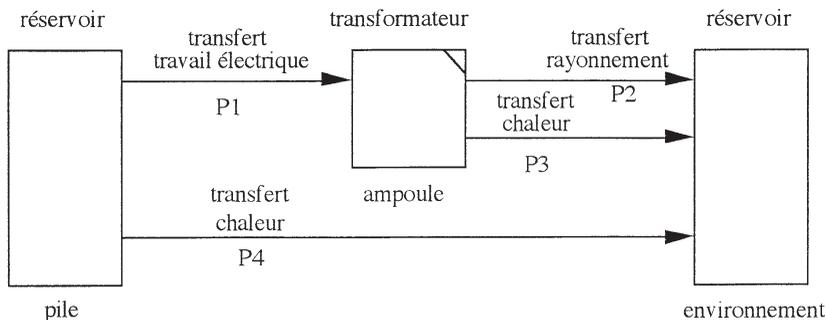
Dans ce projet, la mise en relation du «monde théorique» et du «monde matériel» sous forme de flux et de bilans énergétiques engage à prendre en compte «les idées» des élèves sur l'énergie pour les amener à unifier leurs points de vue sur les différents domaines de la physique ou de la chimie : «L'analyse des chaînes énergétiques, et leur présentation sous forme d'un schéma conventionnel, est exploitée à chaque occasion possible de l'année» ... «Pour assurer une cohérence d'ensemble (...) on a fait le choix de développer le raisonnement en bilans énergétiques (...)» ([1], p. 41).

## 2. ANALYSE D'UNE CHAÎNE ÉNERGÉTIQUE DÉJÀ PROPOSÉE

### *Problématique*

Une façon d'analyser le contenu physique enseigné à partir de la construction des chaînes énergétiques, est présentée dans un document diffusé par la MAFPEN [2]. Ce document, mis à la disposition des professeurs au cours d'un stage de formation à «l'enseignement de l'Énergie en classe de première», propose la mise en œuvre d'une «chaîne énergétique» dont la pertinence physique nous semble problématique.

La construction de cette chaîne est présentée comme la mise en relation des règles d'un «modèle énergétique»<sup>1</sup> avec «l'expérience». Cette mise en relation est traduite graphiquement (figure 1) par la construction d'un diagramme constitué de rectangles qui représentent les réservoirs et les transformateurs d'énergie (un trait différencie les réservoirs d'énergie des transformateurs d'énergie), et de traits fléchés entre les réservoirs et les transformateurs pour représenter les transferts d'énergie.



**Figure 1 :** Chaîne énergétique «pile-ampoule».

Cette représentation servira d'exemple pour notre analyse. La construction de la chaîne «pile-ampoule pendant l'éclairage» telle qu'elle est présentée par les auteurs du document cité est prototypique. Le but visé par cette situation est d'interpréter l'usure de la pile pour l'élève ([2], partie A, p. 2).

Dans cet article, nous limiterons notre analyse aux relations entre l'énergie et le temps.

Dans ce contexte, et aux niveaux de la description des événements et des objets, l'évocation de l'usure de la pile se fait à partir de deux observations réalisées à des instants  $t_1$  et  $t_2$  concernant la luminance du filament de la lampe (on donne aux élèves un montage pile-ampoule avec une pile neuve, puis avec une pile usée). L'usure de la pile est inférée de la variation d'éclat de l'ampoule interprétée comme traduisant un nouvel état de la pile : celui de pile usée.

Au niveau de la description par un modèle énergétique et de sa représentation graphique :

- La représentation graphique «rectangle = réservoir d'énergie» exprime la mise en relation de l'état d'usure de la pile et de l'état de stockage en énergie. Cette relation est la traduction de la règle du modèle : «le réservoir stocke l'énergie». On est donc bien dans le cadre d'une description instantanée du système en termes d'état de stockage en énergie du réservoir-pile. Il en est de même pour la description du réservoir-environnement qui termine la chaîne.
- La représentation graphique «flèche = transfert d'énergie» exprime différentes mises en relation suivant le «mode de transfert» envisagé : travail, chaleur, rayonnement.
  - Pour le mode de transfert «travail électrique», elle exprime la mise en relation de l'existence d'un courant de charges dans les fils et du «travail» qui traduit l'existence de forces et de déplacements. Remarquons qu'en physique, tout déplacement dynamique s'inscrit dans la durée<sup>2</sup>. C'est donc une variation dans le temps d'états associés aux positions des charges.
  - Nous pouvons faire une analyse identique pour le mode de transfert «chaleur» qui est souvent associé à une variation temporelle d'état de température du système.
  - Le rayonnement, quant à lui, est un mode de transfert qui implique une propagation et, dans le contexte de ce document, une interaction donc une durée. Nous examinerons plus attentivement son statut un peu plus loin (Voir § 4.2).

Dans la suite du document ([2], partie A, & 1.5. p. 2), une nouvelle notion, celle de puissance, est introduite et placée, dans le graphique de la chaîne, au niveau des

transferts d'énergie ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ , figure 1). La puissance est alors définie comme le taux de variation d'énergie par unité de temps. Elle s'inscrit également dans la durée.

Le temps est donc implicitement présent dans cette chaîne énergétique **sous deux formes exclusives l'une de l'autre** : celle de la durée et celle de l'instant. Il en résulte que le principal obstacle que comporte cette représentation des propriétés physiques de l'énergie d'un système est celui de la prise en compte des relations entre l'énergie et le temps.

Ce problème est en fait bien plus général et est bien connu des physiciens qui sont confrontés au statut problématique du temps et de sa relation à l'énergie. Il se traduit de façon exemplaire par une des inégalités de Heisenberg (en mécanique quantique) ou par l'inégalité de Gabor (traitement du signal)<sup>3</sup>.

### 3. SE LAISSER EMPORTER PAR LE FLUX DU TEMPS OU LE REGARDER PASSER

La difficulté pour appréhender les relations énergie-temps que nous venons de rappeler nous semble être de même nature que celle que l'on rencontre dans le problème de la représentation de l'évolution d'un système physique et sa traduction en relations entre les variables d'état du système et le temps.

Par exemple, dans le cas particulier du mouvement d'un solide, une alternative se présente au physicien pour décrire l'évolution du système :

Une première solution consiste à résoudre le problème de la description de la mobilité en termes d'instants et de positions. Par exemple, dans le cas du mouvement d'un objet, nous dirons qu'il était là à  $t_1$ , puis qu'il est ici à  $t_2$ . Le mouvement est alors induit à partir de la variation des états de position de l'objet. De l'immobilité naît alors le mouvement. C'est ce choix de perception du mouvement que fait G. Bachelard<sup>4</sup>. C'est ce même choix que fait Zénon et l'école d'Élée qui, à la suite des difficultés rencontrées dans des situations de comparaison (Achille et sa tortue) les avait amenés à trancher le débat au point de refuser l'idée même de mouvement. Une telle analyse du mouvement, que critique H. Bergson, relève «d'un mécanisme cinématographique» [5] de la perception. C'est ce mécanisme qui fonctionne lorsque nous choisissons d'enseigner l'énergie en termes d'états énergétiques à des instants différents. D'une manière métaphorique, l'observateur se place à l'extérieur d'un flux temporel dont il ne saisit que des événements particuliers à différents instants. On a l'habitude de décrire alors le système par des formes d'énergie. Les conversions d'énergie sont induites par les variations de quantités de ces différentes formes d'énergie attribuées au système et correspondant aux différents instants. Cela revient à décrire un système en lui attribuant une énergie représentée par un nombre qui ne correspond à aucune

référence absolue. On peut ainsi attribuer, suivant la référence choisie, la valeur zéro à la quantité d'énergie d'un système à l'instant  $t_0$ .

Une autre possibilité pour résoudre le problème de la description de la mobilité d'un objet est celle de la voir comme un continuum d'écoulement<sup>5</sup>. Il est alors insensé de vouloir saisir l'objet à l'arrêt. Il ne peut être décrit que par son état de mouvement. On rejoint alors Héraclite et l'école d'Agrigente pour qui l'immobilité n'est qu'apparence et illusion. L'univers est alors un «tout» plein en éternelle transformation «Il est impossible de se baigner deux fois dans le même fleuve». D'une manière métaphorique, l'observateur se laisse emporter par le flux du temps et participe alors aux événements. C'est cette forme de la pensée qui fonctionne lorsque nous enseignons les conversions d'énergie. Le dispositif de Joule convertit (dans le temps) du travail en chaleur. Une lampe convertit du travail électrique en travail électromagnétique (appelé rayonnement dans les programmes) et en chaleur. Nous sommes alors au niveau des transferts, de la durée. Dans le cas particulier des phénomènes stationnaires nous pourrions alors penser en termes de puissance constante. La présence de ces échanges est la condition nécessaire pour que la mesure des grandeurs physiques et une description quantitative du système soient possibles.

#### 4. NOTRE PROPOSITION DE CONTENU D'ENSEIGNEMENT

##### 4.1. Notre analyse

L'étude précédente montre que la pensée physique aussi bien dans sa construction que dans son enseignement investit à la fois une représentation des systèmes dans la durée et dans l'instant.

Si nous ignorons les aspects liés aux qualités de flux du temps qui passe pour nous arrêter à l'aspect événementiel, nous pensons alors en états, à des instants privilégiés et nous sommes conduits à identifier un système par la quantité d'énergie qu'on lui attribue et qui doit se conserver pour préserver son identité (physique). La représentation symbolique qui exprime ce choix doit permettre d'exprimer la correspondance entre la théorie énergétique visée et le monde matériel du système étudié<sup>6</sup>. Cette correspondance relève de la modélisation du système. **On est au niveau de la description des événements<sup>7</sup>.**

Si nous choisissons d'entrer en conscience dans le flux temporel des événements, nous sommes conduits à penser alors en termes de transferts, de conversions, de transformations. Nous pouvons, pour les décrire, introduire des observables pour le système qui en mesurent les quantités. La représentation symbolique dans ce cas est construite pour traduire la correspondance entre ces transferts et les relations

temporelles entre les états. Ces symboles entrent dans les termes des lois physiques choisies pour régir ces processus en référence au système étudié. Cette correspondance relève du modèle du système. **On est au niveau de la description des phénomènes.**

Dans le cas particulier de notre système «pile-ampoule» et pour prendre en compte cette alternative, nous avons proposé aux élèves, dans un premier temps de l'apprentissage de l'énergie, deux représentations symboliques (non mathématiques), que nous illustrons, dans ce document, à partir d'une situation matérielle singulière que nous appelons «lampe truquée».

## 4.2. Notre proposition

### 4.2.1. Pour la situation matérielle

Afin d'éviter une évocation provoquée de l'usure de la pile, nous avons remplacé la pile d'une lampe de poche par un condensateur que les élèves peuvent recharger (de l'extérieur)... avec une pile. La durée d'éclairement de la lampe est alors de l'ordre de 15s. Nous présentons le condensateur aux élèves comme un «accumulateur spécial» qui sera objet d'étude en terminale. Les variations d'états d'éclairement sont alors immédiatement perceptibles par les élèves pendant la séance d'enseignement.

### 4.2.2. Pour le contenu d'enseignement

#### *a - Description en termes d'états du système*

Nos travaux [6] en cours montrent que la plupart des élèves mettent spontanément en acte un «mécanisme cinématographique» de la perception. Ceci nous a amené, pour commencer l'enseignement, à choisir le cadre théorique des états énergétiques d'un système. Ainsi, dans le cas du montage accumulateur-lampe, nous avons été amenés à construire le système «Accumulateur-filament- fils-environnement-espace» (figure 2).

Le flux du temps qui trame le fond de ce tableau fournit le repère des instants auxquels ont lieux les événements représentés. Le flux du temps est évoqué par une flèche entre les éléments du graphique associés aux états instantanés décrits.

Les instants choisis correspondent aux événements suivants :

- à  $t_0$  : le dispositif est prêt (on a chargé le condensateur et le circuit est ouvert),
- à  $t_1$  : on a fermé l'interrupteur et on observe que la lampe éclaire normalement,
- à  $t_2$  : la lampe éclaire toujours normalement une seconde plus tard ( $t_2 = t_1 + 1$ ),
- à  $t_3$  : la lampe n'éclaire plus.

Dans ce contexte, nous décidons de représenter le système aux différents instants par un même rectangle. L'aire du rectangle représente le «capital» d'énergie qui est

attribué au système lors de sa préparation. Dans le cadre théorique de la conservation de l'énergie, et pour cette représentation, l'aire du rectangle doit donc rester constante. Pour réaliser cette condition, et au fur et à mesure que de nouvelles formes d'énergie seront prises en compte pour conserver l'identité du système aux différents instants, nous faisons évoluer la description du système en le décomposant en sous-systèmes (c'est ainsi qu'historiquement le concept d'énergie s'est construit comme invariant des transformations dans le temps du système et dialectiquement avec la définition d'un système isolé). C'est en effet une véritable dialectique qui conduira à la construction de la description du système isolé en évolution. Il est donc plus pertinent de parler de la construction du système étudié que du choix a priori du système. C'est une difficulté qu'on rencontre très tôt dans l'enseignement de la physique.

Pour expliciter la façon dont nous avons construit le diagramme de la figure 2, nous proposons une approche théorique simplifiée de la description des processus physiques intervenant dans l'évolution du système étudié. Nous ne conservons que trois concepts théoriques qui relèvent de l'enseignement visé au lycée pour décrire les états du point de vue de l'énergie. Nous partons de la proposition que seules trois «formes» sont associées à la description des états des systèmes isolés en termes d'énergie. L'énergie potentielle et l'énergie cinétique et la densité d'énergie du champ électromagnétique. Ces formes pourront servir aussi bien à une description du système par un modèle particulaire que par un modèle de champ. C'est ainsi que nous décrirons, par exemple, un ion en termes d'énergie potentielle et cinétique, un espace lumineux (corps noir) ou sonore (résonateur) en termes de densités d'énergie et de leurs variations. Bien sûr, cette description, pour être complète, suppose souvent une descente dans une décomposition microscopique de plus en plus fine des interactions dont le traitement formel est hors de portée de l'élève (mais pas de l'enseignant). Nous montrerons cependant que l'on peut se limiter à une description macroscopique qui est qualitativement accessible à l'élève en particulier si nous nous limitons à la description mécanique, électrique et électromagnétique des systèmes «simples» (!) proposés dans l'enseignement. Dans ces cas, la forme potentielle de l'énergie est souvent liée à l'état «déformé» des sous-systèmes en particulier en mécanique, la forme cinétique à l'état de mouvement et la forme densité d'énergie à l'état d'éclairement ou de bruit.

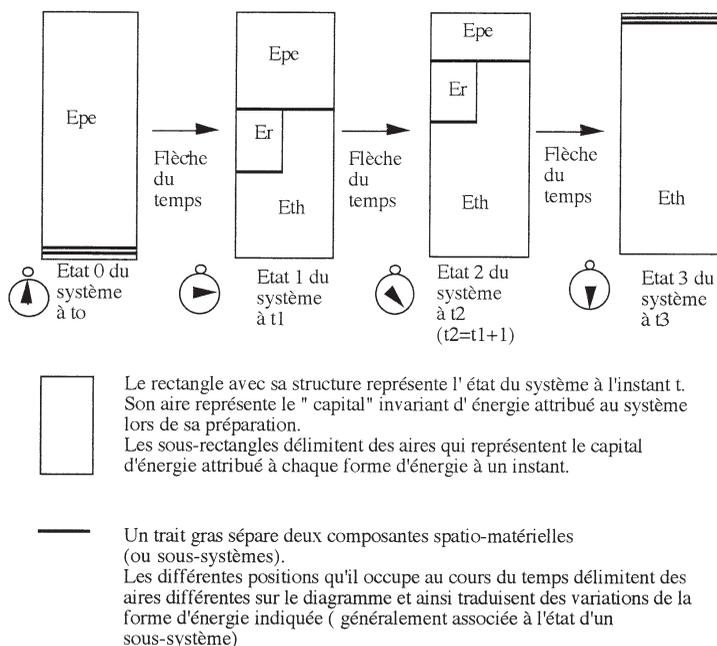
Ainsi au temps zéro de l'analyse physique de notre système, du point de vue électrique<sup>8</sup>, nous considérons ce qui a été «préparé». L'état est décrit par le premier rectangle dont on choisit de dire qu'il représente son énergie potentielle électrique. Une explication en termes de déformation et d'interaction consisterait alors à dire que l'énergie potentielle ( $E_{pe}$ ) d'un système élémentaire constitué de deux charges électriques est associée à la distance entre ces deux particules chargées. Nous aurons aussi à faire à l'état «éclairé» de l'ampoule et de l'espace. La description

théorique actuelle (thermodynamique du rayonnement [7]) est évidemment exclue pour l'élève. Nous pouvons la simplifier en proposant à l'enseignant d'assimiler une portion d'espace fermée à un «gaz de photons». L'avantage de ce modèle est qu'il homogénéise les catégories de concepts physiques en jeu pour la description de notre système. En effet, il nous faudra, aussi, faire intervenir «l'environnement» thermique. Il se trouve que le concept d'énergie libre fonctionne alors correctement aussi bien pour décrire **l'état d'énergie (Er)** du gaz de photons que **l'état d'énergie (Eth)** du gaz parfait composant «l'environnement» de notre système<sup>9</sup>. On peut remarquer que ces deux descriptions relèvent de la forme «énergie cinétique» dont nous avons parlé plus haut. En particulier, l'énergie cinétique désordonnée des particules du gaz, à partir de laquelle on définit sa température (variable d'état), permet d'exprimer simplement son énergie interne. Il en est de même pour le gaz de photons dont la description a été la source de débats qui ont conduit à la loi de Planck et à la physique moderne. Remarquons que dans ces deux modèles, celui du corps noir et celui du gaz parfait, les éléments n'interagissent pas entre eux mais uniquement avec les parois, ce qui permet de décrire les échanges avec l'extérieur que nous utiliserons ci-après. On peut utilement se limiter à la seule notion de Température de rayonnement pour présenter une description de «l'état d'éclairage» des parois limitant notre portion d'espace ou notre filament d'ampoule, qu'elles soient éclairées ou éclairantes. D'autres simplifications, pour satisfaire à l'enseignement effectif, sont données par ailleurs. Ici, nous décrivons le cadre dans lequel une certaine cohérence peut être donnée à cet enseignement de l'énergie pour le professeur.

### *b - Description en termes de transformation du système*

Bien entendu, quand nous passons à la description de notre système dans la durée, c'est-à-dire à la description physique de son évolution, nous sommes contraints, par cohérence avec les approximations choisies pour décrire les états, à faire des choix liés à l'identité du système caractérisé par son capital initial d'énergie (quitte à redéfinir la composition du système si la description choisie ne permettait pas de satisfaire à cette condition dans le temps).

Les changements d'états, au cours du temps, se traduisent alors par des variations d'énergie de certaines parties du système (sous-systèmes). Chaque variation constatée pour un sous-système doit alors être associée à un phénomène (cf ci-dessous). La conservation de l'énergie totale implique alors la présence d'au moins deux sous-systèmes. Les deux (ou plus) sous-systèmes concernés sont séparés par un trait gras sur le diagramme de la figure 2. Pour expliquer ces variations, le physicien les associe à des phénomènes produits par des processus (modélisables ou théorisables) tels que, pour notre système, «l'émission de lumière par un corps chaud» (éclairage), «la production de chaleur par le frottement»<sup>10</sup> (l'échauffement), etc.



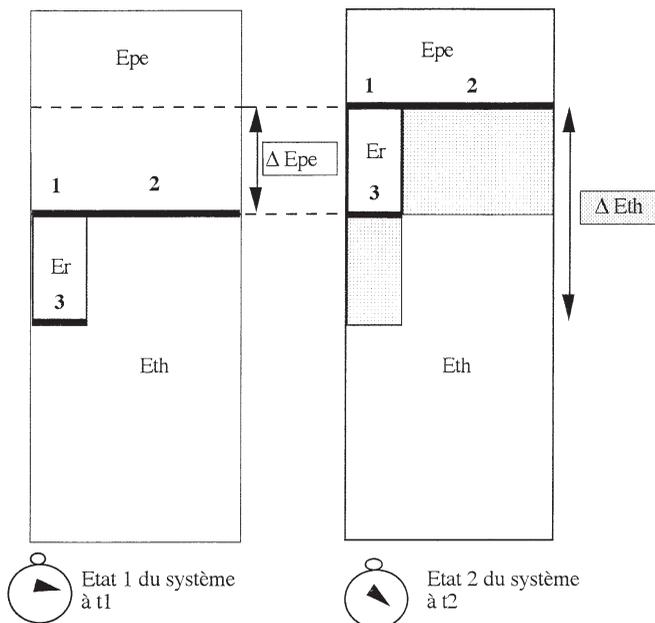
**Figure 2** : Représentation symbolique des états énergétiques du système «Accumulateur-filament-fils-environnement-espace».

On peut remarquer que nous avons, au nom de la physique, ignoré dans le système, le sous-système constitué par l'œil de l'expérimentateur qui est pourtant la raison majeure (et souvent proposée par les élèves) de la production d'un tel dispositif. «Une lampe, monsieur (madame), ça ne sert à éclairer que parce qu'on veut voir... !». L'introduction de l'œil a été faite dans notre séquence mais nous l'ignorons ici puisque nous voulons seulement montrer la validité de notre modèle en tant que description énergétique physiquement correcte d'un système physique.

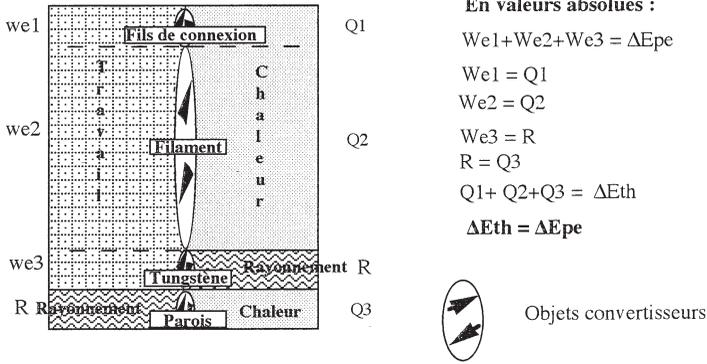
Si, au cours de l'évolution du système, les variations d'énergie associées ne sont pas de même nature (ce qui est généralement le cas) nous parlerons alors de «conversion» de ces variations. Elles nécessitent une représentation faisant intervenir explicitement la durée. Les objets, supports techniques de ces conversions, seront appelés convertisseurs d'énergie. Dans le cas où les processus mettent en œuvre des énergies transférées de même nature (par exemple les transmissions utilisant des poulies sans frottement), nous utilisons alors le terme de «transformation». Les objets sont alors des transformateurs d'énergie.

Au niveau de l'évolution du système, nous entrons maintenant dans une description qui fait implicitement intervenir des variations (quantitatives) d'énergie sous les formes attribuées aux sous-systèmes et **entre** les différents instants choisis.

Nous avons choisi entre les deux instants  $t_1$  et  $t_2$  une durée d'une seconde et la situation de régime stationnaire d'éclairement (figures 2 bis et 3).



**Figure 2 bis** : Reprise de deux éléments de la figure 2 à une plus grande échelle et mise en évidence des variations d'énergie associées.



Les surfaces tramées représentent les quantités d'énergie transférées (travail, chaleur, rayonnement) pendant la durée (t2-t1).

**Figure 3 :** Représentation des conversions d'énergie pendant une seconde (puissance) en régime stationnaire d'éclairage, pour notre système. (Le rapport entre les valeurs associées aux surfaces dans la figure 3 et la figure 2 bis est environ de 2).

Les processus associés à ces variations mettent nécessairement en œuvre des mécanismes de transformation (transformateurs) ou de conversion (convertisseurs) qui sont à l'origine de la théorie des phénomènes correspondants. Par exemple, le tungstène du filament est un convertisseur de la variation d'énergie potentielle électrique du générateur en variation d'énergie de rayonnement de l'environnement (conversion 1 de la figure 2 bis). Le phénomène associé est l'incandescence (théorie du rayonnement thermique et du corps noir). Le filament de la lampe est, comme les fils de connexion, un convertisseur de la variation d'énergie électrique du générateur en variation de l'énergie thermique de l'environnement (variation d'énergie libre du gaz parfait environnant) (conversion 2 de la figure 2 bis). Le phénomène associé est l'effet Joule qui peut être modélisé comme un frottement et une diffusion thermodynamique (théorie de la conduction électrique). Les parois (parfaites) sont des convertisseurs d'une variation d'énergie libre du gaz de photons en une variation d'énergie libre du gaz parfait environnant (conversion 3 de la figure 2 bis). Le phénomène associé est la luminance des matériaux et la théorie celle des «corps gris» (absorption-réémission, lois de Kirchoff, etc.).

C'est seulement à ce niveau de description temporelle, celui du système en évolution dans la durée, que nous pouvons introduire les concepts de chaleur, de travail et de rayonnement pour les échanges d'énergie. Cela ne nous semble pas possible physiquement si on se limite au niveau de la description instantanée du système en termes d'états.

En reprenant les termes recommandés par les instructions officielles, nous proposons donc les associations suivantes pour les variations d'énergie qui décrivent les conversions (ou transformations) en fonction des formes d'énergie concernées :

- la quantité de travail (ici électrique) est associée à la variation d'énergie potentielle (électrique) attribuée au sous-système pendant cette même durée,
- la quantité de travail (électromagnétique) est associée à la variation d'énergie (électromagnétique de rayonnement) du sous-système pendant cette durée,
- la quantité de chaleur est associée à la variation de la quantité d'énergie «thermique» attribuée aux sous-systèmes pendant la durée séparant les deux observations<sup>11</sup>.

Si nous considérons, dans notre situation de la «lampe truquée», le sous-système «air» de l'environnement atmosphérique (décrit par le modèle du gaz parfait), les conversions seront quantitativement décrites soit en considérant la modification du volume (effet de la pression) soit celle de l'état cinétique des constituants (température). Nous proposons de faire de même pour le gaz de photons. Nous pouvons contrôler son changement d'état soit par la modification de la distribution en fréquence traduisant l'équilibre thermique du couplage entre le champ et les parois (température), soit par la variation du volume de l'enceinte (pression de radiation). Pour les particules du gaz, ce sera soit la variation de l'énergie cinétique des particules qui sera significative (température) soit la variation du volume... de la pièce où se passe l'observation.

Pendant la durée  $T$  séparant deux observations, en régime stationnaire, la notion de puissance constante de transfert d'énergie est introduite tout naturellement. Un aspect particulier (et déroutant !) de notre dispositif est celui de la constance, à chaque instant, de la densité d'énergie de rayonnement («la lampe éclaire toujours pareil») des sous-systèmes «Tungstène du filament» «Parois». Elle est le résultat de deux conversions à puissances constantes égales (figure 3). C'est sans doute cet aspect caché qui a fait que les enseignants abandonnent l'analyse de cet exemple pour introduire la chaîne énergétique en première.

Enfin, nous pouvons remarquer que ces représentations ouvrent sur une étape possible de vérification qui met en œuvre la cohérence logique du choix de la décomposition en sous-systèmes pour décrire le système «physique». Les variations d'aires des rectangles de la figure 2 bis doivent être égales aux aires délimitées dans la figure 3 (l'aire attribuée au travail électrique de la figure 3 doit être égale à la différence des aires attribuées à l'énergie potentielle de la figure 2 bis. La variation des aires attribuées à l'énergie thermique doit être égale à la variation des aires attribuées à l'énergie potentielle de la figure 2 bis et à la somme des aires attribuées à la chaleur dans la figure 3). La vérification ne peut se faire qu'en régime stationnaire d'éclairage (c'est une façon correcte d'introduire le caractère stationnaire d'un processus).

La nécessité, pour valider cette description, d'introduire des grandeurs physiques c'est-à-dire mesurables<sup>12</sup> et donc des mesures et des instruments adaptés n'apparaît que dans la description en terme de durée, d'évolution, du système. La valeur de la quantité d'énergie attribuée théoriquement à une forme d'énergie d'un sous-système à l'instant  $t$  apparaît alors clairement comme arbitraire car elle dépend du choix de la référence pour  $t_0$ .

La puissance électrique dans une situation stationnaire est associée à la mesure de la variation d'énergie (travail-chaleur-rayonnement) transférée par seconde (il restera à généraliser ce concept pour les situations non stationnaires avec les mêmes difficultés que celles que l'on rencontre quand on veut passer du concept de vitesse uniforme à celui de vitesse instantanée). Le rendement du dispositif est, par exemple pour l'éclairage, le rapport entre les puissances électro-magnétique et électrique transférées.

Nous n'avons pas abordé, dans cet article, la mise en situation de l'enseignement de ce modèle didactique. Il sera décrit dans un prochain article.

Nous avons voulu montrer, par cette présentation, d'une part que l'analyse didactique d'un objet d'enseignement est une composante nécessaire de la rationalisation des situations d'enseignement (qui ne relève pas, pour nous, que de l'astuce ou des intuitions des enseignants mais peuvent être l'objet d'une science... humaine), d'autre part que cette analyse didactique ne peut se faire sans une constante référence à la physique (ce qui n'est évidemment pas suffisant pour réaliser l'enseignement).

## REMERCIEMENTS

Nous remercions particulièrement les élèves de la classe de première S3 (année 1995-1996) du Lycée Lumière qui ont coopéré volontiers lors de la mise en place de cet enseignement hors de leur strict programme scolaire.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Nous nous référons au Bulletin Officiel du ministère de l'Éducation Nationale : «*Nouveaux programmes des classes de seconde, première et terminale des lycées*» - Tome II - Numéro hors-série du 24 septembre 1992.
- [2] «*Enseignement de l'Énergie en première S*» - Cours et compléments didactiques. Groupe d'enseignants de Sciences physiques et de chercheurs en didactique des sciences physiques - Version 0 Document Énergie première S COAST MAFFPEN - Novembre 1995.
- [3] J.-M. LEVY-LEBLOND : «*Les inégalités d'Heisenberg*» - Société Française de Physique - Revue de la SFP n° 14, 1973, p. 15;
- [4] B. ESCUDIE et J. GRÉA : «*Sur une représentation générale en temps et en fréquence dans l'analyse des signaux d'énergie finie*» - CRAS, vol. 243, p. 1049.
- [5] H. BERGSON : «*L'évolution créatrice*» - 1941 - Quadrige / PUF.
- [6] G. BISSUEL et J. GRÉA : «*La nature et le rôle de l'activité symbolique des élèves dans l'apprentissage du concept Énergie*» - 6<sup>th</sup> European Conference for Research on Learning and Instruction - Août 1995 - Université de Nimègue - Département des Sciences de l'Éducation.
- [7] Roger BALIAN : «*Cours de physique statistique*» - Chapitre 12 - Tome 2 - Éditions Ellipses, 1982.

## NOTES

1. Ce modèle exprime qu'un réservoir stocke l'énergie, un transformateur transforme l'énergie. Entre un réservoir et un transformateur il y a possibilité d'un transfert de l'énergie suivant trois modes : travail, chaleur, rayonnement. Une chaîne commence et se termine par un réservoir
2. Il faut remarquer que l'expression du travail la plus correcte, à ce niveau, est celle qui fait intervenir explicitement la durée :  $dW = F.v.dt$ .
3. On retrouve aussi cet aspect des choses lors de l'alternative de choix pour la description temporelle d'un système quantique. La description de Schrödinger et de Heisenberg traduisent respectivement ces deux formes pour le temps. Pour une présentation de ce problème on peut se référer à [3] et [4].
4. Dans «*La dialectique de la durée*» - PUF (1933), G. BACHELARD pense que le temps est une superposition d'instants ; que notre conscience analyse des instants et imagine le remplissage.
5. C'est la position de H. BERGSON.
6. Elle doit manifester la qualité des énergies attribuées à chaque instant aux composantes du système dont le cumul doit satisfaire la condition de conservation rappelée.
7. La différence entre événements et phénomènes est, à notre avis, tout à fait fondamentale en physique (et plus généralement dans toute perspective scientifique). Cette distinction est longuement précisée dans le cours d'épistémologie de DEA de didactique de Lyon-Grenoble. Pour résumer, nous dirons qu'un événement est ce que l'observateur repère, en termes de changement d'état d'un système, sans pour autant être capable de l'interpréter autrement que globalement (nous dirons empiriquement). Lorsque ce même observateur (que ce soit un individu ou un groupe) décide d'associer plusieurs événements en vue de les maîtriser (en compréhension et en prédiction, c'est-à-dire de les «scientifiser») il définit un phénomène.  
Exemple, l'occurrence d'un objet céleste inconnu est un événement (souvent interprété comme signe divin). Décider d'organiser ces événements pour maîtriser le temps social ou définir un temps scientifique passe par l'étude des phénomènes célestes et, en premier, de leur classification (ce qui est une première démarche théorique d'interprétation) puis... (voir alors l'histoire des sciences).  
En ce qui concerne une distinction encore plus fondamentale en physique, celle entre modèle et modélisation, elle est aussi enseignée en DEA et a été présentée au Séminaire National de didactique de la physique - Toulouse 1993. p. 1-12 «*Modèle, niveaux de formulation et explication*». Un document de synthèse est disponible au LIRDHiST. Ces deux distinctions, liées dans le contexte de notre étude sont théoriquement totalement indépendantes.

8. Une analyse du point de vue physico-chimique conduirait, bien sûr, à une description plus fine.
9. Pour les élèves, nous pouvons décrire l'état d'énergie du sous-système «espace éclairé» par «l'énergie lumineuse», c'est-à-dire par la capacité de l'espace à rendre les objets lumineux. De même, l'état du sous-système «environnement» sera décrit par «l'énergie de température» que l'on relie à la vitesse désordonnée des molécules à l'échelle microscopique.
10. On rappelle que, dans l'analogie oscillations mécaniques-oscillations électriques dans un mode alternatif, la résistance électrique est associée au coefficient de frottement fluide du système oscillant.
11. En particulier, la quantité de chaleur d'origine électromagnétique reçue par le sous-système «air» de l'environnement au cours du temps peut s'exprimer par  $dtE = \text{Tr} (dt\mathbf{D} \cdot \mathbf{H})$  où  $d_t\mathbf{D}$  est la différentielle temporelle de la matrice densité de ce sous-système et  $\mathbf{H}$  l'opérateur hamiltonien qui exprime l'interaction.
12. Nous distinguons les observables physiques, qui sont (typiquement en mécanique quantique) les variables fondamentales de la théorie, des grandeurs physiques qui sont, en général, une fonction de ces observables associées à un instrument de mesure.