

Comment franchir un seuil de précision

Dans notre précédent article, nous avons traité le cas de l'horloge privilégiée. Dans une situation dont les moyens techniques permettent d'atteindre (momentanément et provisoirement peut-être) un certain niveau de précision, nous avons dit qu'une horloge H est privilégiée s'il n'existe aucune autre horloge qui en atteigne la justesse et la précision. Mais comment peut-il être possible de reconnaître qu'une horloge déterminée répond à ces exigences ? Et comment peut-on se convaincre que le temps qu'elle mesure n'est pas conventionnel, qu'il ne lui est pas purement et simplement relatif, mais qu'il a tous les caractères d'un temps objectif ? Nous avons répondu à ces questions en étudiant l'exemple qui a revêtu et qui revêt encore une fonction toute particulière par rapport à l'industrie horlogère, celui de l'horloge-terre, l'horloge fournie par le mouvement de rotation de la Terre autour de son axe. Mais une horloge privilégiée dans une situation le reste-t-elle toujours, dans toute situation ultérieure ? Il n'y a pas que les spécialistes à savoir que l'horloge-terre n'est pas une horloge absolue, une horloge dont la marche n'offrirait ni variation à long terme, ni irrégularité à court terme. Mais comment le fait a-t-il été mis en évidence ? Comment a-t-il été possible d'installer et d'étalonner des horloges encore plus justes et encore plus précises, des horloges capables d'assumer encore mieux qu'elles le rôle d'une horloge privilégiée ? Tant qu'on attribue à une horloge déterminée H (ou à un certain type d'horloge) le rôle d'horloge privilégiée, on fixe un certain seuil de précision. Comment peut-il être possible de le franchir ? C'est là le problème que nous avons laissé en suspens dans notre précédent article. C'est la question qui se posait à propos de la situation B : l'horloge doit perdre son privilège au bénéfice d'un nouveau type d'horloge H' .

A peine a-t-on formulé cette question que les objections émises et surmontées à propos de la situation A s'élèvent à nouveau. Il n'y aurait aucune difficulté à munir H' de son échelle temporelle si l'on disposait pour le faire d'une horloge antérieure de haute qualité. De qualité au moins égale à celle de la nouvelle horloge. Mais cela n'est précisément pas le cas, sans quoi l'on ne franchirait pas le seuil de précision fixé par les horloges antérieures. Où

trouver les moyens de munir H' d'une échelle temporelle authentique et non d'une simple échelle conventionnelle ? Les moyens à mettre en œuvre ne font-ils pas défaut ?

On le voit, la situation donne à nouveau lieu à toutes les difficultés qui, une fois déjà, semblaient nous barrer le chemin. Pour exposer la méthode qui permet de les surmonter, nous nous servirons à nouveau d'un exemple, celui des horloges à quartz. Mais il nous faudra noter d'emblée une circonstance aggravante : c'est que le phénomène exploité par l'horloge à quartz est une oscillation dont la fréquence n'est pas constante. Dans le cas de l'horloge-terre, nous nous serions trouvés dans les mêmes circonstances si, sans attendre, nous avions voulu tenir compte du fait que le mouvement de rotation de la Terre autour de son axe n'est pas tout à fait uniforme. Ne disposant alors d'aucune autre horloge analogue à l'horloge-terre, nous nous serions trouvés dans une position très difficile à maîtriser. Pour bien élucider le cas des horloges à quartz, il faudra faire un pas de plus dans l'élaboration méthodologique de la procédure par laquelle on installe un phénomène dans sa fonction d'horloge. Pour bien indiquer que cette procédure n'a pas essentiellement recours à un autre phénomène que celui sur lequel l'horloge se fonde, nous l'appellerons une procédure d'autofondation.

Pour l'expliquer, nous allons commencer par faire un pas en arrière et poser à nouveau le problème central de l'horlogerie, celui de la fabrication d'une montre de qualité. Nous allons même nous placer dans une situation assez factice en nous demandant si cette fabrication eût été possible sans le concours de l'Observatoire astronomique (c'est-à-dire sans le concours de l'horloge-terre dans son rôle d'horloge H privilégiée). N'est-ce pas là, dira-t-on, une question assez gratuite : quel intérêt peut-il y avoir à « faire comme si » l'horloge-terre n'existait pas ? Cet intérêt est d'ordre méthodologique. En effet, la réponse à cette question jette une vive lumière sur les fondements mêmes de la mesure du temps et prépare la voie à ce qu'on pourrait appeler la méthodologie des hautes précisions. Voici cette réponse, précédée d'ailleurs de quelques considérations préliminaires.

L'industrie horlogère est toute basée sur l'exploitation d'un idéal théorique, celui de l'oscillation isochrone entretenue. Les lois de ce phénomène idéal résultent elles-mêmes d'une juste application des lois de la mécanique. La pratique de la fabrication d'une bonne montre est toute orientée par la

recherche des conditions permettant de réaliser au mieux, c'est-à-dire de mieux en mieux, le phénomène idéal.

La connaissance exacte des lois de la mécanique (de la mécanique dite classique) forme donc l'un des piliers de la science horlogère.

Mais d'où la connaissance des lois de la mécanique nous vient-elle ? Comment pouvons-nous être assurés que, telles que nous les connaissons, elles sont justes ? Pendant un certain temps, on a pu croire qu'il s'agissait là d'une science rationnelle, c'est-à-dire d'une science que l'esprit serait capable d'édifier à lui seul, sans le concours de l'expérience. Mais on sait aujourd'hui que les choses ne vont pas aussi simplement. La mécanique relativiste est entrée en compétition avec la mécanique classique et l'expérience a montré que, pour les masses (particules matérielles) animées d'une vitesse comparable à celle de la lumière, la première semble bien rendre adéquatement compte des phénomènes, tandis que la seconde s'en écarte irrémédiablement. D'un coup, la validité de l'une et de l'autre, et spécialement l'évaluation des circonstances dans lesquelles la mécanique classique reste pratiquement valable, tombe sous le verdict de l'expérience. Pour l'une et pour l'autre, il faut faire place à une activité observationnelle capable de décider si dans telle ou telle situation les lois fondamentales ou les conséquences qu'on en tire se vérifient ou non. Qu'à cela ne tienne, dira-t-on. Les techniques observationnelles sont aujourd'hui assez avancées pour qu'aucune difficulté de principe ne vienne mettre un tel programme en échec. Or, c'est ici que surgit l'obstacle qui, certes, n'est pas resté inaperçu, qu'on a pratiquement surmonté, mais dont jusqu'à ces derniers temps on n'a pas fait le tour de façon pleinement consciente. Pour éprouver les lois de la mécanique, disions-nous, il faut mettre en œuvre une activité observationnelle capable de les prendre comme objets d'expérimentation. Mais les plus essentielles des lois à mettre à l'épreuve, celles de la dynamique, ne sont pas indépendantes du temps. Il faudra donc que, parmi les instruments à disposition, il y ait au moins une horloge d'une qualité suffisante. Or, nous venons de l'expliquer, la fabrication d'une telle horloge présuppose les lois de la mécanique. En bref, *la fabrication d'une horloge de qualité présuppose la connaissance des lois de la mécanique, dont la mise à l'épreuve présuppose à son tour l'existence d'une horloge qualité.* L'obstacle révèle ainsi sa nature: il est de caractère méthodologique. C'est une variante du paradoxe auquel plusieurs fois déjà nous avons fait allusion. Il ne faut pas s'étonner de le rencontrer à nouveau : il tient à une conception très superficielle et très insuffisante du rôle

de l'instrument dans l'activité de la recherche. Tant que cette conception n'aura pas été révisée, le paradoxe resurgira sous une forme ou sous une autre. Et chaque fois, il projettera une certaine ombre d'incompréhension sur les démarches averties des meilleurs praticiens.

Puisque cet obstacle méthodologique n'arrête pas le praticien, son élucidation n'est-elle pas superflue ? On peut comprendre, dira-t-on, que le philosophe de la connaissance veuille ne pas laisser la question dans l'ombre ; mais le praticien peut-il y trouver aussi son compte ? En lui demandant d'éclaircir pour lui-même ce point de méthode, n'exige-t-on pas de lui un effort inutile ? Ce serait peut-être le cas, si le praticien de la mesure du temps - et plus généralement le praticien de la recherche - n'avait aucune position méthodologique et s'il pouvait, sans aucun désavantage, se passer d'en avoir une. En fait, même s'il se dit empiriste, le praticien épouse dans leurs grandes lignes les vues traditionnelles sur les rapports de l'expérience et de la théorie. Il lui arrive cependant de s'aventurer à leur être infidèle : il le fait fatalement chaque fois qu'il franchit un seuil de précision. Le succès le rassure. Mais ses démarches ne gardent-elle, pas pour lui-même une certaine opacité ? Et celle-ci n'aura-t-elle pas pour lui le double effet de l'éloigner encore davantage de toute préoccupation méthodologique et de lui créer un certain sentiment d'insécurité ? En fait, le praticien n'échappe pas plus que tout autre chercheur à la règle commune : *à la longue, rien ne remplace une « bonne conscience méthodologique. »* Dans d'autres cas, le paradoxe que nous venons de rappeler et que bien d'autres ont déjà signalé représente un véritable point névralgique. Mais comment s'en libérer ? Il suffit, nous l'avons déjà fait pressentir, de se faire une idée juste de la façon dont l'instrument s'insère dans l'activité de la recherche.

En fait, si l'on veut bien prendre la peine d'y songer, la chose ne comporte pas de difficulté. On sait que l'avènement de la méthode dite expérimentale, (c'est-à-dire le recours systématique à l'observation et à l'expérimentation) a marqué un tournant décisif dans le développement de la recherche scientifique. On fit alors place, à côté des *disciplines déductives* telles que les mathématiques, aux *disciplines inductives* dont les faits primordiaux doivent trouver leur garantie dans l'expérience. Les premières fournissaient des vérités de raison, les secondes des vérités de fait. Les lois naturelles telles que la loi de la pesanteur étaient en particulier considérées comme des vérités de fait. Comment pensait-on pouvoir les découvrir ? On

commença par s'en faire une idée beaucoup trop simple. Il suffisait, pensa-t-on, de dresser ce que nous avons appelé des tables observationnelles de l'évolution de tel ou tel phénomène. Une certaine faculté généralisatrice (telle une logique inductive) devait alors être capable d'y apercevoir la loi de cette évolution. L'application généralisée des mathématiques aux sciences exactes telles que la physique, la chimie, la cristallographie, devait sans doute conduire à des vues moins élémentaires - disons même moins arbitrairement simples.

Aujourd'hui, l'opposition de l'inductif au déductif ne revêt plus qu'une signification assez vague. Elle a fait place à un principe de dualité qui met en face l'une de l'autre et en accord l'une avec l'autre, dans un équilibre toujours renouvelé, une activité théorique qui dégage, imagine, formule les lois en langage exact et une activité expérimentale qui les met à l'épreuve et qui, si tout va bien, les vérifie et les confirme. On remarquera cependant que ni dans ce que nous avons dit tout d'abord de l'opposition de l'inductif au déductif, ni dans ce que nous venons d'ajouter sur le principe de dualité qui allie le théorique et l'expérimental, il n'est fait la moindre mention de l'instrument. C'est là précisément que se trouve la lacune à combler. Il ne s'agit pas de renverser une perspective dont tout fait penser qu'elle est bien établie, il s'agit simplement de la compléter, mais il importe de le souligner, sur un point d'une importance particulière.

Il est maintenant temps de revenir à notre exemple. Lorsque, ayant édifié la mécanique sous sa forme mathématique, on entreprend de la vérifier expérimentalement en effectuant des séries d'observations choisies à cet effet, on reste dans le cadre du principe de dualité dont il vient d'être question. Mais alors, si l'on ne fait pas de faute de méthode, comment expliquer le paradoxe auquel on se heurte inévitablement ? C'est que, si l'on ne pêche pas par erreur, on pêche par omission. On omet de prendre garde au fait que les observations ne peuvent pas être faites sans un instrument approprié. On parle comme si, dans notre cas, l'horloge d'observation, dont on ne saurait se passer, était par avance toute faite et toute prête, à la disposition de l'observateur. On semble oublier que cette horloge n'est pas tombée du ciel, mais qu'elle a dû être fabriquée de toutes pièces et qu'elle n'a pu l'être que par une audacieuse anticipation, en posant comme justes les lois de la mécanique qu'elle servirait à soumettre à l'observation.

Il suffit d'avoir mis ainsi le doigt sur le mal pour que le remède vienne immédiatement à l'esprit : il faut faire entrer l'instrument dans le jeu. Ce sera

maintenant un jeu à trois : on commencera par bien spécifier que tout se joue à un certain niveau de précision, au niveau garanti par la qualité de l'ensemble des moyens mis en œuvre. En toute rigueur, c'est à ce niveau-là et non à un niveau de précision quelconque et encore jamais atteint que les résultats pourront sortir confirmés de cette épreuve à trois. Il est vrai que dans la pratique il n'est pas possible d'en limiter ainsi la portée. On les tient pour valables « jusqu'à nouvel informé ». Mais il ne s'agit alors que d'une anticipation plausible et non d'une certitude garantie. Jamais on ne pourra prétendre sans risque de démenti que ce qui s'est révélé juste à un certain niveau de précision le restera sans changement à tout niveau ultérieur. Ce qui ressort au contraire des progrès de la science moderne, c'est qu'il peut suffire d'un degré de plus dans la précision pour que de profondes révisions, allant parfois jusqu'aux principes, deviennent nécessaires.

Les trois partenaires du jeu de la mise à l'épreuve des anticipations seront donc les suivants : le théoricien, qui fournit les énoncés à essayer, l'expérimentateur responsable de tout le secteur observationnel et le technicien, dont dépend la fabrication et la mise au point des instruments. Bien sur, les activités de ces trois personnages ne sont pas strictement séparables. Comment pourraient-ils coordonner leurs efforts s'ils ne travaillaient pas sur un front commun ? Ils sont les trois à la fois au bénéfice des situations antérieures. Ils sont attachés à trois aspects d'une entreprise commune. Disons mieux : ce sont là trois personnages théoriques qui, dans une certaine mesure, doivent être présents, incarnés dans toute personne réelle participant à l'entreprise.

Ce qui se trouve mis à l'épreuve, c'est une œuvre communautaire dont en principe aucun aspect n'est privilégié. En cas d'échec, les trois aspects seraient remis en cause sans qu'on sache d'avance lequel des trois devrait être incriminé et si tous ne devraient pas l'être à la fois. Mais c'est surtout le bénéfice du succès qui reviendrait à tous à la fois. Pour ce qui concerne le théoricien et l'expérimentateur, on a déjà dit mille et mille fois que leurs sorts sont liés dans le succès comme dans l'insuccès. Pour nous, ce qu'il nous faut spécialement relever, c'est la part essentielle qui revient à celui qui, fournissant l'instrument, en assure la qualité. L'instrument est le lieu privilégié où la théorie et l'expérience se rencontrent, se joignent et s'accordent. Sous cet angle, le fait qu'une bonne montre peut être fabriquée doit être interprété à lui seul comme un sûr témoignage de la justesse des lois de la mécanique.

Si l'on complète la méthode expérimentale comme il vient d'être expliqué, c'est-à-dire *en adoptant la conception selon laquelle c'est l'expérience qui valide en définitive ou ne valide pas, sous leurs trois aspects conjoints, les résultats de l'effort en commun, le paradoxe ne peut plus être reconstruit, il s'évanouit.*

Nous posons la question : le concours de l'Observatoire astronomique est-il nécessaire, en principe, pour garantir la bonne marche d'une montre ? En d'autres termes, l'industrie horlogère ne pourrait-elle pas s'organiser en vue de son autofondation ? (Qu'on nous comprenne bien, il ne s'agit aucunement d'examiner si pratiquement la collaboration de l'Observatoire pourrait être écartée. Nous avons trop insisté sur son importance dans notre article précédent pour qu'il puisse y avoir le moindre doute à cet égard.)

La question a son importance parce que maintenant il est facile d'y répondre et qu'on prépare ainsi la réponse dans les cas en apparence beaucoup plus difficiles. Pour que tous les éléments d'une autofondation soient réunis, il faut donc, de façon générale :

- a) une hypothèse à vérifier,
- b) un programme d'observation aux fins de cette vérification,
- c) des instruments appropriés dont les procédés de fabrication (au cas qui nous occupe) reposent par anticipation sur la validité de l'hypothèse.

Pour ce que nous avons en vue, voici comment les trois éléments pourraient être désignés :

- a) nous retrouverions ici les lois de la mécanique, pour autant qu'elles soient présumées dans les procédés de fabrication d'une montre de qualité ;
- b) le phénomène observé ne serait rien d'autre que la marche d'une montre, le programme d'observation pouvant être répété sur cette montre ou sur une autre ;
- c) l'instrument d'observation serait fourni par une batterie de montres de fabrication homogène.

Nous renoncerons à examiner par le détail comment la mise à l'épreuve pourrait être conduite. Pour l'horloger, le fait significatif serait le suivant : *il pourrait élever au rang d'un critère de bonne fabrication le fait que la marche des montres d'observation se trouverait bien groupée autour d'une marche moyenne.*

Peut-être trouvera-t-on ces explications préliminaires un peu longues. Nous pensons cependant que c'est là le chemin le plus sûr (et peut-être aussi le

plus court) pour justifier la façon dont on procède dans les horloges de haute précision. Nous allons traiter comme exemple le cas des horloges à quartz. Nous pourrions maintenant le faire brièvement. Reprenons le schéma dans lequel les trois ordres d'éléments cités plus haut doivent être réunis.

Le phénomène qu'on se propose d'exploiter est le suivant : sous l'effet d'une impulsion électrique, un cristal de quartz, convenablement taillé vibre avec une très haute fréquence. Cette vibration s'accompagne entre les faces opposées du cristal de l'apparition d'une différence de potentiel oscillant avec la même fréquence. Cette différence de potentiel peut servir à produire, dans un circuit et toujours avec la même fréquence, une série d'impulsions électriques. Par un dispositif approprié, le nombre de celles-ci est enregistrable.

Si le cristal vibrait avec une fréquence constante, le nombre de ses oscillations fournirait une mesure du temps très précise ; plus précise que celle des meilleurs chronomètres. Mais, circonstance aggravante, cette fréquence n'est pas constante. Au degré de précision « antérieur », c'est-à-dire avec une précision que les horloges à quartz devront justement dépasser, cette fréquence présente après un certain temps de fonctionnement une *dérive constante*. Cela veut dire que la fréquence décroît, proportionnellement au nombre de vibrations effectuées. Si l'on connaissait la valeur précise de cette dérive, en même temps que celle de la fréquence en un instant déterminé, la loi temporelle du phénomène pourrait être facilement établie. En principe (comme nous l'avons expliqué dans notre premier article) cette loi temporelle équivaldrait à une horloge. La solution ainsi proposée passe cependant à côté du problème réel, car les valeurs de la fréquence et de la dérive ne seraient fixées qu'au niveau de la précision antérieure. Il en serait d'ailleurs de même de la loi fondamentale et tout spécialement de la constance de la dérive. On n'aurait pas franchi le seuil de précision. Au premier jugé, les difficultés de principe paraissent inextricables. Notre schéma permet cependant de les surmonter de façon relativement aisée.

a) On fait donc l'hypothèse fondamentale que le phénomène à exploiter réalise le modèle mathématique d'une oscillation à dérive constante.

La validité de l'hypothèse et les valeurs des constantes qui y figurent sont à engager dans une expérimentation appropriée, la première pour être confirmée, les secondes pour être déterminées. L'expérimentation devra prendre place au-delà du seuil de précision. Seront d'ailleurs remises conjointement à l'épreuve toutes les autres lois physiques présumées dans la

réalisation technique de l'horloge à quartz. Nous n'insisterons pas sur ce dernier point. La structure elle-même de l'horloge peut être saisie par analogie avec celle d'une horloge ordinaire. Elle n'offre aucun point qui ne puisse être immédiatement compris.

b) Sur les bases théoriques précédentes, on peut imaginer un certain programme d'observation simultanée de deux horloges ; les calculs faits à partir des résultats de ces observations permettent de déterminer les fréquences (en un instant déterminé) et les dérives de ces deux horloges.

On est ainsi mis en mesure d'écrire les lois temporelles de l'une et de l'autre de ces deux horloges, dont chacune fournit ainsi une « horloge authentique ».

c) La clef de voûte de la procédure est enfin fournie par l'épreuve mutuelle de synchronicité d'une batterie d'horloges. Si cette épreuve réussit (dans les limites de la précision visée et ne fût-ce que pour deux horloges), un raisonnement basé sur le calcul des probabilités, le raisonnement par l'improbable, permet d'écarter les horloges aberrantes ou impropres.

La procédure d'autofondation est alors terminée. Ainsi se trouve réalisé le tour de force métrologique consistant à franchir un seuil de précision en construisant les horloges authentiques par l'unique intermédiaire d'horloges systématiquement inexactes - et à justifier en même temps le bien-fondé de toute la procédure mise en œuvre à cet effet.

Il est clair que l'application de la procédure d'autofondation ne se limite pas à l'exemple précédent. Elle doit être invoquée chaque fois qu'on franchit un seuil de précision, non seulement pour la mesure du temps, mais pour toute autre sorte de mesure. Elle peut l'être aussi lors de la mise en service de tout nouvel instrument ou de tout nouveau système de mesure.

Le lecteur aura certainement relevé que les considérations présentées au cours des quatre articles dont le dernier s'achève ici, tournent toutes autour de certains points de méthode. Nous pensons qu'il est dans l'intérêt du pragmatiste le plus délibéré d'en avoir fait le tour. Mais, pour peu qu'on les prenne au sérieux, ces considérations portent encore plus loin. Elles mènent tout droit à une certaine clarification de l'idée qu'il convient aujourd'hui de se faire de la méthode de la recherche. Nous en dirons encore quelques mots dans un cinquième et dernier article, estimant que le praticien devrait être des premiers à se mettre au bénéfice d'une telle clarification.