

DE LA MESURE DU TEMPS A LA MÉTHODE DE LA RECHERCHE

par F. GONSETH
professeur honoraire de l'École Polytechnique Fédérale

QU'EST-CE QU'UNE HORLOGE?

Lorsqu'on examine les exigences à remplir pour mesurer les durées avec une très haute précision, on voit se poser un certain nombre de difficultés qui ne sont pas toutes du même ordre. Les unes sont de caractère technique ou même technologique, et les autres de caractère théorique : il en est d'autres enfin qui touchent au principe même de la recherche scientifique, qui sont par conséquent de caractère méthodologique. A les voir ainsi clairement nommés on pourrait penser que ces différents ordres de difficulté, sont indépendants les uns des autres et que pour en venir à bout, il faut tout d'abord veiller à les tenir bien séparés. Mais cette idée ne résiste pas à une analyse un peu serrée de ce que nous appellerons plus loin le *problème des hautes précisions*. Il se révèle au contraire que les difficultés à surmonter sont liées les unes aux autres et qu'il faut les aborder comme un tout. C'est, tout au moins nous l'espérons, ce qui ressortira des lignes qui vont suivre. Mais pour y parvenir, il faut sur certains points revenir aux fondements et poser certaines questions au niveau le plus élémentaire. La première de ces questions est précisément la suivante : qu'est-ce qu'une horloge ?

Au premier moment, on jugera peut-être que c'est là une question à laquelle il est très facile de répondre. N'est-ce pas simplement, dira-t-on peut-être, une machine, c.-à-d. un instrument à mesurer le temps ? Mais à la réflexion on s'apercevra bien vite que cette réponse ne nous avance guère. Bien sûr, une horloge, ce doit être, ce devrait être un instrument à mesurer le temps. Mais, en parlant ainsi, ne s'abuse-t-on pas sur le sens, sur le contenu d'information

des mots dont on se sert ? Est-il bien sûr qu'on sache exactement ce que le mot temps et le mot mesurer peuvent signifier avant qu'on ait construit une horloge ? On se prend à en douter lorsqu'on voit les difficultés que les physiciens et les praticiens de la mesure du temps ont eux-mêmes à tomber d'accord à ce propos. C'est pourquoi il n'est pas inutile de reprendre la question et de chercher à lui donner la réponse à la fois la plus élémentaire et la plus générale possible. Cette réponse, la voici :

De façon générale, une horloge est simplement un phénomène bien observable dont on connaît la loi temporelle.

Un phénomène évolue, se déroule en une suite d'états. On le dira bien déterminé et bien observable, si chacun de ces états est lui-même déterminé par un certain nombre de grandeurs observables. Ainsi, le déplacement d'une planète sur la voûte céleste constitue un phénomène bien observable. A chaque instant, on peut déterminer par observation les coordonnées astronomiques qui en fixent la position (à l'aide de visées pour lesquelles certaines étoiles fixes pourront servir de repères).

On ne suppose pas que les observations puissent être faites avec une précision absolue. Leur exactitude n'est assurée qu'avec une certaine marge d'erreur dépendant de la nature, de la facture et du maniement des instruments ainsi que de certaines circonstances accessoires souvent impossibles à éliminer. C'est ainsi que la précision des visées astronomiques est toujours affectée d'un certain coefficient d'incertitude, dû aux mouvements aléatoires de l'atmosphère. La situation normale, c'est donc qu'un ensemble de mesures ne puissent pas être faites avec une précision supérieure à un certain plafond, ce dernier restant d'ailleurs lié à l'avancement des techniques qu'on est à même de mettre en œuvre.

Nous dirons plus simplement que, dans toute situation, l'observation d'un phénomène ne dépasse pas un certain niveau de précision qui dépend à la fois du phénomène et de la situation.

Lorsqu'un phénomène est bien observable, on peut en dresser des tables observationnelles. Supposons par exemple que l'état d'un phénomène soit fixé par les valeurs de deux grandeurs, de deux paramètres λ et μ . Supposons ensuite qu'on ait fait une série d'observations aux temps successifs $t_1, t_2, t_3...$ et t_n et que les valeurs observées aient été $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3... \lambda_n$ d'une part et $\mu_1, \mu_2, \mu_3... \mu_n$ d'autre part. On pourra dresser une table observationnelle correspondant à cette série d'observations en portant les valeurs successives de t dans une

première colonne, et celles des λ et des μ dans une seconde et dans une troisième colonne, les trois valeurs correspondantes de t , λ et μ se trouvant naturellement sur une même ligne.

Nous n'insisterons pas sur le fait que, *pour étudier un phénomène*, il ne suffit pas en règle générale de dresser la table observationnelle correspondant à une seule série d'observations.

Quand dira-t-on maintenant que l'on connaît la *loi temporelle* d'un phénomène, de celui dont il vient d'être question par exemple ? IL suffira dans ce dernier cas que les paramètres λ et μ (qui fixent l'état du phénomène) soient des fonctions connues, des fonctions données de la variable t , cette dernière fixant à chaque instant la mesure du temps qui s'est écoulé à partir d'une certaine *origine des temps*.

Quelle est par exemple la loi temporelle du phénomène de la chute libre des corps dans le vide et dans un champ de pesanteur constant ? Dans ce cas, un seul paramètre suffit pour fixer l'état du phénomène, la valeur de la coordonnée s déterminant la position du centre de gravité du mobile sur sa trajectoire verticale. En choisissant convenablement les origines des t et des s , la loi temporelle en question est donnée par la formule bien connue :

$$s=1/2 g.t^2$$

dans laquelle g représente la constante de la gravitation.

Revenons au cas général, c.-à-d. à ce qu'il suffit d'en dire pour ce que nous avons à expliquer, au cas où l'état du phénomène est déterminé par les valeurs des deux paramètres λ et μ . Ces deux derniers sont alors - nous l'avons déjà dit - des fonctions données de t .

$$\lambda=\phi(t) ; \mu=\psi(\tau)$$

Fixons maintenant une série $t_1, t_2, t_3 \dots t_n$ de temps à venir : les équations précédentes vont nous permettre de calculer les valeurs $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_n$ et $\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots \mu_n$ correspondantes. Ni la série des λ ni celle des μ ne se présente maintenant comme plus haut en tant qu'observations déjà faites, mais en tant que prévisions fournies par le calcul à partir de la loi temporelle. Rien ne nous empêche cependant de dresser, à partir de ces trois séries de valeurs (des t , des λ et des μ dont il vient de s'agir), une table tout à fait analogue à la table observationnelle dont il a été question plus haut. Pour en souligner la nouvelle signification, nous l'appellerons une table prévisionnelle.

Ces précautions une fois prises, il est facile de comprendre comment un phénomène bien observable, complété par une table prévisionnelle bien faite,

peut servir d'horloge. Il suffira de mesurer les valeurs de λ et de μ qui fixent l'état du phénomène. (Il pourra même suffire de mesurer la valeur de l'un seulement des deux paramètres). Supposons que ces valeurs soient λ et μ . Il ne s'agit plus alors que de déterminer la valeur t^* de la variable t qui leur correspond. Deux cas peuvent se présenter :

- A. λ^* et μ^* sont les valeurs exactes qui figurent sur une ligne de la table prévisionnelle. t^* est alors la valeur de t inscrite sur la même ligne qu'elles et peut être lu immédiatement.
- B. λ^* et μ^* se placent l'un et l'autre entre deux valeurs de la table prévisionnelle qui fournit les deux valeurs de t correspondantes. La valeur t^* doit être comprise entre celles-ci. On la déterminera par une procédure d'interpolation qui peut être préparée à l'avance.

Bien entendu, la table prévisionnelle ne représente que l'un des moyens, par lesquels il est possible de résoudre par rapport à la variable t les relations qui formulent la loi temporelle du phénomène. Elle pourrait être remplacée dans ce rôle par l'un ou l'autre des nombreux moyens dont on dispose, qu'ils soient numériques, graphiques, métalliques ou même électroniques. De toute façon, quelque soit le phénomène sur le déroulement duquel une horloge se fonde, celle-ci doit fatalement comporter un dispositif permettant d'utiliser à titre prévisionnel la loi temporelle de ce phénomène. Pour les besoins de l'explication, la table prévisionnelle a l'avantage de mettre ce dispositif bien en évidence. Bien entendu, il ne s'agit pas là d'un avantage pratique. Celui qui en tire vraiment parti, c'est celui qui cherche à dégager l'idée générale de l'horloge, idée dont les montres et les horloges de tous les types ne sont que des réalisations particulières. Et pourtant, celui qui cherche à montrer comment l'idée générale de l'horloge ainsi dégagée, peut être réalisée dans telle ou telle horloge particulière n'est pas encore au bout de ses explications. IL doit encore faire face à une difficulté dont l'importance de principe devrait être bien mise en évidence si l'on ne veut pas être arrêté par la suite chaque fois qu'on franchit un seuil de précision ([note 1](#)).

Il se heurte en effet à un paradoxe que la pratique a commencé par surmonter sans presque s'en apercevoir, mais qui devient gênant lorsqu'on s'avance vers les exigences de la haute précision. Longtemps l'effort de clarification méthodologique s'y est achoppé. Nous verrons plus tard comment il peut être surmonté. Le voici brièvement exposé :

Pour établir une horloge, il faut savoir utiliser la loi temporelle d'un phénomène relativement ([note 2](#)) bien déterminé et bien observable.

Mais comment peut-on prendre connaissance de cette loi temporelle ? Elle doit être dégagée ou du moins vérifiée par l'observation du phénomène. Les tables observationnelles ne sont qu'une façon de présenter les résultats d'une telle observation. Mais ces tables pour être établies nécessitent le concours d'une horloge déjà en état de fonctionner. En bref : l'établissement d'une horloge présuppose la connaissance de la loi temporelle d'un phénomène et celle-ci présuppose à son tour, du moins à partir d'un certain niveau de précision, l'existence d'une horloge antérieure. Dans ces conditions, comment la construction pratique des horloges a-t-elle commencé et comment peut-elle se poursuivre en satisfaisant aux exigences croissantes des hautes précisions ? C'est là une question dont la réponse ne s'offre pas d'elle-même. Nous la reprendrons au cours de notre prochain article.

Note 1 Cette dernière expression se trouvera elle-même précisée par la suite.

Note 2 C'est-à-dire avec une précision qui peut dépendre à la fois du phénomène et des moyens de l'observer.