

La signification de la mesure dans une activité expérimentale

par J. BRENASIN

Maître de conférence, Université P. et M. Curie
L.I.R.E.S.T. - Université Paris VII

1. INTRODUCTION

L'activité expérimentale, en particulier la pratique de la mesure est explicitement introduite dans les programmes de seconde ; «La physique et la chimie sont des sciences expérimentales et seront enseignées comme telles, c'est-à-dire en accordant la plus grande importance aux travaux pratiques. Ce sera l'occasion d'insister sur les incertitudes de mesures». (B.O. Spécial n° 1, 5 février 1987, p. 85). En seconde, «On se contentera d'effectuer une approche qualitative des problèmes relatifs aux incertitudes et à la précision des mesures. Il s'agit surtout de sensibiliser les élèves à ces questions et à les préparer à les aborder sous un angle plus formel». (B.O. Spécial n° 3, 9 juillet 1987, p. 84).

Ces formulations suscitent de nombreuses questions.

Comment «accorder la plus grande importance aux travaux pratiques» ?

De quelle manière «sensibiliser les élèves» ?

En quoi consiste «une approche qualitative des problèmes de mesure» ?

Comment articuler, dans l'enseignement, une approche statistique du traitement des résultats de mesure et l'activité expérimentale ?

Ce sont quelques questions, parmi d'autres, que les professeurs doivent résoudre lorsqu'ils affrontent cet enseignement. Pour mieux y répondre il nous semble nécessaire d'avoir une idée de l'ensemble des **opérations de pensée** qui s'exercent lors d'une activité expérimentale qui comporte des mesures*. C'est pourquoi nous allons analyser ce que fait l'expérimentateur lorsqu'il explicite la nature de l'information délivrée par l'expérience et la façon dont il l'exploite.

* Ce travail fait l'objet d'un contrat avec le ministère de l'éducation nationale concernant «Le rôle et la pratique de la mesure».

Pour rendre notre propos plus concret, notre analyse portera sur une situation particulière, fréquemment utilisée dans les travaux pratiques de seconde. Après avoir décrit la situation, nous commencerons par évoquer l'utilisation des mesures telle qu'elle est très souvent pratiquée dans l'enseignement et les problèmes que pose la prise en compte des incertitudes dans ce contexte. Nous faisons l'hypothèse que bon nombre de conclusions tirées de la situation particulière envisagée sont transposables pour d'autres situations et d'autres grandeurs. Pourquoi avoir choisi une situation de mécanique, sujet qui tend à être minimisé pour sa difficulté dans les nouveaux programmes ? Parce que la dispersion y est directement perceptible par nos sens sans l'intermédiaire d'un appareil. Elle est donc plus accessible que celle qui concerne des valeurs de grandeurs physiques telles que l'intensité du courant électrique, par exemple, qui exige des élèves un double effort de conceptualisation qui concerne non seulement la dispersion mais aussi celle de l'intensité du courant.

2. CHOIX DE LA SITUATION

2.1. Quelle situation ? Quelle question ?

En seconde, l'enseignement de la mécanique, utilise le dispositif de la table à coussin d'air dans l'étude de différents mouvements : rectiligne uniforme, circulaire, pour le mouvement du centre d'inertie d'un palet, pour la détermination du centre de masse d'un système, pour l'étude de la quantité de mouvement. Il est décrit et très souvent cité dans les manuels de physique de seconde. Nous avons donc choisi d'examiner un problème particulier souvent rencontré en préalable à ces activités ; la détermination de la vitesse d'un palet se déplaçant sur une table à coussin d'air ce qui nécessite la mesure des distances parcourues pour des intervalles de temps donnés.

2.2. Le dispositif expérimental



Figure 1 : Photocopie d'un enregistrement à l'échelle 1/2.

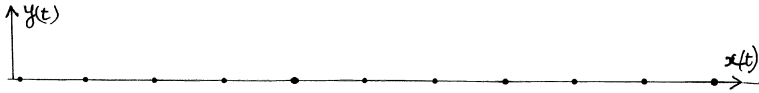


Figure 2 : Choix des axes de référence dans le plan de la trajectoire.

La palet se déplace sur une table réglée horizontalement. Un dispositif permet d'enregistrer la trajectoire du palet (figure 1). Prenons le cas où les conditions de lancement du palet sont telles, qu'il est approximativement animé d'un mouvement de translation, toutes les parties du palet ont la même vitesse. Le mouvement du palet peut alors, être représenté par celui d'un point P lui appartenant. Isolons, par la pensée ce point, à chaque instant il occupe un point de l'espace $x(t)$, $y(t)$ appartenant à $\mathbb{R}^2$ dans le cas d'une trajectoire s'effectuant dans le plan de la table. Si l'expérimentateur peut faire passer un trait rectiligne par toutes les traces, il admet, qu'en première approximation, le point P possède une trajectoire rectiligne suivant une direction sur laquelle nous choisirons l'axe Ox (figure 2). Les $y(t)$ peuvent représenter les écarts par rapport à cette direction et être assimilés à une dispersion de la position perpendiculairement à la direction de la trajectoire. En ce point le palet possède une vitesse instantanée habituellement définie par :

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{x(t + \Delta t) - x(t - \Delta t)}{2 \Delta t} \text{ pour } \Delta t \text{ tendant vers zéro}$$

L'enregistrement du mouvement d'un palet se déplaçant sur une table à coussin d'air est souvent tel, que les traces laissées par le palet sur le papier peuvent avoir une dimension de l'ordre du 1/4 de mm. La figure 1 reproduit un tel enregistrement. Lorsqu'on utilise un double décimètre gradué au 1/2 mm, les distances mesurées n'ont que deux valeurs possibles.

3. UTILISATION HABITUELLE DES RÉSULTATS

3.1. Description

La pratique habituelle tend, dans ces conditions, et en ne regardant pas de trop près, à faire admettre aux élèves, que les **traces** expérimentales se réduisent à des **«points»** obéissant bien à la loi énoncée. «Si nous admettons que les points M_{i-1} + M_{i+1} sont suffisamment

rapprochés pour pouvoir considérer la corde $M_{i-1} M_{i+1}$ comme pratiquement confondue avec la trajectoire, la valeur absolue de la vitesse instantanée en M_i est...» (B.U.P. n° 602, 1978, p. 825). Il suffit de transformer grâce au vocabulaire une **trace** physique en un **point** mathématique, pour que l'utilisation des résultats de mesure donne le sentiment d'établir les lois auxquelles obéit la vitesse instantanée de l'objet considéré, loi décrivant un mouvement rectiligne uniforme d'un objet soumis à des forces dont la somme est nulle, par exemple. Même les programmes officiels se font l'écho d'une telle illusion : «Pour déterminer expérimentalement le vecteur vitesse en travaux pratiques, il suffit de prendre comme longueur parcourue celle du segment rectiligne déterminé par deux **points** voisins». (B.O. n° 3, p. 71).

3.2. Conséquence de prise en compte de la dispersion sur la démarche habituelle

Une pratique soigneuse de la mesure introduisant la notion d'incertitude ne peut que déstabiliser cette démarche. Comment asseoir un concept à partir de mesures et comment prétendre, en effet, que des résultats de mesure vérifient une loi, s'ils ne sont pas déterminés de façon certaine ? Lorsque l'expérimentateur prend explicitement en compte la dispersion des mesures, «Il devient beaucoup plus difficile de s'assurer que deux grandeurs sont liées par une relation d'un certain type», précise R. MOREAU (B.U.P. n° 596, 1977, p. 1293). C'est bien là que réside une des nombreuses difficultés auxquelles les enseignants sont confrontés. Pour parvenir à les résoudre, il nous semble important d'être clairs sur le sens des résultats de mesure.

4. OPÉRATIONS DE PENSÉE EN JEU DANS CES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES

Pour résoudre une question apparemment banale : déterminer la vitesse d'un palet à partir de l'enregistrement de sa trajectoire sur une table à coussin d'air, s'opère une succession d'opérations de pensée d'une redoutable complexité, souvent soupçonnées sans être explicitées. C'est ce que nous allons tenter de faire. Nous examinerons en détail ce qu'implique une analyse de la situation expérimentale, des mesures, en commençant par la conceptualisation qui en est faite.

4.1. La conceptualisation de la situation

L'analyse du mouvement du palet P_m en relation, par exemple, avec l'enseignement du principe d'inertie permet de dire que le mouvement «réel» de P_m résulte de l'ensemble des forces identifiables dans une modélisation de la situation où :

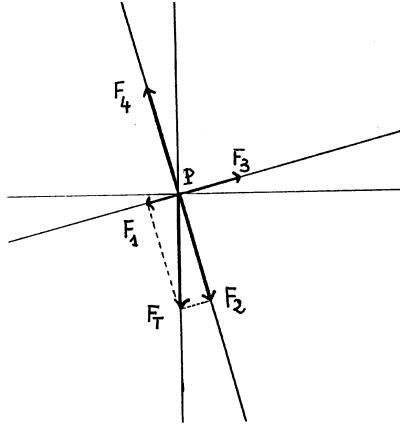


Figure 3 : Représentation des forces qui s'exercent sur le palet lorsque la table fait un angle par rapport à l'horizontale.

- $\vec{F}_1$, la composante suivant le plan de la table de la force $\vec{F}_T$ que la terre exerce sur P_m , est nulle dans la mesure où la table est horizontale ce qui n'est jamais rigoureusement réalisé (figure 3).
- $\vec{F}_3$, la force de frottement de la table sur P_m est supposée être nulle. En fait la résultante des forces agissant sur le palet dans le plan du mouvement, $\vec{F}_1 + \vec{F}_3$, ne l'est pas strictement et subit de légères fluctuations. Les imperfections de la table, les poussières sont susceptibles de modifier, aussi peu soit-il, le mouvement du palet.
- Le mouvement se situant dans le plan de la table, la somme des forces agissant sur le palet dans une direction perpendiculaire à la table est nulle. Il s'agit de la composante normale, $\vec{F}_2$ de la force de la terre sur P_m et de la force $\vec{F}_4$ dite force de réaction, que la table exerce sur P_m .

4.2. Analyse des effets du dispositif expérimental sur la mesure du phénomène étudié

Regardons ce qui se passe dans notre situation. Pratiquement, l'expérimentateur fixe sur le palet un dispositif de marquage de di-

mension petite mais finie. A des intervalles de temps réguliers t_1 définis à dt_1 près, la pointe émet une étincelle qui laisse une trace sur le papier ; dt_1 est supposé être petit par rapport à t_1 .

Cette trace de forme plus ou moins biscornue, de dimension finie peut être caractérisée :

- soit par une évaluation du diamètre d'un disque recouvrant approximativement la trace,
- soit par une évaluation du délat dt_2 que le palet mettrait pour parcourir ce diamètre.

Les questions qui se posent alors sont :

- que mesure l'expérimentateur lorsqu'il mesure la «distance» entre deux traces de l'enregistrement ?
- quel rapport existe-t-il entre le nombre résultant de la mesure et la vitesse du palet ?
- la source des difficultés rencontrées lors de l'interprétation de la mesure ne provient-elle pas aussi de la complexité de ce rapport ?

L'expérimentateur peut, au mieux, caractériser non pas la vitesse du palet, mais celle du palet muni de son système de marquage. Nous ne tiendrons pas compte, dans la suite de l'analyse, de cette difficulté supplémentaire. L'expérimentateur décide, parce qu'il ne peut pas faire autrement, que l'introduction du système de marquage est tel qu'il perturbe de façon négligeable le mouvement du palet. Pour s'affranchir de ce problème et analyser la nature des autres difficultés, il peut dire qu'il cherche à déterminer la vitesse du palet muni de son dispositif de marquage P_m . C'est cet ensemble que désigne le mot «palet».

Le principe d'inertie concerne le mouvement d'un objet libre de toute interaction ou bien qui est soumis à des interactions dont la somme est nulle. Dans ce cas, la vitesse de l'objet est constante, éventuellement nulle. La table à coussin d'air vise à s'approcher de cette situation qui n'existe pas dans la réalité. C'est pourquoi la technique du coussin d'air cherche à minimiser les forces de frottement de la table sur la palet. Donc le **dispositif crée une situation à la fois, épurée par rapport à une situation réelle et perturbée par rapport à la situation «idéale»** qu'elle cherche à réaliser sans qu'elle puisse l'atteindre.

Ceci a un caractère général et qui concerne toutes les sciences expérimentales : le dispositif **perturbe toujours le phénomène étudié**. Le travail de l'expérimentateur consiste aussi à améliorer les dispositifs expérimentaux afin de créer des situations où les perturbations provoquées par le dispositif d'observation sont de plus en plus faibles, de façon à tendre vers la situation idéale envisagée.

4.3. Analyse de l'origine de la dispersion dans le mesurage

La mesure se fait à partir des traces, non ponctuelles, que le marqueur laisse sur le papier. La trace peut être le résultat d'une petite étincelle qui ne se produit pas forcément à l'aplomb de la pointe qui l'a créée, de plus, le palet se déplace, aussi peu soit-il, pendant la formation de la trace. Il est impossible de le déplorer, puisqu'enfin de compte, tout prosaïquement, la trace doit être visible pour être utilisable ! Ceci se traduit par **l'impossibilité de faire correspondre rigoureusement un point du palet avec une trace de dimension finie sur le diagramme**. L'expérimentateur n'a pas d'autre choix que de faire, souvent implicitement, l'hypothèse que la position réelle du point P associé au palet appartient à l'ensemble des points de la trace et que les dimensions de la trace traduisent les imprécisions sur la détermination de cette position.

Mathématiquement la distance entre deux points est bien définie mais que fait-on lorsqu'on prétend mesurer la distance entre deux traces ? Pratiquement l'expérimentateur utilise un double décimètre dont les graduations ne sont pas infiniment fines et qu'il fait coïncider avec une zone appartenant à l'ensemble des points de chaque trace que nous désignerons par $Ex(t)$. En grossissant le problème il s'agit, en fait, de mesurer la «distance» entre deux boules d'une haltère avec un peigne. La valeur de la mesure dépend du point de la zone pointée par l'instrument de mesure dans la trace. Ceci explique l'origine de la dispersion inévitable des valeurs mesurées. Le nombre de valeurs du résultat de mesure des positions, augmente considérablement par l'utilisation d'un pied à coulisse au lieu du double décimètre. La dispersion des valeurs n'en est que plus apparente.

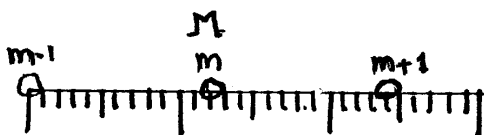


Figure 4 : Mesure de la «distance» entre deux traces.

La vitesse mesurée en un point M de la trace m est par convention, $v(m) = (x(t_{m+1}) - x(t_{m-1})) / 2t_1$, c'est-à-dire en fait, une vitesse moyenne entre deux points appartenant aux traces précédant la zone m et lui succédant. Elle est considérée comme la vitesse du mobile au point M, ce qui est une approximation. La dispersion des valeurs mesurant les distances entre les différents points des traces se répercute donc directement sur la dispersion des valeurs des vitesses.

En conséquence :

- la dispersion existe toujours, elle est inévitable. L'analyse de ses causes fait partie de l'activité expérimentale,
- la dispersion est d'autant plus apparente, que l'instrument de mesure est plus sensible,
- **la position du palet et sa vitesse à un instant donné, sont des grandeurs dont les valeurs réelles sont expérimentalement inaccessibles.**

4.4. Comment gérer ces informations ?

En toute rigueur, il y a lieu de distinguer :

- 1) la trajectoire **réelle** de P appartenant au palet décrite formellement par **$xr(t)$, $vr(t)$** ,
- 2) la trajectoire **théorique** du palet $xt(t)$, $vt(t)$ qui dépend de la modélisation qui est faite de la situation,
- 3) la trajectoire **représentée** sur l'enregistrement obtenu qui correspond à un **ensemble $Ex(t)$** de points dont on déduit un ensemble de valeurs expérimentales des vitesses mesurées **$Ev(t)$** .

En conséquence :

les valeurs réelles de position et de vitesse du palet $xr(t)$, $vr(t)$, les valeurs déduites des relations théoriques $xt(t)$, $vt(t)$, uniques pour chaque valeur de t, et l'ensemble des valeurs mesurées $Ex(t)$, dont on déduit $Ev(t)$, **sont fondamentalement différentes les unes des autres**, bien qu'elles aient «à voir» les unes avec les autres et sans qu'il soit possible de préciser de façon stricte les relations qui existent entre elles. **Les valeurs réelles des positions et des vitesses sont inaccessibles.** C'est pourquoi l'expérimentateur cherche, non pas à les **connaître** mais à les **cerner** par deux moyens. L'un est expérimental, il fournit un ensemble de valeurs plus ou moins précises suivant le dispositif utilisé. L'autre est théorique, résulte de proposition de rela-

tions entre les grandeurs physiques décrivant la situation en ignorant plus ou moins les facteurs perturbateurs tels que les frottements. L'approche théorique permet de préciser les positions et les vitesses qu'aurait le palet dans des conditions qui ne peuvent pas être réalisées matériellement même si, dans le cas examiné, le dispositif de la table à coussin d'air permet de s'en approcher.

4.5. Quelle est la fonctionnalité du calcul statistique ?

Pour que la comparaison entre la valeur théorique et l'ensemble des valeurs expérimentales puisse être faite, il faut pouvoir **réduire cet ensemble à une valeur unique**. Comment ? C'est à ce stade que s'introduit le traitement statistique de la mesure, parce qu'il propose des techniques pour le faire. Par exemple la valeur moyenne représente souvent, mais pas toujours, la valeur expérimentale la plus probable et il est parfois possible de chiffrer sa marge d'incertitude. Il n'est pas dans notre propos d'entrer dans des descriptions théoriques du calcul statistique qui ne prend tout son sens qu'étroitement lié à l'analyse des conditions expérimentales. La seule généralité que nous puissions proposer est que, si la valeur théorique est comprise dans cette marge, l'accord entre l'expérience et la théorie est jugé satisfaisant, l'expérimentateur suppose alors que les valeurs trouvées sont une bonne estimation des valeurs caractérisant l'objet réel. Il peut arriver en recherche qu'un accord paraisse excellent et qu'il ne soit que... fortuit ! S'il y a désaccord, soit l'expérience comporte des défauts à éliminer, soit le modèle théorique est inadapté à la situation étudiée et doit être modifié. Par exemple, l'évaluation du ralentissement, faible mais souvent perceptible, permet d'évaluer l'ordre de grandeur de la composante horizontale de l'interaction de la table et du palet ce qui permet, éventuellement, de la prendre en compte dans une nouvelle description théorique plus fine de la situation.

C'est ce travail de perfectionnement par approximation successive, auquel R. LESCOUL fait fort justement allusion lorsqu'il s'interroge sur l'utilité pédagogique d'appareils très perfectionnés : « Reste à savoir si de tels appareils quasi parfaits, utilisés actuellement, sont plus formateurs pour nos élèves et développent autant les facultés d'observation que ceux qui « dilatent » en quelque sorte les écueils expérimentaux : ce sont justement ces derniers qui mettent en évidence le mécanisme de la connaissance par approximations successives ; ne vaut-il pas mieux de temps en temps, revenir aux sources ? » (B.U.P. n° 531, 1971, p. 396).

4.6. Remarque sur la nature du discours tenu dans l'exploitation des résultats de mesure

Notons que le discours que nous avons tenu n'a rien de démonstratif ni d'explicatif, il peut être assimilé à une **argumentation raisonnée** qui cherche à gérer au mieux les informations disponibles. Il relève souvent du simple bon sens et bien que rigoureux, cela le rend certainement difficile à évaluer. Il n'en découle aucune vérité absolue. Les conclusions correspondent à un état de connaissance pour un champ expérimental spécifique, connaissance susceptible d'être modifiée par un nouvel apport d'informations.

5. CONCLUSIONS

Les idées qui ressortent de cette analyse sont caractéristiques d'une démarche expérimentale qui tient compte des difficultés :

- a) le mesurage perturbe toujours le phénomène étudié,
- b) les valeurs réelles des grandeurs mesurées sont fondamentalement inaccessibles,
- c) la dispersion des valeurs mesurées peut être minimisée, mais elle n'est jamais rigoureusement nulle, elle est inévitable,
- d) plus l'instrument de mesure est sensible, plus la dispersion est apparente,
- e) le traitement statistique des mesures permet, compte tenu de la dispersion, de donner une valeur expérimentale unique la plus probable et en chiffrant éventuellement sa marge d'incertitude. Son **intérêt est essentiellement opératoire**, il permet la comparaison entre valeurs théoriques et expérimentales.

L'analyse que nous avons proposée a tenté d'élucider les différents aspects d'une activité expérimentale de mesure est obligée d'examiner si elle ne se borne pas à l'étude du résultat mais s'intéresse aussi à la façon de l'obtenir. Elle a pour avantage de proposer les moyens d'éviter un écueil fort justement signalé par les concepteurs de programmes : «Les élèves ne doivent pas retirer des activités expérimentales... une image négative d'à peu près ou d'approximation..., il serait désolant que la loi des courants dérivés... soit suspectée d'être, en courant continu, une loi approchée» (B.O. n° 3, p. 84).

En adoptant le point de vue des élèves, il ne nous semble pas impossible qu'ils pressentent, sans être forcément capables de les ex-

pliciter, les difficultés qui sont occultées dans un enseignement qui est contraint d'aller vite. C'est peut être, ce qu'ils expriment dans l'enquête de R. BOYER et A. TIBERGHIEU concernant «Des opinions de professeurs et d'élèves sur l'enseignement des sciences physiques au lycée» (B.U.P. n° 712, 1989) ? Leur opinion est que, «Les questions doivent se rapporter au cours seulement... C'est dommage de se restreindre de poser des questions quand on a de l'intérêt pour quelque chose... Après on ne cherche plus à savoir». A partir d'une simple opération de mesure de distances, l'élève peut, comme le montre des travaux en cours, se poser de nombreuses questions qui méritent un examen attentif si l'enseignement se donne pour objectif de prendre en compte la spécificité des travaux pratiques.

Les directives exprimées dans les programmes nécessitent de reconsidérer et redéfinir le statut des activités expérimentales dans l'enseignement. En effet une des conséquences que notre étude fait ressortir, est que les relations entre grandeurs ne peuvent pas être induites en toute rigueur seulement de l'expérience. La théorie permet de les présupposer, l'expérience a pour rôle de ne pas contredire ce qu'elle prévoit, même si l'expérimentateur, dans son désir de convaincre, prétend souvent, même en recherche, que l'expérience «vérifie» la théorie.

Il nous semble que si les élèves font, au moins une fois dans leur cursus scolaire, le travail décrit dans cet article, ils auront de meilleures raisons de comprendre l'articulation entre la théorie et l'expérience dans la construction de la connaissance par une science expérimentale.