

Une étude précise de la chute libre

par Michel TROPIS et Claude BOUYSSSET,
I.D.E.A.O.

Laboratoire d'Étude des Méthodes Modernes d'Enseignement
Université Paul Sabatier, 118, route de Narbonne,
31062 Toulouse Cedex

Ces dernières années ont vu l'apparition de beaucoup d'études de mécanique exploitées par micro-ordinateur. Dans l'utilisation de l'outil informatique, l'accent est en général mis sur la possibilité d'acquérir et de traiter beaucoup de données. Nous souhaitons montrer que l'ordinateur permet également d'accéder à une très grande précision de mesure même si on le couple à du matériel didactique de laboratoire traditionnel.

LA MESURE DES TEMPS

Les micro-ordinateurs compatibles PC ont tous une horloge destinée au chronométrage appelée temporisateur ou timer dont le cycle dure 838 ns. On peut la programmer pour qu'elle émette un top (en fait il s'agit d'un créneau) tous les N cycles. N pouvant varier jusqu'à 65535, la période de battement de cette horloge peut être programmée jusqu'à 55 ms.

Dans le cas des expériences de chute libre, les temps mesurés étant de l'ordre du dixième de seconde, on doit avoir une horloge assez rapide. Malgré tout, la mesure est effectuée par le processeur qui doit à la fois gérer le comptage des tops et tester en permanence l'état des capteurs. Il ne faut donc pas que les tops soient trop rapprochés sinon le processeur, lorsqu'il effectue un autre travail risque d'en sauter.

On peut donc par exemple programmer l'horloge pour qu'elle émette un top tous les 24 cycles soit environ 20 μ s (exactement 20,112). La résolution de mesure est alors de 0,00002 s ce qui est suffisant pour cette étude. La précision observée est du même ordre, le quartz de l'horloge étant d'une exactitude bien supérieure.

Les capteurs doivent être reliés à l'ordinateur soit par l'intermédiaire d'une interface soit tout simplement sur la prise d'imprimante. Nous avons utilisé alternativement les interfaces ESAO3 et CANDIBUS. Pour cette dernière, il est possible de substituer l'horloge de l'interface qui bat à 500 ns à celle de l'ordinateur. Nous n'avons pas noté de différence significative dans la mesure des temps pour des réglages identiques du banc de chute.

Les premières mesures ont été faites à l'aide d'une version pré-commerciale du logiciel MOUVEMENTS RECTILIGNES (coédition CNDP-Langage et Informatique) qui permettait d'afficher des temps de mesure avec 5 décimales, puis un petit programme spécialisé a été réalisé pour la circonstance. La procédure de chronométrage doit être écrite en assembleur, seul langage suffisamment rapide pour qu'aucun des tops de l'horloge ne soit sauté. Les mesures étaient convenablement reproductibles.

LA MESURE DES DISTANCES

La principale source d'imprécision vient de la mesure de la distance réellement parcourue par le corps lorsque le micro-processeur détecte le changement d'état du capteur.

La tradition veut que l'on couple le micro-ordinateur avec des capteurs à fourche photoélectrique. Ces capteurs qui n'introduisent aucune perturbation dans le mouvement du corps sont cependant d'importantes sources d'imprécision liées :

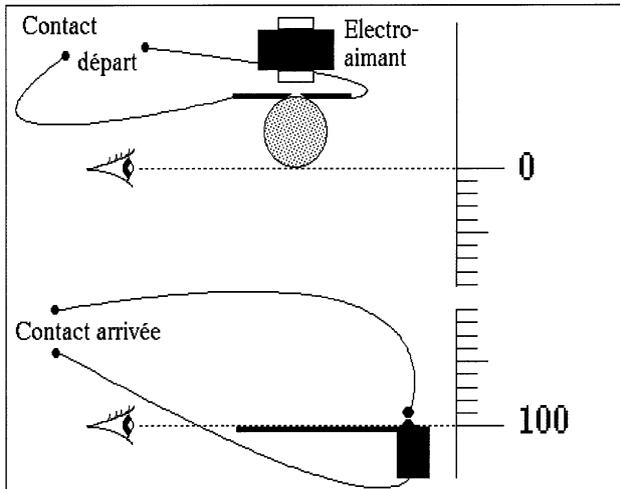
- au parallaxe dans la mesure de leur position,
- au fait que les faisceaux infrarouges de départ et d'arrivée ne sont pas en général coupés pour des positions équivalentes du corps lorsqu'il a une forme sphérique.

Il semble donc difficile avec des capteurs photoélectriques d'avoir une appréciation des distances à mieux que le millimètre près. Or un calcul rapide montre qu'avec une telle incertitude sur des distances voisines du mètre, il n'est pas nécessaire d'avoir des mesures de temps à mieux que 200 μ s.

Nous avons plutôt utilisé un banc de chute traditionnel de marque JEULIN. Le capteur de départ est une plaquette en deux parties pour

laquelle c'est le contact de la bille qui joue le rôle d'interrupteur. Le capteur d'arrivée est constitué par un système coulissant à contacts argentés qui s'interrompt lorsque la bille vient le heurter.

Un système de vernier permet de positionner les capteurs au dixième de millimètre, l'imprécision est due à des phénomènes d'arc électrique, d'aimantation rémanente, d'élasticité des matériaux, de dilatation et d'oscillations du banc de chute qui ne sont pas très importants.



L'INFLUENCE DE LA RÉSISTANCE DE L'AIR

Avec une telle précision dans les mesures, on peut montrer que l'influence de la résistance de l'air n'est pas négligeable, même si on étudie la chute d'une bille d'acier.

Dans les conditions de l'expérience où la vitesse du corps est de quelques mètres par seconde, la résistance de l'air à considérer est donnée par la relation :

$$R = k (dx/dt)^2$$

où k est fonction du coefficient de forme C_x , du maître-couple S et de la masse volumique de l'air ρ :

$$k = C_x \rho S$$

La résolution de l'équation différentielle du mouvement donne :

$$x = m/k \ln \operatorname{ch} (t \sqrt{kg/m})$$

Les mesures ont été faites à moins de deux kilomètres du Bureau International de Gravimétrie qui nous a communiqué la dernière valeur relevée de l'intensité de la pesanteur locale $g = 9,8044... \text{ m.s}^{-2}$. Le corps était une sphère ($C_x = 0,19$) de diamètre 16 mm et de masse 17 g. Avec $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$, on peut calculer les temps théoriques de chute et les comparer au temps de chute dans le vide qui sont donnés par :

$$x = 1/2 g t^2$$

x	t (air)	t (vide)	δt
0,4 m	0,28571 s	0,28565 s	60 μs
0,6 m	0,34995 s	0,34985 s	100 μs
0,8 m	0,40413 s	0,40397 s	160 μs
1,0 m	0,45187 s	0,45165 s	220 μs
1,2 m	0,49505 s	0,49476 s	290 μs

La différence est donc suffisamment importante par rapport à la résolution de la mesure pour qu'on soit obligé d'en tenir compte.

UN EXEMPLE DE MESURES

Pour chaque distance, le temps est une moyenne calculée sur 12 mesures après élimination des extrêmes. Chaque temps est alors corrigé pour éliminer l'influence de la résistance de l'air et déduire ainsi le temps de chute supposé dans le vide. La valeur de la correction est évaluée théoriquement à partir du temps mesuré de la manière suivante.

La correction δt se définit comme la différence entre le temps de chute dans l'air et celui dans le vide donnés par les deux relations $x(t)$ du paragraphe précédent. En prenant un développement limité de la première expression on arrive alors à :

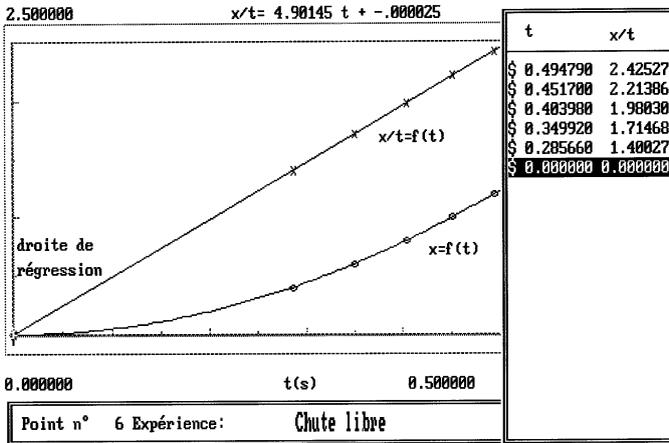
$$\delta t = k g t^3 / 12$$

soit pour la bille d'acier utilisée :

$$\delta t = 0,0024 t^3 \text{ (où } t \text{ est le temps mesuré)}$$

x	t _{mesuré}	δt	t _{corrigé}	x/t _{corrigé}
0,4 m	0,28572 s	0,00006 s	0,28566 s	1,40027 m/s
0,6 m	0,35002 s	0,00010 s	0,34992 s	1,71468 m/s
0,8 m	0,40414 s	0,00016 s	0,40398 s	1,98030 m/s
1,0 m	0,45192 s	0,00022 s	0,45170 s	2,21386 m/s
1,2 m	0,49508 s	0,00029 s	0,49479 s	2,42527 m/s

La valeur de l'accélération dans le vide est alors donnée par une régression linéaire sur la fonction $x/t = g/2t + v_0$. On obtient alors $g = 9,8036 \text{ m.s}^{-2}$ ou $g = 9,8029 \text{ m.s}^{-2}$ si on tient compte du point (0,0).



CONCLUSION

L'étude qui vient d'être présentée peut être faite au cours d'une séance de travaux pratiques collectifs. Il suffit d'avoir du matériel en parfait état et de régler très soigneusement les distances de façon à ce que l'erreur ne puisse pas dépasser 0,2 mm. On pourra s'aider de différentes techniques optiques ou à base de contacts électriques pour effectuer ce réglage. Il faudra également contrôler la température car la dilatation du banc risque d'intervenir surtout s'il est en aluminium.