

COMPTES RENDUS D'INNOVATIONS

Approche des phénomènes de conduction-convection dans le cadre des Olympiades de Physique

Dominique SACÉPÉ

Lycée J. Haag
1 rue Labbé
25000 Besançon, France.

Résumé

La participation aux Olympiades de Physique a permis à un groupe d'élèves de terminales STL (Sciences et Techniques de Laboratoire) option Optique de découvrir un domaine de la physique qui leur était peu familier : il s'agit de la thermique. Pour aborder ce domaine ils ont dû se fabriquer des images mentales, pour progresser ils ont choisi d'utiliser la démarche expérimentale la plus rigoureuse possible. C'est cette petite aventure qui est racontée dans les pages qui suivent.

Mots clés : projet, observation, initiative, culture scientifique, esprit d'équipe.

Abstract

The Physics Olympiads recently gave a group of pupils at the end of upper secondary school (17-18 year old), specialising in technological subjects the opportunity to discover «Thermics», a branch of physics so far unknown to them. To deal with this new domain, the students had to form mental images to adjust to this unfamiliar field whilst using an experimental approach that was as rigorous as possible. We present this adventure in the following pages.

Key words : *project, observation, initiative, scientific knowledge, team spirit.*

Resumen

La participación en las Olimpiadas de Física permitió a un grupo de alumnos de terminal (último año de la educación secundaria en Francia) opción óptica, de descubrir un dominio de la física que les era poco familiar : se trata de la térmica. Para abordar este dominio ellos tuvieron que fabricarse ideas mentales ; para progresar ellos seleccionaron la utilización de métodos experimentales rigurosos. Es esta pequeña aventura la que es narrada en las páginas que siguen.

Palabras claves : *proyecto, observación, iniciativa, cultura científica, espíritu de equipo.*

1. LE CONCOURS DES OLYMPIADES DE PHYSIQUE

La Société Française de Physique et l'Union des Physiciens organisent, depuis l'année 1991-1992, un concours s'adressant aux lycéens des classes de première et terminale. Ce concours inter-régional, baptisé «Olympiades de Physique», récompense au niveau régional, puis national, des projets expérimentaux de physique réalisés par des équipes de quatre à six élèves. Elles sont encadrées par un enseignant et associées à différents partenaires, chercheurs, ingénieurs, extérieurs aux établissements scolaires (voir Le Quéau, 1993).

1.1. Ses objectifs

Les Olympiades de Physique ont l'ambition d'atteindre plusieurs objectifs :

- valoriser la physique et, plus généralement, la culture scientifique et technique,
- développer, chez les jeunes, l'esprit de la recherche et le goût d'activités impliquant travail de groupe, négociation avec les partenaires, réflexion et expérimentation,
- participer à la formation continue des enseignants, en leur offrant la possibilité de valoriser leurs compétences pédagogiques au sein de projets permettant de développer leur autonomie et leur ouverture vers le monde scientifique et technique,

– contribuer à dynamiser les lycées par des actions susceptibles de rentrer dans les projets d'établissement, sous la coordination de leurs responsables,

– impliquer davantage les acteurs économiques et les collectivités territoriales dans des activités de formation dont ils sont à long terme bénéficiaires.

1.2. Sa préparation

Dès le début de leur année de première, les groupes de candidats se mettent en place : ils ont à choisir des partenaires et à se déterminer, conseils et bibliographie à l'appui, pour un «sujet de recherche», fondamental ou appliqué. Ce travail d'équipe se déroule en partie dans les locaux scolaires, en partie dans le laboratoire ou l'entreprise acceptant d'intervenir dans le projet. Outre une réalisation matérielle (dispositif de laboratoire, banc de mesure...), il implique exploration, prise de contacts, sensibilisation du monde extérieur au projet choisi, activités qui font partie intégrante du vrai travail scientifique, quel que soit son lieu de réalisation.

1.3. Ses soutiens et ses partenaires

Au plan national, les Olympiades de Physique ont pour partenaires EDF (Électricité de France) et le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique). Elles bénéficient également du soutien financier du Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Elles sont placées sous le haut patronage de Monsieur le Ministre de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

1.4. Sa présentation

Arrivé à son terme, le résultat de ce travail est présenté devant un jury, au cours du premier trimestre de terminale, sous la forme d'un exposé documenté. Maîtrise du sujet, rigueur de la démarche adoptée, élégance, simplicité et intérêt du dispositif ou de l'expérience réalisée, imagination et sens de l'initiative, tels seront les critères retenus pour distinguer les meilleures équipes, au niveau régional comme au niveau national. Des qualités que ne valorisent pas toujours les évaluations scolaires classiques mais dont la reconnaissance peut aider à l'éveil de vocations.

2. HISTOIRE D'UN PROJET PRÉSENTÉ PAR UN GROUPE D'ÉLÈVES DE TERMINALE STL

Dès que le concours des Olympiades de Physique a été mis en place (1993), j'ai tenu à y faire participer mes élèves. J'ai très vite eu le sentiment qu'il fallait profiter de cet espace de liberté qui nous était offert pour mettre en pratique quelques idées concernant la didactique des sciences physiques et la didactique en général. Les événements qui ont suivi m'ont donné confiance : en effet, les sujets proposés ont été primés chaque année.

1^{er} Prix en 1993 : **Le rayonnement infrarouge et quelques-unes de ses propriétés**

2^e Prix en 1994 : **Histoires de bulles** (Étude des phénomènes superficiels)

2^e Prix en 1995 : **À propos de conduction-convection**

Ce dernier thème nous a valu d'être invités à participer à l'émission télévisée du congrès des thermiciens à Poitiers en mai 1995, c'est pourquoi j'ai choisi d'en développer ici le contenu soit :

«À propos de conduction et de convection».

Le point de départ a été une prise de conscience collective de la confusion qui régnait dans la détermination courante des notions de chaleur et de température : les définitions de chacune de ces **grandeurs** physiques données par le Larousse en trois volumes dans la rubrique «familier» en sont une preuve irréfutable. D'autre part, plusieurs élèves avaient relevé au moment des informations météorologiques des expressions du type : «les températures sont fraîches» ou bien «les températures sont chaudes»..., et sans savoir exactement pourquoi ils avaient eu l'intuition que ce langage était inadapté, même dans une émission tout public. C'est ainsi que nous avons décidé de partir à la recherche d'une meilleure appréhension des notions de chaleur et de température, ce qui nous a conduits à ouvrir une petite fenêtre sur la thermique. Dans ce qui suit, on trouvera un condensé de notre document écrit.

2.1. Introduction

Pourquoi sert-on toujours les boissons chaudes dans de la faïence ou de la porcelaine ? Nous avons essayé de verser du café dans une timbale métallique et dans un gobelet de porcelaine et voilà ce que cela a donné :

Figure 1a



*Gobelet en porcelaine :
Tout va bien .*



*Timbale en argent :
On se brûle la main .*

La température de la timbale est tout de suite plus élevée que celle du gobelet en porcelaine.

Figure 1b : 10 mn plus tard



*Gobelet en porcelaine :
encore chaud !*



*Timbale en argent
juste tiède.*

Figure 1 : Réflexions d'un goûteur de café

Un des participants a représenté sous forme de bande dessinée (figure 1a) un jeune garçon qui prend dans ses mains :

- une tasse métallique contenant du café chaud : il se brûle les mains ;
- une tasse en porcelaine contenant du café chaud : c'est très supportable.

Après quelques minutes (figure 1b), le jeune garçon décide de boire le café qui se trouve dans chaque tasse :

- le café qui se trouve dans la tasse métallique est tiède,
- le café qui se trouve dans la tasse en porcelaine est encore chaud.

Dans les deux cas on interprète le phénomène observé en disant que le système (masse d'eau M) a échangé de la chaleur avec le milieu ambiant et que cette évolution a lieu à la fois dans l'espace et dans le temps. Dans ce qui suit sont décrites les expériences réalisées de manière à séparer les facteurs espace et temps.

2.2. Étude du phénomène d'échange de chaleur en fonction du temps

Expérience. Une masse d'eau M est chauffée à l'aide d'un thermoplongeur puis, le thermoplongeur étant retiré, la masse d'eau se refroidit de façon naturelle dans le milieu ambiant. Au cours de l'échauffement et du refroidissement, on enregistre les valeurs prises par la température θ ($^{\circ}\text{C}$) de l'eau au cours du temps t , et cela à l'aide d'un thermocouple (figure 2).

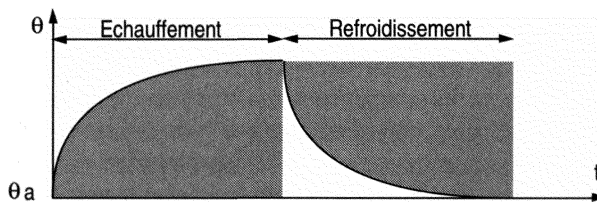


Figure 2 : **Courbes représentatives des variations de la température de la masse d'eau en fonction du temps au cours d'un échauffement suivi d'un refroidissement**

Observation. Les courbes obtenues $q = f(t)$ présentent une singulière analogie avec les courbes $U = g(t)$ obtenues lors de la charge et la décharge d'un condensateur ($U =$ tension aux bornes du condensateur).

Réflexions. Dans ce qui suit nous choisissons de nous intéresser au seul refroidissement. Le traitement des valeurs obtenues [$\ln(\theta - \theta_a) = h(t)$], avec $\theta_a =$ température ambiante, montre que le phénomène observé n'est pas rigoureusement analogue au cas du condensateur. Il apparaît évident que la masse d'eau ainsi que l'air ambiant n'ont pas une température uniforme (il suffit de déplacer la sonde de température dans l'espace pour s'en assurer), alors que le potentiel d'une plaque de condensateur est uniforme. On procède alors à quelques **modifications du dispositif expérimental** dans le but :

a) d'accélérer le processus,

b) de rendre uniforme la température de la masse d'eau ainsi que celle du milieu extérieur.

Pour cela, on place le récipient contenant l'eau étudiée dans un circuit d'eau courante (milieu extérieur à température uniforme et constante, figure 3c) et on agite l'eau étudiée (agitateur magnétique, figure 3d). L'expérience est renouvelée avec ce dernier dispositif ; alors le traitement des valeurs obtenues permet d'affirmer que l'évolution de la température θ peut se modéliser avec une loi de la même forme que celle de $U = g(t)$.

Interprétation du refroidissement : initialement la température de la masse M est plus élevée que celle du milieu extérieur, on dira que cela entraîne un échange de chaleur entre M et le milieu extérieur. Ici M cède de la chaleur et de ce fait voit sa température s'abaisser.

Interprétation de la décharge du condensateur : initialement le potentiel d'une des plaques du condensateur est à un potentiel plus élevé que l'autre plaque, on dira que cela entraîne le passage d'un courant dans le circuit résistant qui relie les plaques et de ce fait, la différence de potentiel aux bornes du condensateur diminue.

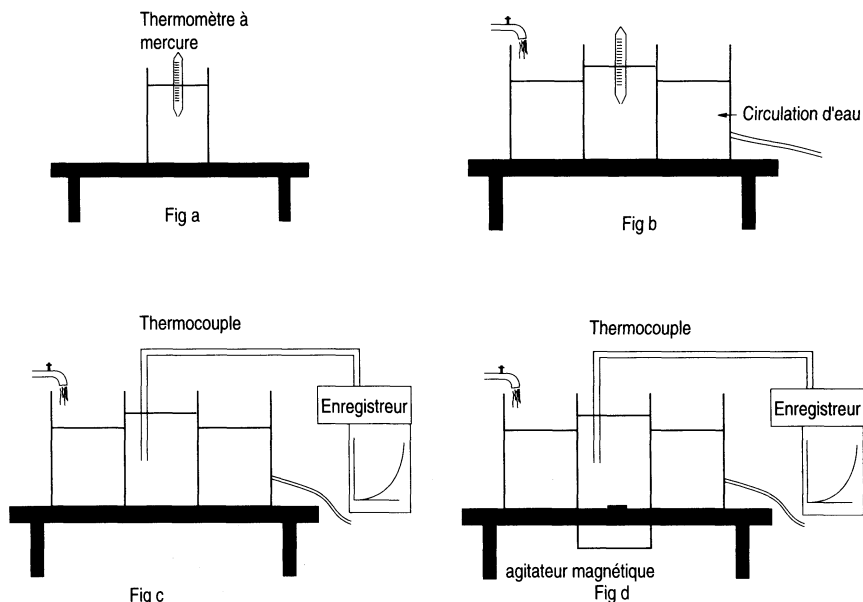


Figure 3 : (a) Montage initial simple. (b) La température du milieu extérieur est rendue homogène, le processus est accéléré à l'aide d'un courant d'eau froide. (c) On améliore le temps de réponse du capteur en utilisant un thermocouple. (d) La température de l'eau étudiée est rendue homogène grâce à l'agitateur magnétique

Conclusions

a) Le phénomène naturel observé (en apparence simple) est impossible à modéliser à notre niveau ; en revanche si l'on veut établir un modèle mathématique simple et rigoureux, il faut avoir recours à un dispositif sophistiqué.

b) La comparaison précédente appelle la remarque suivante : dans les deux cas, on observe que des grandeurs physiques jouent des rôles analogues. En effet la température joue le même rôle que le potentiel, alors que la chaleur joue le même rôle que le courant. Dans ce qui précède, température et potentiel jouent le rôle de «**grandeurs cause**», alors que chaleur et courant jouent le rôle de «**grandeurs conséquence**».

Remarque : dans notre approche nous nous sommes limités à l'étude des phénomènes de conduction-convection, excluant les changements d'état où les transferts de chaleur peuvent avoir lieu à température constante. Ce dernier point montre qu'il y a une limite à l'analogie thermique-électricité.

c) **Question** : pour quelles raisons y a-t-il une limite à cette analogie ?

Élément de réponse : le courant électrique correspond à un transfert de matière (les électrons), le transfert de chaleur n'est pas un transfert de matière ; il s'agit plutôt d'une transmission des états de vibration des atomes du matériau siège du transfert de chaleur qui se fait de proche en proche.

2.3. Étude du phénomène en fonction de l'espace

Extension de l'analogie précédente

Si l'analogie ci-dessus est valable, on peut écrire que la température θ du système peut se mettre sous la forme :

$$\theta_i = (\theta_M - \theta_e) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Avec θ_i = température (intérieure) du système à un instant t

θ_M = température (maximum) du système à l'instant $t = 0$

θ_e = température uniforme et constante du milieu extérieur.

En électricité, t se met sous la forme du produit $\tau = RC$ où R est la résistance du circuit électrique considéré et C la capacité du condensateur.

Nous nous proposons de poursuivre l'analogie en recherchant quel élément de l'ensemble peut bien jouer le rôle de capacité C et quel autre élément peut bien jouer le rôle de résistance R . En électricité, le condensateur constitue une réserve d'énergie ; on caractérise cette aptitude à stocker

l'énergie en caractérisant le condensateur par un coefficient appelé capacité C . Ce coefficient est d'autant plus grand que l'aptitude à stocker l'énergie est grande. Dans notre circuit thermique, c'est la masse d'eau qui constitue la réserve d'énergie, c'est donc à elle que nous affecterons un coefficient C appelé capacité thermique. Le rôle de résistance semble revenir tout naturellement à la paroi du récipient (voir les expériences précédentes), nous le nommerons \mathfrak{R} résistance thermique. La question qui se pose maintenant est de savoir ce que recouvre ce terme de résistance thermique. Nous avons fait des mesures d'une part en changeant le matériau constituant le récipient (laiton aluminium, matière plastique de même épaisseur et même surface d'échange), d'autre part en changeant la nature du milieu extérieur (eau, air) : nous avons alors constaté que \mathfrak{R} dépendait de la nature de la paroi ainsi que de la nature du milieu extérieur. Pour calculer \mathfrak{R} , il faut donc tenir compte des phénomènes indissociables expérimentalement que sont la conduction et la convection. En effet on appelle conduction le phénomène de transfert de chaleur à travers un solide et convection le phénomène de transfert de chaleur par l'intermédiaire d'un fluide. Une série d'enregistrements nous a permis d'aborder le problème sous l'aspect quantitatif, et en particulier de retrouver les valeurs des coefficients de conduction thermique λ de différents matériaux. Par la suite, afin de mieux nous rendre compte de ce qui se passe lors d'un transfert de chaleur, nous avons cherché à visualiser les phénomènes.

Visualisation des phénomènes de transfert de chaleur

Nous avons voulu traiter séparément les deux phénomènes de conduction et de convection ; sachant qu'ils sont pratiquement indissociables, nous avons successivement réalisé des montages qui privilégiaient un mode de transfert sans toutefois complètement éliminer l'autre.

a) VISUALISATION DU PHÉNOMÈNE DE CONDUCTION

Cette expérience a été grandement facilitée par l'utilisation de peinture thermosensible à cristaux liquides que l'entreprise Merck Clevenot nous a donnée ; cette peinture change de couleur avec la température. Nous avons voulu mettre en évidence la différence de conductivité thermique de divers matériaux : pour cela nous avons prélevé des échantillons de matériaux divers (verre, cuivre, laiton, aluminium) de même dimension (forme allongée 200 mm x 40 mm x 5 mm environ), nous les avons enduits de peinture thermosensible et nous avons chauffé simultanément les quatre échantillons par une de leurs extrémités. Très vite on remarque que l'espace coloré n'a pas la même dimension d'un échantillon à l'autre. De plus l'étalement se fait suivant une direction et un sens bien déterminés. Cela nous a permis d'introduire la notion de gradient de température (sans aucune formule bien sûr) ; d'où la remarque suivante : quand le gradient de température est faible

le matériau est conducteur, et quand le gradient de température est élevé le matériau est isolant. Nous avons pu alors faire le classement suivant dans l'ordre de conduction décroissante : cuivre, aluminium, laiton, verre.

b) VISUALISATION DU PHÉNOMÈNE DE CONVECTION

Cette visualisation a nécessité de nombreux essais.

• **Convection dans le cas général** (figure 4). Un becher contenant de l'huile est placé sur une plaque électrique ; nous nous proposons alors d'observer les mouvements de convection dans l'huile d'une part et dans l'air ambiant d'autre part. Pour ce faire, nous utilisons le fait que l'indice de réfraction d'un fluide est fonction de sa température. Après de nombreux essais, nous avons retenu la solution optique la plus satisfaisante : le système d'éclairage est constitué par un spot halogène au filament quasi ponctuel ; on s'arrange pour éliminer la lumière provenant directement de la source de telle sorte que l'ensemble à visualiser ne soit éclairé que par le faisceau lumineux renvoyé par le réflecteur. Finalement on recueille sur un écran une ombre projetée du phénomène, agrandie et bien contrastée. Par rapport à un système de projection classique (objectif photo utilisé à l'envers), l'ombre projetée présente l'avantage de disposer d'un grand champ, de donner une image droite, de ne pas donner lieu à des aberrations. Dans cet exemple de convection quelconque, on observe dans l'huile ainsi que dans l'air des mouvements désordonnés de matière, on dit que l'on est en présence d'un **phénomène chaotique**.

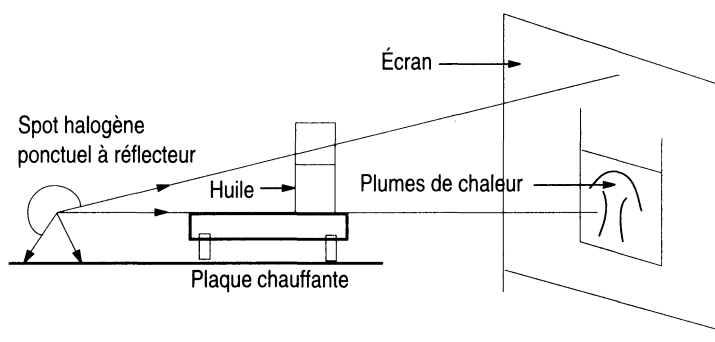


Figure 4 : Montage simple permettant la visualisation des mouvements de convection dans de l'huile chauffée

• **Cas particulier du passage d'un état désordonné à un état organisé.** Nous avons cherché à reproduire l'expérience dite de Bénard-Marangoni : lorsque l'on chauffe à l'air libre une couche de liquide visqueux, on

remarque que pour certaines valeurs de l'épaisseur du liquide, de sa viscosité, du gradient de température, les mouvements de convection donnent lieu à une organisation générale ; en effet on observe dans le liquide l'apparition de cellules hexagonales relativement stables. L'observation individuelle est très aisée, n'importe qui peut voir des cellules de Bénard-Marangoni dans l'huile d'une crêpière (huile du commerce en film de faible épaisseur et fortement chauffée). En revanche, nous avons éprouvé certaines difficultés à réaliser une projection agrandie du phénomène, visible par un groupe (le jury). La figure 6 représente le montage qui a donné le plus de satisfaction.

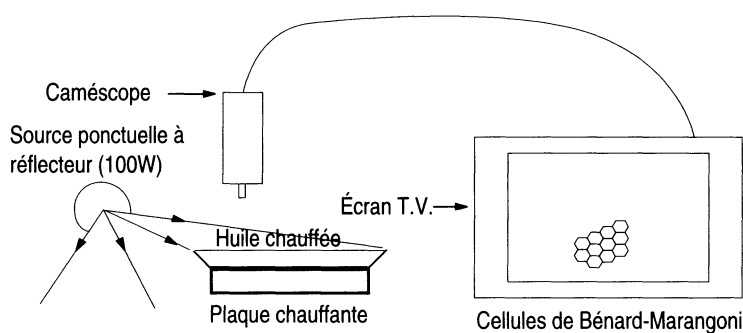


Figure 5 : **Éléments du montage permettant la visualisation des cellules de Bénard-Marangoni**

2.4. Conclusion

D'une part, une analogie avec l'électricité nous a permis de mieux nous représenter ce que sont la chaleur et la température ; de plus il a été possible d'établir une loi de prévision classique pour traduire l'évolution de la température en fonction du temps et de l'espace. Nous avons remarqué aussi qu'il était difficile de modéliser avec rigueur un phénomène naturel (trop de facteurs entrent en jeu), tandis qu'il fallait faire appel à un montage un peu plus complexe pour que la loi de prévision traduise exactement ce qui se passe (nombre de facteurs réduit au minimum).

D'autre part, cette incursion dans la thermique nous a permis d'entrevoir un domaine nouveau (pour nous) de la physique, à savoir la physique du chaos. Bien que notre étude se soit limitée à l'aspect qualitatif du phénomène, ce que nous avons observé nous a littéralement fascinés.

3. RÉFLEXIONS PERSONNELLES

On peut regretter de ne pas voir figurer une évaluation permettant de rendre compte de l'intérêt de ce type d'activité. À ce sujet, j'ai rencontré deux types d'obstacles :

– le concours avait lieu fin mars et la proximité du baccalauréat interdit de prolonger le temps consacré à ce travail ;

– si des jeunes en difficulté se sont montrés motivés et persévérants, c'est par le simple fait que pendant la préparation, ils ne se sont sentis à aucun moment jugés ou évalués.

Cependant, l'étude décrite précédemment a présenté de nombreux points positifs dont la valeur est difficilement quantifiable et ceci dans des domaines très divers. J'ai essayé, dans ce qui suit, d'en établir la liste.

3.1. Au plan de la formation scientifique

Ce travail a permis de

a) développer l'imagination et la créativité :

- recherche d'exemples simples de la vie courante illustrant notre propos ;
- recherche systématique d'une visualisation claire des phénomènes étudiés ;

b) travailler de façon transversale :

nous avons abordé des domaines très variés de la physique tels que la thermique, l'électricité, l'optique... ;

c) développer le savoir-faire expérimental :

mise en œuvre des idées de visualisation qui a exigé un travail en profondeur en optique, notamment à propos de la qualité des images ;

d) traiter deux types de phénomènes thermiques :

- **monofactoriel** (on a pu y faire une analogie avec l'électricité) où les méthodes de raisonnement et de calcul sont traditionnelles ;
- **multifactoriel** ; c'est le domaine du chaos où les lois de prévision sont inaccessibles à des lycéens, mais c'est aussi un domaine encore inexploré à l'école et cela a éveillé une grande curiosité chez nos participants ;

e) faire une approche des influences auxquelles est soumise la pensée scientifique. Comme nous l'avons indiqué précédemment, nous avons

utilisé une méthode classique d'analogie électrique pour traiter des phénomènes thermiques. Or, si l'on se réfère à la chronologie des faits scientifiques, on remarque que Fourier a publié la première loi de la thermique avant que Ohm ne publie sa loi concernant la tension aux bornes d'un résistor et que Faraday ne publie des lois relatives aux condensateurs. Si on se penche sur l'évolution des diverses branches de la physique, on ne peut s'empêcher de remarquer que depuis le XIX^e siècle, c'est l'électricité qui a subi le plus fort développement, surtout du point de vue des applications. Cela a conféré à cette branche un grand poids économique dont l'influence est ressentie jusque dans les méthodes de raisonnement.

3.2. Au plan humain

a) Chacun a pu choisir les différentes parties à traiter ainsi que les différentes tâches à effectuer en fonction de ses goûts et de ses compétences ; de ce fait chacun a pu donner le meilleur de lui-même. J'ai alors remarqué que cette façon de travailler redonnait confiance à chacun et que cela avait pour conséquence de lui permettre de s'ouvrir très naturellement à un savoir nouveau.

b) Il a fallu apprendre à travailler en équipe en prenant conscience que tous les rôles sont importants, et qu'un groupe est d'autant plus productif que les membres qui le constituent s'entendent bien et que les efforts entrepris vont dans le même sens.

c) Il a fallu apprendre à conduire un projet sur une longue durée, en acceptant les échecs et même en en tirant parti.

d) Les réussites successives ont redonné confiance à toute une section : en effet, chaque année, le groupe qui se présentait au concours était formé exclusivement d'élèves issus de la section STL (Sciences et Techniques de Laboratoire), option Optique, du Lycée J. Haag de Besançon. Très souvent, les élèves de ces sections nourrissent un sentiment d'infériorité vis-à-vis de leurs camarades de la section S (scientifique) ; leur réussite les a rassurés, notamment à propos de leur valeur dans le domaine scientifique expérimental.

e) Nous avons aussi pris conscience de nos limites (professeur comme élèves), car sans l'aide efficace et désintéressée de chercheurs spécialisés en thermique, nous n'aurions pas pu aller aussi loin dans nos réflexions. En effet, Madame Monchoux du Laboratoire de Thermique de l'Université Paul Sabatier de Toulouse nous a donné de précieux conseils et nous a soutenus de ses encouragements, et c'est grâce à son action que nous avons participé au congrès des thermiciens à Poitiers en mai 1995.

f) La présentation orale a été un excellent exercice d'entraînement si j'en crois une réflexion d'un de mes élèves, candidat heureux au concours 1993 : « *Si en 1995 j'ai eu les félicitations du jury lors de la présentation de mon projet de BTS photonique, c'est aux Olympiades de Physique que je le dois.* » Depuis, cet étudiant s'est inscrit en licence de physique où il réussit brillamment.

Dans ce type de travail le choix du sujet importe peu, en revanche il est important de pouvoir mettre en application quelques-uns des points énumérés ci-dessus. En effet, on y trouve des aspects du travail de recherche en équipe qui ne peuvent pratiquement jamais être mis en application ou en valeur dans un cours traditionnel.

Je ne saurais terminer sans remercier particulièrement :

les organisateurs du concours dont l'efficacité est remarquable,
les entreprises Aérospatiale, EDF, Renault qui ont permis toute l'organisation matérielle,
les membres du jury qui ont accompli leur tâche avec une générosité et une rigueur impressionnantes,
les chercheurs qui n'ont pas hésité à nous consacrer de leur précieux temps,
les collègues du lycée qui nous ont apporté de l'aide et du soutien.

BIBLIOGRAPHIE

(Il s'agit de la liste d'ouvrages effectivement consultés par des élèves de terminale.)

- ATKINS P.W. (1990). *Chaleur et désordre*. Paris, Belin.
- BRIGGS J. & PEAT F. (1991). *Un miroir turbulent*. Paris, Interédition.
- CHEVTZ I., KONDAK M. & KIRAKOVSKI N., KADANOFF L.P., LIBCHABER A., MOSES F. & ZOCCHI G. (1969). *Thermique générale*. Moscou, Éditions Mir.
- FLESSELLES J.-M., CROQUETTE V. & JANIAUD B. (1995). La ronde des oscillateurs. *Pour la Science*, Dossier Hors-Série Janvier 1995, pp. 78-81.
- KADANOFF L. (1991). Turbulence dans une boîte. *La Recherche*, n°232, pp. 628-638.
- LE QUÉAU D. (1993). Les Olympiades de Physique. *Didaskalia*, n°2, pp. 111-119.
- SACADURA J.-F. (1993). *Initiation aux transferts thermiques*. Paris, Technologie et Documentation.