

# L'expérience de cours

**René Moreau,**

Inspecteur général de l'éducation nationale

## Introduction

Le texte qui suit ne débutera pas par un exposé théorique sur ce que doivent être les expériences de cours, sur leur intérêt, la place qui doit leur être réservée, etc. Ces points seront certes abordés, mais en fin de parcours. Au lieu de cela, je préfère commencer mon exposé en vous relatant une séance de travaux pratiques à laquelle j'ai assisté, séance qui était organisée par un professeur dont je respecte la démarche et dont je salue le dévouement. Après avoir analysé cette séance, les contraintes qui la caractérisaient et les résultats auxquels elle a conduit, je vous dirai les raisons pour lesquelles, selon moi, il eût été préférable de la remplacer, au moins partiellement, par une expérience de cours à exploitation collective.

## Analyse d'une séance de travaux pratiques

### Présentation de la manipulation

Au début de l'année scolaire 2000-2001, dans une classe de 4<sup>e</sup>, un courageux professeur essayait de faire découvrir à ses élèves la fameuse loi des courants dérivés :  $i_p = i_{d1} + i_{d2}$ , à l'aide du montage ci-dessous (*fig.1*), qu'ils devaient réaliser. C'était la première fois que les élèves montaient deux dipôles en dérivation. Ils savaient seulement, depuis la séance précédente, que, dans une branche d'un circuit, la valeur du courant est unique ou encore indépendante du point considéré. Il s'agissait d'une classe relativement homogène, sans élève caractériel, apparemment constituée d'adolescents de niveau socioculturel modeste.

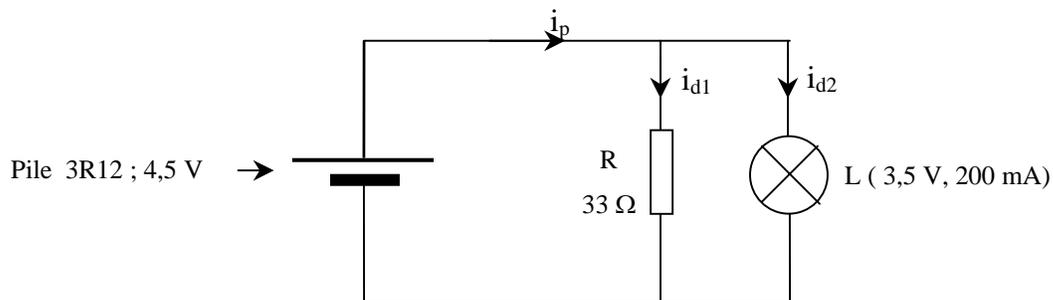


Figure 1

### Le but du TP

Les élèves devaient insérer l'ampèremètre dont ils disposaient (il s'agissait en réalité d'un multimètre possédant de nombreux calibres, et en particulier un calibre 2A et un calibre 200 mA) dans le circuit

principal (mesure de  $i_p$ ) puis dans chacune des branches R et L (mesure de  $i_{d1}$  puis de  $i_{d2}$ ). De ces trois mesures, le professeur attendait que chaque groupe de deux élèves (exceptionnellement trois) découvre la relation liant  $i_p$ ,  $i_{d1}$  et  $i_{d2}$ .

### ***Les enjeux scientifiques de la manipulation***

Ils ne furent pas formulés par le professeur, mais ils étaient très clairs :

- acquérir une certaine dextérité dans la réalisation de montages électriques, puisque la manipulation se déroulait directement sur table, sans platine support, avec seulement quelques cordons électriques et des “pinces crocodiles” ;

- découvrir la loi des courants dérivés : le protocole de la manipulation, remis par le professeur à chaque élève, prévoyait en effet, que les groupes les plus rapides pourraient, après avoir traité le cas de deux branches en dérivation, s'attaquer au cas où les circuits dérivés seraient au nombre de trois et essayer de trouver dans ce cas la relation entre  $i_p$ ,  $i_{d1}$ ,  $i_{d2}$  et  $i_{d3}$ . Aucun groupe n'ayant dépassé le premier stade (mesure de  $i_p$ ,  $i_{d1}$  et  $i_{d2}$  et relation entre ces trois intensités), nous nous restreindrons ici à la loi des courants dérivés  $i_p = i_{d1} + i_{d2}$  correspondant au cas de deux branches en dérivation.

Remarquons tout d'abord qu'au début de la manipulation, aucun des 25 élèves de la classe n'avait une idée de ce que pouvait être cette relation. A la fin de celle-ci, un seul groupe, sur 12, ayant, par le plus grand des hasards trouvé  $i_{d1} = 80$  mA,  $i_{d2} = 180$  mA et  $i_p = 260$  mA, c'est-à-dire trois nombres assez faciles à lire, a effectivement proposé la relation  $i_p = i_{d1} + i_{d2}$ . Les autres groupes, devant des triplets tels que ( $i_{d1} = 85$  mA,  $i_{d2} = 171$  mA et  $i_p = 250$  mA) restaient coi.

### ***Les contraintes matérielles de la manipulation***

Remarquons encore que cette manipulation comportait, parmi d'autres causes de variabilité inhérentes aux manipulations d'élèves de quatrième en électricité (erreurs aléatoires dues aux multimètres, erreurs aléatoires dues à la qualité des contacts, réalisés à l'aide de “pinces crocodiles”, fluctuations aléatoires dues à la disparité des deux composants passifs utilisés dans chaque montage, résistances et lampes), une cause d'erreur aléatoire et une cause d'erreur systématique spécifiques :

- les piles étaient déjà fortement usagées et présentaient de ce fait une grande disparité ; les montages et démontages du circuit pouvaient avoir pour conséquence de les mettre transitoirement en court circuit, ce qui a un effet sur leur résistance interne et leur f.é.m. Mais même sans cela, leur f.é.m. et leur résistance interne variaient au cours du temps (diminution de la f.é.m. passant par exemple de  $E_1 = 4,3$  V à  $E_2 = 4,1$  V et augmentation de la résistance interne passant par exemple de  $\rho_1 = 3 \Omega$  à  $\rho_2 = 10 \Omega$ , alors que pour une pile quasi neuve on a sensiblement  $E_0 = 4,5$  V et  $\rho_0 = 1,0 \Omega$ ). Cependant, comme le professeur n'avait pas imposé l'ordre dans lequel les élèves devaient mesurer  $i$ ,  $i_1$  et  $i_2$ , cela conduisait à des erreurs pouvant être considérées comme aléatoires : chaque courant mesuré étant sous évalué par rapport au précédent ;

- les circuits réalisés n'étaient jamais celui de la figure ci-dessus puisqu'il fallait insérer l'unique ampèremètre de chaque groupe successivement dans la branche principale, en utilisant le calibre 2 A pour lequel le multimètre présentait une résistance  $r_{A1}$  de  $0,23 \Omega$ , puis dans chacune des branches dérivées, en utilisant le calibre 200 mA pour lequel la résistance de l'ampèremètre valait  $r_{A2} = 1,2 \Omega$ . À cette occasion, nous pouvons noter que les multimètres “grand public” d'aujourd'hui, malgré toutes leurs immenses qualités, constituent des ampèremètres présentant une résistance bien plus grande que les appareils à aiguille d'autrefois, alors que les voltmètres, eux, sont infiniment supérieurs aux appareils correspondants à cadres mobiles.

Supposons pour simplifier que la source de tension présente, tout au long de la manipulation, des

caractéristiques invariables (prenons par exemple  $E = 4,30 \text{ V}$  et  $\rho = 4,7 \Omega$ ) et supposons également que la résistance de la lampe soit fixe (en fait, elle varie en fonction de la tension appliquée : on a par exemple  $r_L = 20 \Omega$  pour  $U_L = 4,2 \text{ V}$  et  $r_L = 14 \Omega$  pour  $U_L = 2,0 \text{ V}$ ). Prenons par exemple  $r_L = 16,0 \Omega$  ce qui correspond sensiblement à  $U_L = 3,0 \text{ V}$ .

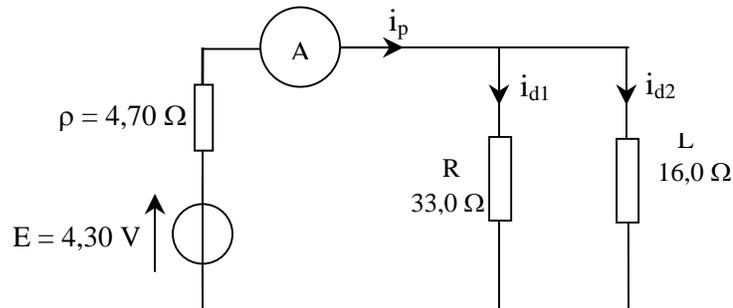


Figure 2

La figure 2 ci-dessus représente le cas où le multimètre est inséré dans la branche principale, celle de la pile, et où il présente une résistance interne  $r_{A1} = 0,23 \Omega$  car il est utilisé sur le calibre 2 A.

Avec ce modèle, les valeurs exactes des courants (arrondies au milliampère le plus proche) seraient celles qui figurent dans la deuxième colonne du tableau ci-dessous. En revanche, en branchant le multimètre successivement dans les deux autres branches (mesures de  $i_1$  puis de  $i_2$ ), on trouve respectivement les valeurs inscrites dans les colonnes 3 et 4 de ce même tableau.

	A dans la branche principale (pile) calibre 2A, avec $r_{A1} = 0,23 \Omega$	A dans la branche R cal. 200 mA ; $r_{A2} = 1,2 \Omega$	A dans la branche L cal. 200 mA ; $r_{A3} = 1,2 \Omega$
$i_p$	<b><math>i_{p1} = 274 \text{ mA}</math></b>	$i_{p2} = 276 \text{ mA}$	$i_{p3} = 269 \text{ mA}$
$i_{d1}$	$i_{d11} = 89 \text{ mA}$	<b><math>i_{d12} = 88 \text{ mA}</math></b>	$i_{d13} = 92 \text{ mA}$
$i_{d2}$	$i_{d21} = 184 \text{ mA}$	$i_{d22} = 188 \text{ mA}$	<b><math>i_{d23} = 177 \text{ mA}</math></b>

Si chaque colonne correspondant à un montage donné, on retrouve bien, aux erreurs d'arrondi près, la relation  $i_p = i_{d1} + i_{d2}$ , en revanche on n'a pas  $i_{p1} = i_{d12} + i_{d23}$ . En effet la somme des deux mesures est telle que  $i_{d12} + i_{d23} = 265 \text{ mA}$  contre  $274 \text{ mA}$  pour  $i_{p1}$ . **La méthode utilisée conduit donc à une erreur systématique relative de l'ordre de 3,4 %.**

Remarque : en utilisant le calibre 2 A pour mesurer chacun des trois courants, les résultats eussent été bien meilleurs, comme le montre le tableau ci dessous :

	A dans la branche principale (pile) calibre 2A, avec $r_{A1} = 0,23 \Omega$	A dans la branche R cal. 2A ; $r_{A2} = 0,23 \Omega$	A dans la branche L cal. 2A ; $r_{A2} = 0,23 \Omega$
$i_p$	<b><math>i_{p1} = 274 \text{ mA}</math></b>	$i_{p2} = 277 \text{ mA}$	$i_{p3} = 276 \text{ mA}$
$i_{d1}$	$i_{d11} = 89 \text{ mA}$	<b><math>i_{d12} = 90 \text{ mA}</math></b>	$i_{d13} = 91 \text{ mA}$
$i_{d2}$	$i_{d21} = 184 \text{ mA}$	$i_{d22} = 187 \text{ mA}$	<b><math>i_{d23} = 185 \text{ mA}</math></b>

On trouve en effet  $i_{d12} + i_{d23} = 275 \text{ mA}$  contre  $274 \text{ mA}$  pour  $i_{p1}$ , ce qui correspond à une erreur systématique relative inférieure à 0,4 % qu'il est assez difficile de mettre en évidence dans l'enseignement secondaire. Cependant, on ne peut enseigner une notion une certaine semaine (se placer sur le calibre le plus faible compatible avec la grandeur mesurée) et dire le contraire la semaine suivante. Le professeur avait donc eu raison de rappeler aux élèves le savoir-faire qu'il leur avait enseigné lors de la séance précédente.

## Résultats de la séance

Sur 12 groupes, 11 ont obtenu des résultats techniques cohérents, avec  $i_{p1}$  supérieure à  $i_{d12}$  et  $i_{d23}$  et assez voisine de la somme  $i_{d12} + i_{d23}$  ; un des groupes ayant, sans s'en apercevoir, mesuré deux fois  $i_{d12}$  a obtenu un résultat aberrant.

L'absence de réflexion préalable sur la dispersion provoquée par les erreurs des appareils (il aurait suffi de mettre les 10 ampèremètres en série pour constater que, traversés par un même courant, ils n'indiquaient pas la même valeur) a fait que, mis à part le groupe ayant trouvé l'égalité parfaite entre  $i_{p1}$  et la somme  $i_{d12} + i_{d23}$ , les autres n'ont pas été convaincus d'avoir "vérifié" la loi  $i_p = i_{d1} + i_{d2}$ .

Les élèves ont certes été heureux de manipuler, de s'encourager, de s'invectiver, de montrer à leur professeur qu'ils travaillaient, mais l'efficacité de la séance a été réduite à la réalisation (dans 11 cas sur 12) de trois montages certes non évidents, compte tenu de la rusticité du matériel. Cela n'est pas suffisant. En effet les élèves n'ont pas réfléchi et la manipulation ne les a pas aidés, au contraire, à mémoriser la relation de conservation du courant continu.

## Améliorations possibles de cette séance de TP

- Le laboratoire du collège ne disposait pas de 36 multimètres ; il n'était donc pas possible d'éviter l'erreur systématique due à l'insertion d'un ampèremètre de résistance  $1,2 \Omega$  dans des branches dont l'une contenait seulement une lampe de résistance voisine de  $16 \Omega$ . En revanche, en demandant aux élèves de changer de calibre alors que leur ampèremètre était inséré dans l'une des branches dérivées R ou L, on leur aurait montré que ses indications variaient avec ce calibre (de 2 mA environ dans un cas, de 8 mA environ dans l'autre). Il n'était pas difficile d'en faire déduire aux élèves que si l'on cherchait à vérifier l'égalité théorique  $i_p = i_{d1} + i_{d2}$ , ceci s'ajoutant aux autres causes d'erreur, il fallait admettre que cette égalité ne puisse être réalisée qu'avec une certaine approximation. De fait, à 15 mA près, sur 270 mA en moyenne, soit à 5,5 % près, elle était vérifiée par 9 groupes sur 11.

- On ne peut non plus reprocher au professeur, qui ne disposait pas de 15 générateurs de courant continu, d'avoir utilisé des piles usagées : lorsque l'on doit enseigner dans dix classes différentes et que l'on dispose d'un budget annuel de fonctionnement de 2500 F, on ne peut offrir à ses élèves des piles neuves à toutes les séances. Malheureusement, ceci entraîne de fortes disparités dans les résultats et masque partiellement les phénomènes recherchés. Sans cela, la mise en commun des mesures des élèves et, notamment, la comparaison des moyennes des  $i_{p1}$  d'une part et de la somme  $i_{d12} + i_{d23}$  d'autre part, aurait aidé à résoudre le problème. Notons en effet, que malgré tous les défauts cités, la moyenne des  $i_{p1}$  était égale à 270 mA contre 266 mA à la moyenne des sommes  $i_{d12} + i_{d23}$ . De plus, si le professeur avait fait admettre aux élèves que, compte tenu de la grande disparité des résultats (les valeurs des intensités  $i_{p1}$

se répartissaient entre 190 mA et 305 mA), il valait mieux ne donner ces moyennes qu'avec deux chiffres significatifs, le résultat de la manipulation aurait été :

$$\overline{i_{p1}} = 0,27 \text{ A et } \overline{i_{d12}} + \overline{i_{d23}} = 0,27 \text{ A.}$$

- De manière encore plus simple, on pouvait faire remarquer aux élèves, à condition, là encore d'utiliser l'ensemble de leurs résultats et non de demander à chacun d'eux de tirer de ses propres mesures la conclusion souhaitée, que, sur 11 groupes ayant donné des résultats cohérents, six trouvaient que l'intensité  $i_{p1}$  était supérieure à la somme  $i_{d12} + i_{d23}$  et cinq trouvaient le contraire, ce qui, compte tenu des nombreuses erreurs possibles, laissait une bonne probabilité à l'égalité  $i_p = i_{d1} + i_{d2}$ .

## Avantages présentés par une expérience de cours ayant le même but que le TP précédent

### L'expérience de cours n'est pas soumise aux mêmes contraintes de matériel

- On a vu que la manipulation était soumise à de fortes contraintes. Une bonne préparation des élèves aux phénomènes rencontrés et une exploitation collective de l'ensemble des mesures aurait certes permis à la classe de comprendre que ces mesures n'étaient pas en contradiction avec la loi  $i_p = i_{d1} + i_{d2}$ . Mais, d'une part, cette préparation n'avait pas eu lieu (l'inventaire des prérequis n'avait pas été effectué) et, d'autre part, l'erreur systématique importante due au fait que l'ampèremètre de chaque groupe changeait 3 fois de place dans le circuit, ne permettait pas d'espérer de très bons résultats : à la limite, en recommençant la même manipulation dans dix collègues différents, avec les mêmes valeurs nominales de R et de la lampe L, des piles du même type et des multimètres de mêmes caractéristiques, on pourrait, avec une très bonne probabilité, mettre en évidence la différence irréductible entre  $i_{p1}$  et la somme  $i_{d12} + i_{d23}$ .

- Pour une expérience de cours, on peut disposer d'un générateur de tension continue stabilisée ou, au moins, d'une pile neuve dont les caractéristiques ne se modifient pratiquement pas pendant la durée d'une expérience.

On peut aussi disposer de trois multimètres dont les réponses en ampèremètres sont compatibles : si le professeur ne dispose pas d'appareils spécifiques, protégés des tribulations imposées par les élèves au matériel, il peut toujours monter en série tous les ampèremètres de la collection et choisir pour sa manipulation les trois appareils dont les indications sont les plus centrales. Cela élimine l'erreur systématique précédente (car il n'y a qu'un seul montage pour les trois mesures) et cela minimise beaucoup une autre erreur systématique qui serait liée à la fausseté d'un appareil ou de plusieurs.

Le montage devient alors celui de la figure 3 :

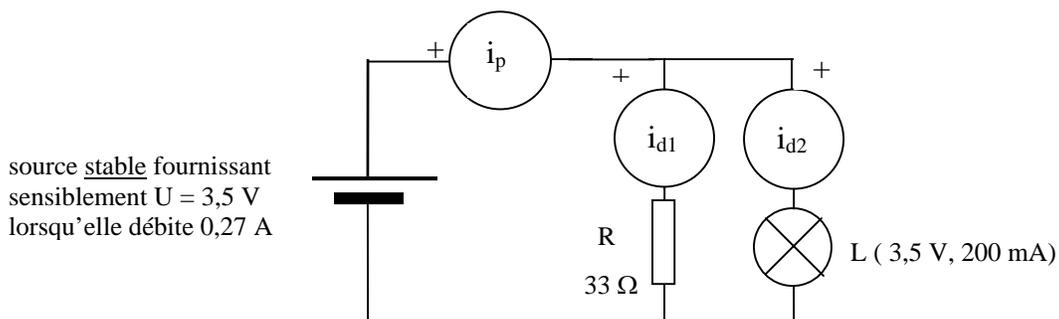


Figure 3

• Il n'est pas certain pour autant que le résultat obtenu satisfera exactement à la relation  $i_p = i_{d1} + i_{d2}$ . Cela n'est d'ailleurs même pas souhaitable. Car la difficulté liée à l'existence d'erreurs de mesures ne doit pas être esquivée : ces erreurs sont inhérentes à chaque processus de mesure et c'est véritablement faire œuvre d'éducateur et préparer les élèves à leur vie d'adulte que de traiter de ce problème. Pour ma part, reprenant la manipulation dans les conditions qui viennent d'être précisées, avec mes propres multimètres (je n'avais pu la reprendre avec le professeur concerné), j'ai trouvé :

$$i_p = 290 \text{ mA} ; i_{d1} = 197,8 \text{ mA} ; i_{d2} = 93,6 \text{ mA}.$$

En pareil cas, le professeur peut expliquer, car il n'est pas pris comme dans le déroulement d'un TP par les appels de 12 groupes d'élèves, que le constructeur des appareils admet que chacun d'entre eux peut donner une valeur légèrement erronée : il y a de bonnes chances, par exemple, lorsque les appareils sont neufs, que chaque erreur soit inférieure à "1 % VL + 1 UR". Voyons ce que cela signifie pour un courant  $i_p$  de 290 mA, mesuré sur le calibre 2 A avec un appareil à 2000 points de mesure. La valeur lue, VL, c'est 290 mA. Par conséquent, 1 % VL = 2,9 mA.

1 UR signifie une "unité de représentation" : c'est la valeur correspondant à une unité du dernier chiffre affiché, ou encore la valeur du calibre divisée par le nombre de points de mesure, soit ici, 1 mA.

Le constructeur nous indique donc que l'erreur commise sur la mesure de  $i_p$  a de fortes chances d'être inférieure à  $\Delta i_p = 3,9 \text{ mA}$ . On écrira donc  $i_p = (290 \pm 3,9) \text{ mA}$ .

De même, pour  $i_{d1}$ , on doit écrire :  $i_{d1} = (197,8 \pm 2,1) \text{ mA}$  et pour  $i_{d2}$  :  $i_{d2} = (93,6 \pm 1,0) \text{ mA}$ .

L'écriture :  $i_p = 290 \text{ mA} ; i_{d1} = 197,8 \text{ mA} ; i_{d2} = 93,6 \text{ mA}$  est très différente de :

$$i_p = (290 \pm 3,9) \text{ mA} ; i_{d1} = (197,8 \pm 2,1) \text{ mA} ; i_{d2} = (93,6 \pm 1,0) \text{ mA}.$$

De la première, on ne peut rien déduire, sinon que  $i_p$  n'est pas égale à la somme ( $i_{d1} + i_{d2}$ ). De la seconde, on constate du premier coup d'œil que la différence entre ces deux quantités,  $\delta i = 1,4 \text{ mA}$ , qui représente moins de 0,4 % de leur valeur moyenne, est presque trois fois plus petite que la seule incertitude  $\Delta i_p$  sur la mesure du courant principal.

On peut donc dire que nos mesures sont compatibles avec la loi  $i_p = i_{d1} + i_{d2}$  (et non, comme on l'entend parfois dire, que l'on a "vérifié" la loi).

## L'expérience de cours ne met pas en œuvre les même enjeux

Il est évident que l'expérience de cours précédente, réalisée au moins partiellement par le professeur (en ce qui concerne le choix des appareils et la disposition générale du montage) ne permet pas aux élèves de la classe de progresser en ce qui concerne le maniement du matériel. Cet enjeu n'est pas négligeable et il est évident que des séances de TP sont nécessaires pour le mettre en œuvre. Mais il faut bien les choisir et veiller à ce que les élèves, pendant ces séances, soient intellectuellement actifs.

En revanche, elle permet de mieux séparer l'énoncé de la loi elle-même et le rôle des mesures qui n'ont pas pour finalité d'établir cette loi, ni même de la vérifier, encore moins de la nier, mais seulement de montrer la cohérence de notre système de savoirs et de savoir-faire. En se fondant sur la nature du courant électrique dans les conducteurs métalliques (flux d'électrons) et sur une analogie avec des courants de fluides (d'un côté conservation de la charge et de l'autre conservation de la matière), le professeur, en cours, peut très bien postuler la loi  $i_p = i_{d1} + i_{d2}$  et donner ensuite à l'expérience un rôle différent de celui que lui avait assigné le professeur lors de la séance de TP que je vous ai décrite (les expériences des élèves devaient établir la loi). Il s'agit d'un rôle de contrôle de la cohérence dont je parlais plus haut, et comme

les mesures sont le plus souvent entachées de petites erreurs et qu'une incertitude est toujours attachée à chacune d'entre elles, ce contrôle est fragile ; ce n'est pas celui d'un juge qui absout ou condamne sans nuance.

Je rappellerai, à titre d'exemple, un fait scientifique survenu le 22 novembre 1975 (on pourrait multiplier les exemples de ce type) : ce jour-là, un avion de la Marine américaine décolla de la base de Chesapeake Bay pour un long vol en cercles répétés et monotones, au-dessus de cette base. Il emportait une horloge atomique, préalablement réglée sur un instrument identique qui restait au sol. Sa vitesse, pendant  $T \approx 15,5$  h de vol, fut maintenue aussi proche que possible de  $v = 140$  m/s, soit 504 km/h : il s'agissait de mesurer le décalage entre horloge embarquée et horloge stationnaire qui, d'après la relativité d'Einstein, est égal à :

$$\delta T = T \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

Les calculs donnaient  $\delta T = 5,7$  nanosecondes et l'on fut tout heureux et tout aise de mesurer, entre les deux horloges, et avec le bon signe, un décalage  $\delta \hat{T} = 5,6$  ns.

On sera peut-être surpris de ce plaidoyer pour l'expérience de cours et pour la préférence donnée, dans ce cas particulier, à une expérience de cours par rapport à une séance de manipulation. En fait, il s'agit d'une alternative un peu singulière : expérience de cours riche et très typée (relative à une loi physique), face à une séance de TP difficile et chargée de contraintes. En fait, les deux activités expérimentales sont complémentaires.

## Les expériences de cours dans l'enseignement de la physique et de la chimie

### Les conditions de leur réalisation et leur rôle

Elles présentent un intérêt affirmé depuis longtemps et sont certainement trop rares. Il peut arriver exceptionnellement que les expériences de cours soient critiquées, notamment pour leur manque de visibilité ou leur mauvaise intégration au cours. Il est vrai que leurs conditions d'exploitation maximale ne sont pas toujours assurées.

- Une expérience de cours doit être visible par tous, de préférence sans déplacement d'élèves. Elle doit donc être de taille suffisante et nécessite parfois des appareils de mesures particuliers, à affichage renforcé. Le matériel audio-visuel moderne, et notamment les caméscopes et les répéteurs d'écran équipent d'ores et déjà de nombreux lycées et ils apportent des améliorations considérables. J'ai pu ainsi, récemment, suivre, du fond d'une classe de 1<sup>ère</sup>, la plus belle expérience d'oxydation ménagée de l'éthanol que j'aie jamais vue. Un autre jour, dans une expérience sur le mouvement des électrons dans un champ magnétique uniforme, la planéité de leur trajectoire fut parfaitement montrée par la présence d'un deuxième caméscope judicieusement placé.

Bien entendu, le déplacement des élèves est préférable à la non vision des expériences par une partie de la classe, mais il provoque perturbations et perte de temps (voir plus haut). En tout état de cause, certaines expériences de cours sont inadaptées, par exemple toutes celles qui nécessitent l'observation à travers un oculaire ou qui présentent un danger réel comme les réactions potentiellement explosives.

- Une expérience de cours doit être adaptée au contenu du cours. Le professeur doit savoir pourquoi il présente tel ou tel fait expérimental ; il doit aussi avoir réfléchi à l'usage précis qu'il compte en faire et à son exploitation. Je me souviens d'une magnifique expérience de cours, destinée à introduire la notion de chaleur de réaction et d'énergie de liaison, en première S. Seize grammes d'hydroxyde de baryum hydraté préalablement placés dans un bécher à la température ambiante (voisine de 20°C), ayant été intimement mélangés à 8 g de nitrate d'ammonium à la même température, la classe éberluée avait vu la température du "mélange" passer à -15 °C. De plus, comme le bécher avait été posé sur une capsule en verre contenant un peu d'eau, celle-ci avait gelé, si bien que la capsule restait attachée au fond du bécher. La leçon ne pouvait mieux commencer. Hélas tout fut gâché par l'incapacité du professeur à expliquer à une élève pourquoi cette baisse de température était le signe que la réaction chimique entre les deux réactifs exigeait, pour se produire, un apport extérieur d'énergie. Désireux d'aborder au plus vite la théorie qu'il s'était promis d'exposer, le professeur, qui avait pourtant réussi à étonner ses élèves, perdit tout l'avantage de sa belle expérience car il ne l'avait pas suffisamment interprétée : l'étonnement, au lieu de susciter la curiosité, avait créé l'inquiétude.

L'expérience de cours peut, comme dans l'exemple ci-dessus, avoir pour but d'effectuer une première approche qualitative du concept que l'on se propose d'aborder. Pour la majorité des élèves, cette approche qualitative est indispensable pour donner un sens à ce concept. Dans l'exemple ci-dessus, il aurait suffi de dire, par exemple, que la réaction de l'hydroxyde de baryum sur le nitrate d'ammonium, commence par utiliser sa propre énergie thermique, ce qui provoque une diminution de température du milieu réactif, mais que, de ce fait, le milieu extérieur et en particulier l'atmosphère peuvent transférer sous forme de chaleur, par conduction, de l'énergie thermique au système réactif.

Elle doit permettre d'identifier les paramètres qui agissent sur une situation donnée : quelle réalité aurait par exemple le phénomène d'induction électromagnétique s'il n'était pas introduit par des expériences qualitatives ? À ce sujet, les professeurs de Cpge qui, autrefois, alors que l'induction était traitée en classe terminale, rivalisaient d'abstraction en mathématiques spéciales et parachutaient parfois les équations de Maxwell sans aucune introduction, doivent, maintenant que ce sujet n'est plus abordé dans le secondaire (et c'est proprement honteux), pour donner du sens à leur cours, promener des aimants devant des circuits (ou l'inverse). Quelle représentation autre qu'abstraite des phénomènes d'interférences ou de diffraction peut se construire un élève qui n'a pas la possibilité d'observer les franges correspondantes et leurs caractéristiques ? Comment, sans expérience qualitative, faire prendre véritablement conscience des différences de comportement entre un acide faible et un acide fort ? Comment introduire les divers phénomènes liés à la stroboscopie sans une présentation expérimentale ?

- L'expérience de cours ne doit évidemment pas être un exercice solitaire du professeur ; suscitant l'intérêt des élèves, elle doit les préparer aux développements ultérieurs du cours et à leurs propres activités expérimentales.

- De nombreux professeurs, particulièrement dans l'enseignement technique, invoquent le déficit de salles de cours équipées pour expliquer l'absence d'expériences de cours. Si l'on prend le temps de discuter avec eux, ils reconnaissent généralement qu'ils n'ont pas véritablement cherché à obtenir les moyens de présenter de telles expériences aux élèves car ils pensent que ceux-ci, lors des séances de TP,

auront tout le temps de se familiariser avec les aspects pratiques des phénomènes étudiés. Or l'expérience de cours, comme nous l'avons montré dans la première partie de notre exposé, correspond à d'autres objectifs que ceux qui sont généralement assignés aux manipulations d'élèves : elle permet de faire naître l'étonnement, d'amorcer un questionnement, de formuler des hypothèses, voire de poser une problématique ; elle permet aussi d'attirer l'attention des élèves sur tel ou tel aspect d'un phénomène qui pourrait leur échapper et leur apprend donc à observer.

- Dans une expérience de cours, on peut, au moins qualitativement, montrer l'influence de divers paramètres qui interviennent dans le phénomène étudié (comme la température et les concentrations pour une expérience de cinétique chimique, la tension appliquée et la nature du couple résistant pour la détermination du rendement d'un moteur électrique). Les élèves apprennent ainsi à structurer la démarche expérimentale qu'ils mettront en œuvre de manière autonome lors d'expériences plus personnelles.

- L'expérience de cours permet de réaliser des expériences particulières. Certaines situations expérimentales ne se prêtent pas à une expérimentation par tous les élèves. C'est le cas, nous l'avons vu lorsque le matériel est en nombre trop limité (il faut trois ampèremètres pour mesurer simultanément les trois courants aboutissant ou partant d'un même nœud) ou lorsque le dispositif expérimental n'existe qu'en un seul exemplaire (mouvement des particules chargées dans des champs magnétiques ou électriques, même si ce chapitre est désormais, lui aussi, exclu des programmes de physique) ou lorsque les expériences sont dangereuses (réactions chimiques devant être réalisées sous la hotte aspirante).

## Autres modalités souhaitables des expériences de cours

- Il faut donner aux élèves les moyens de mémoriser les expériences de cours et leurs apports. Il faut donc leur laisser le temps de prendre des notes et faciliter cette prise de notes ; au collège, il faut même l'organiser (éléments de schémas pré-imprimés, utilisation du rétroprojecteur). Dans certains cas, le traitement des mesures par un ordinateur et l'affichage sur répéteur d'écran apportent un indéniable supplément d'intérêt : je pense à une très belle expérience de cours que l'on peut réaliser en troisième avec un voltamètre, un générateur de tension de 6volts, par exemple, du sel de cuisine, un ampèremètre et une balance assez sensible permettant de peser de petites quantités égales de sel. A l'origine, le voltamètre contient de l'eau du robinet et l'ampèremètre n'indique qu'un courant négligeable. En revanche, lorsqu'on dissout dans cette eau de petites quantités de sel, on voit les points qui rendent compte de l'intensité traversant le voltamètre en fonction de la quantité de sel dissoute qui s'alignent rigoureusement les uns par rapport aux autres (tant que l'eau n'est pas saturée), et c'est un vrai plaisir.

La reproduction instantanée de graphes issus de l'ordinateur ou d'une table traçante couplée à un oscilloscope permet ensuite de pratiquer des mesures collectives et d'associer les élèves à l'exploitation de l'expérience.

- Les expériences de cours n'ont pas à être nombreuses, mais il faut bien les choisir et y revenir. Je me souviens de cet excellent professeur de physique de classe terminale qui gardait sur un coin de la paillasse, pendant trois ou quatre séances consacrées à la mécanique, une potence à laquelle était accrochée un ressort soutenant lui-même une masse marquée  $m$ . Dès qu'un de ses élèves, au cours d'un exercice, commettait l'erreur consistant croire que la tension du ressort est toujours égale au poids  $mg$  (ce qui n'est vrai qu'à l'équilibre), il tirait sur la masse marquée et l'élève, devant le pendule longitudinal ainsi animé et toute la classe, devait refaire le raisonnement montrant que l'égalité  $T = mg$  n'est qu'occasionnelle.

Revoir une expérience, après questionnement, pratiquer des va-et-vient entre la formulation d'hypothèses et la réponse expérimentale, vérifier le domaine de validité de tel ou tel modèle explicatif est préférable à l'accumulation d'expériences diverses dont la valeur formatrice n'apparaît pas clairement.

- Les expériences de cours peuvent aussi fournir aux professeurs l'occasion de montrer que les phénomènes de laboratoire ne sont pas essentiellement différents de ceux qui sont vus dans la nature ou mis en œuvre dans les dispositifs technologiques actuels ou du passé. A propos de la transmission de la chaleur par conduction, il ne faut pas hésiter à faire vérifier par un élève, à l'aide d'un thermomètre de contact, que la plaque de marbre jugée "froide" à la main et l'étagère "chaude" sont en fait exactement à la même température. Quand au théorème du moment cinétique, qu'il soit introduit par le lancer adroit d'une toupie ou le beau mouvement d'une roue de bicyclette posée sur une seule des extrémités de son essieu, son étude motivera beaucoup plus le pauvre taupin que l'alignement aride et sans présentation expérimentale des seules équations de la mécanique. Cette dernière réflexion m'a été inspirée par l'attitude récente du savant Alain Aspect, de l'Institut d'optique d'Orsay, qui, au cours d'un exposé de vulgarisation, n'a pas hésité à présenter une petite expérience mettant magnifiquement en évidence le rôle stabilisateur du moment cinétique d'un dispositif dans certaines interactions magnétiques à distance.

De telles expériences devraient donner aux élèves l'occasion d'apprendre à défendre leur point de vue en argumentant. C'est ainsi qu'il y a trois ou quatre ans, il était possible de constater sans calcul et sans table de constantes sur les CX, que les affirmations d'un ministre sur les mouvements comparés d'une balle de tennis et d'une boule de pétanque étaient imprudentes dès lors que la hauteur de chute n'était plus d'un seul étage mais (par exemple) de trois (du bon usage des limites d'un modèle).