CAHIERS
FRANÇOIS VIETE

Série I – N°3

2002

Varia

Centre François Viète
Épistémologie, histoire des sciences et des techniques
Université de Nantes

Achevé d'imprimer sur les presses de l'imprimerie centrale de l'université de Nantes, février 2003
Mise en ligne en juillet 2017 sur www.cfv.univ-nantes.fr

SOMMAIRE

Cahiers François Viète, 3, 2002, 3-14

LES PARADOXES DE LA RELATIVITÉ*

Sylviane BIDAL

Résumé
Par la lecture des principales questions soulevées et les réponses apportées par les deux paradoxes les plus connus issus de la théorie de la relativité, nous nous proposons, dans ce qui suit, de répondre à la question suivante. Le paradoxe des jumeaux et le paradoxe d'Ehrenfest mettent-ils en valeur, comme c'était leur vocation première, une contradiction entre les conséquences immédiates de la théorie de la relativité et le principe de relativité ?

1. Les paradoxes et la relativité

Lorsqu'Alphonse Berget rédige un article pour le *Larousse* de 1923 ("Le ciel"), il ne se montre guère convaincu par la théorie de la Relativité, pourtant établie depuis 1905 pour la Relativité restreinte et 1915 pour la théorie généralisée ; il pense qu'elle ne vivra que "l'espace d'un matin". Il résume brièvement un aspect de la théorie qui lui semble complètement absurde :

> "Je ne fais que mentionner la "fantaisie" d'un relativiste militant, imaginant un voyageur quittant notre globe dans un véhicule animé d'une vitesse très voisine de celle de la lumière, restant deux ans en route, et, après ces deux ans, revenant sur la Terre, qu'il trouverait vieillie de deux cent ans, tout en n'ayant lui-même vécu que deux années de son existence : c'est du domaine de la plaisanterie.» [LC]

Force nous est de constater que la plaisanterie dure depuis bientôt un siècle, puisque le phénomène décrit, s'il était réalisable, serait tout à fait

---

* Conférence donnée le 30 octobre 2001 au Centre François Viète.

avéré. Ce phénomène, qui revient à une dilatation du temps, est aujourd'hui admis par les physiciens. Bien sûr, sa formulation sous la forme d'une anecdote étrange – un voyageur enfermé dans un boulet atteindrait une vitesse proche de celle de la lumière – accentue le côté paradoxal du phénomène. C'est justement ce caractère paradoxal qui amène Alphonse Berget – et, avec lui, de nombreux auteurs – à rejeter l'ensemble de la théorie de la relativité, d'autant plus que ce paradoxe, appelé "le voyageur de Langevin" (que l'on retrouve aussi sous les noms de "paradoxe des jumeaux" ou "paradoxe des horloges") n'est qu'un exemple des conséquences extraordinaires de la théorie, un exemple plus spectaculaire, plus connu, fort discuté. C'est surtout par des énoncés de ce type que le grand public et aussi les non spécialistes, savants dans d'autres domaines, ont pris connaissance de la théorie. Tout livre de vulgarisation aborde la théorie de la relativité par ses paradoxes.

Étudier ces paradoxes, c'est donc saisir la Relativité dans ce qu'elle a de plus curieux par rapport à notre expérience quotidienne, par rapport aux notions et aux idées que nous utilisons chaque jour, mais c'est aussi percevoir un aspect historique de la théorie, puisque c'est par les paradoxes que la Relativité s'est présentée comme une théorie inévitablement polémique.

En quoi ces énoncés sont-ils paradoxaux ? Pourquoi ont-ils donné lieu à tant de polémiques ? Est-ce par eux que la Relativité se trouvera – peut-être – reniée ? Voilà des questions qui se trouvent présentes chaque fois que l'on croise un "paradoxe" et que nous allons maintenant rapporter à deux paradoxes fort discutés et présents dès les débuts de la relativité restreinte : "le paradoxe d'Ehrenfest" et "le paradoxe des jumeaux". Chacun d'eux semble, dans un premier temps, mettre en contradiction une conséquence de la théorie avec le principe de relativité.

2. Le paradoxe d'Ehrenfest

Ce que nous nommons ici "paradoxe d'Ehrenfest" est directement lié au phénomène de la contraction des longueurs, que nous allons aborder.

2.1. Contraction des longueurs et paradoxe

La contraction des longueurs est une conséquence immédiate de la théorie de la relativité restreinte.

2.1.1. Contraction des longueurs

Selon la Relativité restreinte, une longueur l_0, mesurée dans un système au repos S_0, subit une contraction lorsqu'elle est en mouvement par rapport à ce premier système au repos (contraction d'autant plus forte que la vitesse s'approche de celle de la lumière). Si nous appelons l cette même longueur, mais en mouvement, nous avons

$$l = \sqrt{1-\beta^2} = l_0 \sqrt{1-v^2/c^2} .$$

Ceci signifie qu'un observateur, placé en S_0 (en repos dans S_0), verra l raccourci par rapport à l_0.

Pour l'instant, nous avons donc l'affirmation qu'une longueur en mouvement subit une contraction dans le sens du mouvement (dans le cas où sa vitesse est proche de celle de la lumière), mais avons-nous pour autant un paradoxe ? Tout ceci est, effectivement, fort surprenant ; ceci nous dérange, nous qui ne constatons aucun phénomène de ce genre dans notre vie quotidienne. Ceci est donc "para doxa", contre l'opinion commune, mais cet aspect extraordinaire, même s'il permet d'attirer l'attention sur le phénomène, ne justifie pas à lui seul tous les développements qu'il a connu.

En effet, un paradoxe n'est pas seulement ce qui est difficile à appréhender, c'est aussi ce qui manifeste une contradiction. En quoi la contraction des longueurs semble-t-elle mettre à jour une contradiction interne à la théorie ?

2.1.2. Principe de relativité et contraction des longueurs

Afin de mieux comprendre à quel moment apparaît le paradoxe, nous considérons simplement le même phénomène, mais observé de points de vue différents.

Prenons deux règles l_0 et l, respectivement fixes dans les systèmes S_0 et S, ces deux règles glissent l'une sur l'autre avec la vitesse v. La longueur est, par hypothèse, la même pour les deux règles. Si nous appliquons la loi de contraction des longueurs vue précédemment, chaque système voit la règle mobile plus courte que la règle fixe. Ainsi, un observateur en S_0 verra l plus courte que l_0 alors qu'un observateur en S verra l_0 plus courte que l.

Le problème apparaît lorsqu'on se pose les questions suivantes. Qui effectue la mesure exacte, l'observateur placé en S_0 ou celui placé en S ? Le raccourcissement est-il réel ou apparent ? Combien mesure, en réalité, la règle ? C'est lorsqu'on veut considérer les deux points de vue en même temps ou lorsqu'on veut trancher entre les deux perspectives que se pose le problème.

C'est ici que se situe le nœud du problème, car la Relativité nous enseigne justement que nous devons renoncer à vouloir rassembler les points de vue. Nous ne devons pas plus nous étonner de ce phénomène que de celui de la perspective, auquel nous sommes si habitués dans notre quotidien : lorsque nous nous éloignons d'une tour, elle devient plus petite pour nous. C'est un fait que nous ne pouvons nier. En revanche, si quelqu'un est au pied de cette même tour et la mesure, sa dimension ne change pas pour lui. La différence qu'il y a entre notre mesure et celle de l'observateur immobile est la manifestation du mouvement relatif de l'observateur. De même, le raccourcissement de la longueur mesurée en S (ou S_0) est la manifestation du mouvement relatif de l'observateur.

La question de savoir si le raccourcissement est réel ou apparent doit être dépassée : le raccourcissement est à la fois réel (puisqu'effectif) et apparent (puisque relatif à l'observateur).

Le problème est ainsi surmonté.

2.2. Le paradoxe d'Ehrenfest

Cependant, nous n'échappons pas à de nouvelles difficultés qui ont fait couler beaucoup d'encre. En effet, la nouveauté de cette conception des longueurs va se répercuter sur d'autres questions faisant appel à d'autres propriétés physiques. Nous prendrons, à ce titre, l'exemple de ce que nous appelons "le paradoxe d'Ehrenfest".

2.2.1. Einstein en 1905

On trouve une première formulation du paradoxe – mais non en termes de paradoxe – dès 1905, dans l'article fondateur de la théorie d'Einstein :

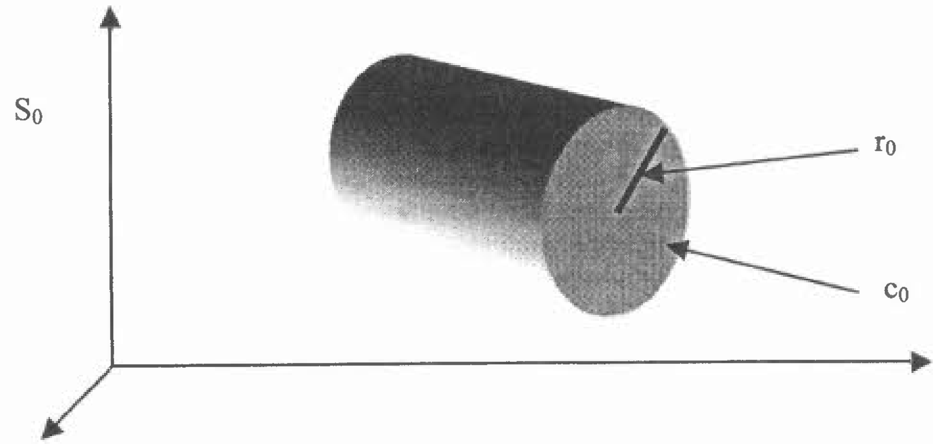
> "Un corps rigide qui, lorsqu'il est mesuré à l'état de repos, a la forme d'une sphère, a donc, lorsqu'il est dans un état de mouvement – considéré depuis le système au repos - , la forme d'un ellipsoïde de révolution dont les axes ont pour longueurs :
>
> $$\left(R\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}, R, R\right).$$
>
> [...] Pour v = V, tous les objets en mouvement – considérés depuis le système "au repos" - s'aplatissent jusqu'à n'être que des surfaces". [E.C.M. p. 43]

Nous avons donc ici une déformation d'un corps dit "rigide", or un corps rigide, non élastique, soumis à de telles conditions, doit céder. Si nous pouvons accepter assez facilement qu'un même objet soit vu d'une manière déformée par un observateur et non par un autre, nous acceptons moins facilement qu'un observateur le voie rompre mais pas l'autre.

2.2.2. Formulation en 1909 : le paradoxe d'Ehrenfest

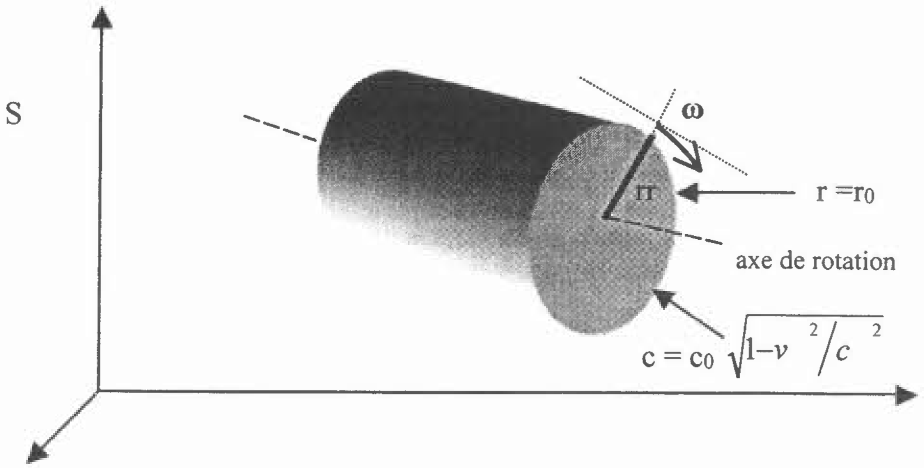
Ce sujet devient un paradoxe à partir de sa formulation par Ehrenfest en 1909.

Prenons le même problème, appliqué à d'autres objets, par exemple un cylindre. Le rayon du cylindre est r_0 lorsqu'il est au repos :



r est le rayon du même cylindre vu par un observateur par rapport auquel le cylindre est animé d'un mouvement de rotation uniforme (de vitesse angulaire ω) autour de son axe[1], ce qui donne la figure de la page suivante :

[1] On ne peut ignorer ici qu'il ne s'agit pas d'un mouvement rectiligne uniforme, le sujet ne dépend donc pas de la relativité restreinte, mais il doit être étudier selon la relativité générale.



Le cylindre doit obéir à deux exigences contradictoires :
- chaque élément de la circonférence, qui est animé d'une vitesse $r\omega$ dans sa propre direction, doit subir la contraction de Lorentz ($2\pi r < 2\pi r_0$)
- si on mesure le rayon, et non la circonférence, il n'y a pas de contraction, puisque le mouvement est à angle droit.

Par conséquent, vu du système au repos S_0, un disque ou un cylindre cédera. Il n'en sera rien pour un observateur en repos par rapport à lui. Qu'en est-il ? Cède-t-il ou non ?

Ce paradoxe ne trouvera une description suffisante qu'en 1919, c'est-à-dire après l'avènement de la Relativité générale, mais ce sera au prix de la notion de rigidité : si nous acceptons la conception relativiste de la contraction des longueurs, nous sommes amenés à adopter une nouvelle géométrie (dans un premier temps la géométrie riemannienne), et donc les corps "rigides" n'ont plus la forme immuable qu'ils avaient en géométrie euclidienne. La géométrie du disque, par exemple, doit être revue selon la géométrie riemannienne. Le paradoxe d'Ehrenfest, et surtout sa résolution, se trouve donc étroitement lié à l'avènement de la Relativité générale et l'adoption d'un espace courbe. Il peut donc être approfondi selon de nombreux points.

3. Le paradoxe des jumeaux

Le deuxième paradoxe concernant la Relativité que nous nous proposons d'exposer est le paradoxe des jumeaux : c'est souvent par lui que les auteurs ont voulu faire connaître la théorie aux non-spécialistes et au grand public. De nouveau, on en trouve l'origine dès 1905 dans l'article fondateur d'Einstein.

3.1. Einstein en 1905

Cette conséquence surprenante de la théorie est présentée de la manière suivante :

> "Si en deux points A et B se trouvent deux horloges au repos, synchrones du point de vue du système au repos, et si l'on déplace l'horloge située en A à la vitesse *v* le long de la droite qui joint A et B, alors, lorsque cette horloge arrive en B, les deux horloges ne sont plus synchrones ; celle qui s'est déplacée de A vers B retarde de ½ $(v/V)^2$ sur celle qui est en B depuis le début (à des quantités d'ordre supérieur ou égal à quatre près) – t étant ici le temps mis par l'horloge pour aller de A en B". [E.C.M. p. 42]

3.2. Principe de relativité et dilatation du temps

3.2.1. Formulation d'un paradoxe

De nouveau, nous pouvons remarquer que ce problème n'a pas été exprimé en 1905 par Einstein en termes de paradoxe. Il faut attendre 1911 et la formulation par Langevin pour que l'on emploie véritablement le terme de paradoxe.

Il est le plus souvent connu sous la forme suivante.

Imaginons deux jumeaux dont l'un partirait à travers l'espace pour un voyage à une vitesse élevée, proche de celle de la lumière, son temps serait ralenti par rapport à celui de son frère, resté sur Terre. À son retour, il se trouverait beaucoup plus jeune que son frère et pourrait même (pour un voyage assez long) retrouver les descendants de son frère. Comme dans l'article précédemment cité d'Alphonse Berget, deux ans vécus par le voyageur pourraient correspondre à deux cents ans sur Terre – selon les termes du paradoxe utilisés par Paul Langevin.

On a bien sûr un paradoxe au sens où il nous est difficile d'admettre cet état de choses, du fait de notre expérience quotidienne. Cependant, ce côté spectaculaire a attiré l'attention et permis de soulever un certain nombre de questions. Entre 1905 et 1998, pas moins de 257 articles ont été écrits sur le sujet. Ce problème a donc été l'occasion de voir se développer un bon nombre de querelles très variées.

On a également un apparent paradoxe si nous appliquons ce que nous disions concernant la contraction des longueurs : les systèmes sont interchangeables. De la même façon que l'on disait que les deux observateurs voyaient la règle appartenant à l'autre système (en mouvement) se raccourcir, chacun des jumeaux peut considérer qu'il est en mouvement et que l'autre est au repos. Chacun reviendra plus jeune que l'autre. Certains auteurs ont cru voir ici une contradiction interne à la théorie.

3.2.2. Bergson

Tel est le cas d'Henri Bergson, qui répond au problème posé par Langevin de la manière suivante, Paul étant le voyageur, Pierre le sédentaire.

> "Dans ces conditions, le Temps de Paul est cent fois plus lent que celui de Pierre. Mais c'est du temps attribué, ce n'est pas du temps vécu. Le temps vécu par Paul serait le temps de Paul référant et non le temps référé : ce serait exactement le temps que vient de trouver Pierre." [D. S. p. 79]

Par ces mots, Bergson affirme que le temps vécu par Paul serait le même que celui vécu par Pierre. Le voyageur vieillirait donc autant que son frère resté sur terre. Le paradoxe n'a donc pas lieu d'être.

Parmi les propos polémiques qui ont suivi les écrits de Bergson, citons une réponse d'Olivier Costa de Beauregard :

> "Que voilà un typique exemple de ces fallacieuses "évidences" où peut tomber un non-physicien, même très éminent dans un autre domaine du savoir." [N.T.E. p. 67]

3.2.3. Réponse par l'accélération

Pourquoi les histoires de Pierre et de Paul ne sont-elles pas les mêmes ? Pourquoi ne doit-on pas considérer que chacun des deux systèmes peut être pris comme système de référence immobile ? Qu'est-ce qui les différencie ? Olivier Costa de Beauregard nous apporte la réponse en expliquant que :

> "[...] l'un est constamment resté sans accélération tandis que l'autre a subi (idéalement) une accélération infiniment grande en passant de v à –v." [N.T.E. p. 67]

Parce qu'il subit une accélération, celui qui part vieillit moins.

De nombreuses études ont suivi. Le trajet du voyageur a été analysé selon différents découpages, en prenant en compte l'accélération initiale, puis le moment du retour (changement de direction), puis le ralentissement à l'arrivée.

Aujourd'hui, après de nombreux écrits – et des expériences sur des muons, particules accélérées dont on a constaté l'accroissement de longévité – il est admis que l'argument de Bergson ne tient pas et que le paradoxe des jumeaux est un énoncé valable, même s'il doit être traité selon les principes de la relativité restreinte et ceux de la théorie généralisée. Une polémique avait d'ailleurs éclaté sur la question de la validité du traitement par la Relativité restreinte alors qu'on avançait l'argument de la présence d'accélérations.

Si chacun accepte maintenant de telles conclusions, certains refusent cependant de parler d'un paradoxe, exactement au même titre que ce qui concerne la contraction des longueurs : nous avons là des effets de perspective. Cet effet de "perspective temporelle" nous est moins facilement concevable que la perspective spatiale, mais elle relève du même raisonnement.

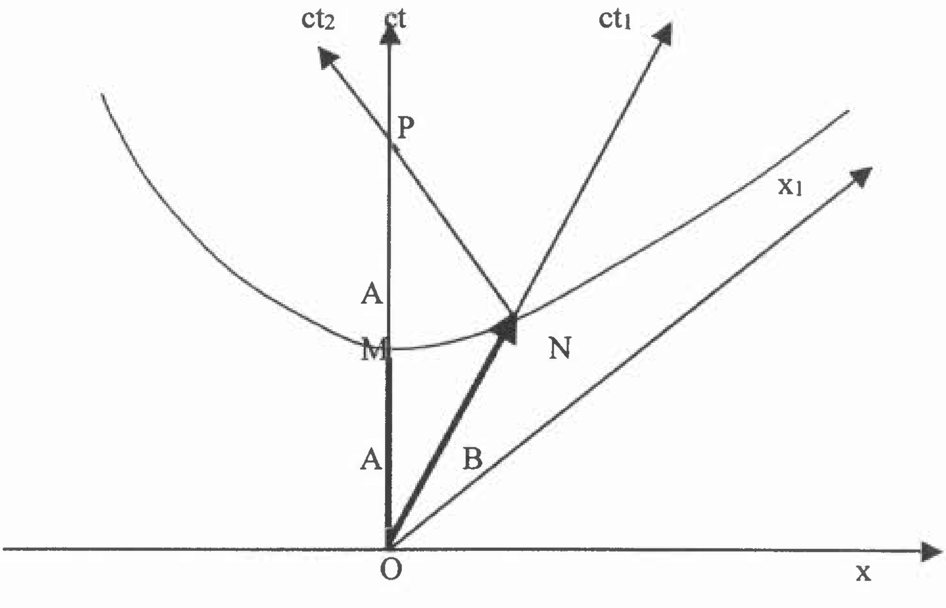
4. Deux paradoxes pour un seul phénomène

En effet, il s'agit du même raisonnement, de la même logique, appliquée à la dimension spatiale puis à la dimension temporelle. Nous pouvons même affirmer que le paradoxe d'Ehrenfest et le paradoxe des jumeaux ne sont finalement que deux facettes d'un même phénomène puisque l'espace et le temps sont, en Relativité, regroupés en un "continuum d'espace-temps". Alors qu'en physique classique le temps était considéré comme quelque chose d'indépendant de l'espace et du mouvement, dans la physique relativiste, l'espace et le temps sont étroitement liés et ne représentent que deux différentes sections du continuum spatio-temporel où prennent place tous les phénomènes.

Deux événements séparés dans l'espace par la distance l et dans le temps par l'intervalle t, dans un certain système, seront séparés par une autre distance l' et un autre intervalle de temps t' dans un autre système. En revanche, ce qui est constant, c'est l'intervalle espace-temps (à quatre dimensions).

4.1. Représentation par le diagramme de Minkowski

Cette unité apparaît plus clairement lorsqu'on adopte la représentation du diagramme de Minkowski. Ici, on représente les trois dimensions spatiales d'un observateur par un seul axe. La dimension temporelle est représentée sur le même diagramme, par un autre axe. On peut ainsi mieux concevoir le continuum espace-temps. Le diagramme suivant représente le paradoxe des jumeaux.



Les axes d'espace et de temps du jumeau sédentaire sont représentés par x et ct, l'axe de temps du jumeau voyageur par ct_1 (trajet aller) et ct_2 (trajet retour).

Pour déterminer les unités de temps dans chaque système propre, on trace l'hyperbole $c^2t^2 - x^2 = c^2t_1{}^2 - x_1{}^2 = 1$. Son intersection avec les axes de temps détermine les unités correspondantes $[OM]_{x=0} = 1$ et $[ON]_{x_1=0} = 1$.

Si l'on suppose que l'observateur B amorce son retour vers A au bout du temps unité, il atteindra A lorsque le temps NP = NO = 1 sera écoulé. Il aura donc vieilli de deux fois son temps unité. Au moment de la coïncidence avec A, ce dernier aura vieilli, lui, de plus de deux unités de son temps propre.

La différence de vieillissement sera d'autant plus grande que la vitesse du voyageur sera élevée, c'est-à-dire que l'axe ct_1 sera plus incliné et la durée du voyage plus longue ($0 < ct, ct_1 \leq 45°$).

5. Conclusion

Les tentatives pour prouver l'incompatibilité du principe de relativité et de la contraction des longueurs et de la dilatation du temps se sont montrées infructueuses. De telles tentatives, mises en avant par les deux énoncés paradoxaux que nous avons vus, visaient à nier la validité de la théorie de la relativité par la mise en valeur d'une incohérence interne : les conséquences de la théorie semblaient contredire une des prémisses de la même théorie (le principe de relativité). Car, si un paradoxe est un énoncé extravagant, extraordinaire, c'est aussi un énoncé qui exprime une contradiction. Cette deuxième signification du terme nous fait comprendre pourquoi tant de paradoxes ont été énoncés dans le cadre de cette théorie : ce sont là autant de tentatives pour démontrer son incohérence.

À ce titre, les deux paradoxes rencontrés sont exemplaires : que resterait-il aux relativistes si les conséquences de la théorie de la relativité étaient effectivement en contradiction avec le principe de même nom, un des piliers fondateurs de la théorie ?

Cependant, l'échec de ces tentatives nous rappelle ce que la théorie de la relativité a de novateur pour la physique, mais aussi pour notre manière plus générale de penser les phénomènes : nous ne devons plus chercher à unifier les différents points de vue en un seul, nous ne pouvons réunir des systèmes de référence différents (en mouvement l'un par rapport à l'autre) en un seul, sans nous trouver face à des difficultés insurmontables.

Par conséquent, nous ne pouvons trancher entre l'un et l'autre en nous demandant lequel des observateurs a une vision exacte, lequel "voit" la réalité, lequel "voit" l'apparence. De plus, à de telles vitesses, l'observateur ne peut pas "voir" les phénomènes tels qu'ils sont, tout au plus peut-il les concevoir.

Ainsi, en choisissant une version simplifiée des premiers paradoxes que l'on rencontre après l'avènement de la théorie de la relativité, nous voyons à quel point cette théorie bouleverse certaines notions et certaines dichotomies philosophiques. Les paradoxes, loin de condamner la théorie, mettent en relief la nouveauté conceptuelle – en même temps que la nouveauté des phénomènes physiques – nécessaire à l'acceptation de la théorie de la relativité.

Centre François Viète, Sylviane.BIDAL@wanadoo.fr

BIBLIOGRAPHIE

[1] BERGET A., "Le ciel", *Le Larousse,* Paris, Larousse, 1923.
[2] EINSTEIN A., "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Annalen der Physik*, vol. 17, 1905, p. 891 – 921 [E.C.M.], trad. fr. de Maurice Solovine : "Sur l'électrodynamique des corps en mouvement", Gauthier-Villars, 1925, nombreuses rééditions.
[3] EINSTEIN A., *Œuvres Choisies, Relativités 1*, Paris, Seuil /CNRS, 1993.
[4] COSTA DE BEAUREGARD O., *La notion de temps. Équivalence avec l'espace*, Paris, Vrin, 1983 (première édition : 1963) [N.T.E.].
[5] BERGSON H., *Durée et simultanéité*, Paris, PUF, 1968 [D.S.].
[6] LANGEVIN P., "L'évolution de l'espace et du temps", *Scientia* (Bologna), 10, 1911, p. 31-54 (conférence au Congrès de philosophie de Bologne, 1911).
[7] TONNELAT M.-A., *Histoire du principe de relativité*, Paris, Flammarion, coll. nouvelle bibliothèque,1971.

Cahiers François Viète, 3, 2002, 15-29

LE SOUCI MÉTAPHYSIQUE DE L'INFINI DANS LA CONSTRUCTION DE LA SCIENCE CLASSIQUE*

Michel BLAY

Résumé
On ne peut étudier le XVII^e siècle et en particulier les premiers développements de la science classique en y appliquant simplement nos modernes grilles de lecture. En effet, comme nous le montrons dans cet article en nous attachant à l'étude du concept d'infini, il importe, non pas de le concevoir comme un concept des mathématiques, ou de la science du mouvement ou bien de la théologie, etc., mais comme un lieu conceptuel où dialogue une multiplicité des thématiques avant que n'émergent effectivement, au XVIII^e siècle, nos modernes champs disciplinaires.

La réflexion, le travail sur l'infini, est décisif en des lieux multiples — philosophique, théologique, mathématique — de la pensée du XVII^e siècle. C'est en effet au cours de ce siècle, en rapport avec la construction de la science classique, que la diversité des questions sur l'infini est apparue dans toute son ampleur en relation avec ses dimensions d'inquiétude et de souci métaphysique.

Il y a une dimension tragique dans la pensée infinitiste du XVII^e siècle et c'est à travers cette dimension tragique qu'il devient possible de saisir l'organisation de la pensée de ce siècle, de percevoir l'originalité de la tâche qui s'y accomplit et en quel sens la résolution et le dépassement de cette dimension tragique ouvre sur le XVIII^e siècle et la construction effective de la science classique.

Cette dimension tragique, ce souci métaphysique s'impose à la seule lecture des textes. Galilée (1564-1642) n'écrit-il pas dans la première journée de ses *Discorsi* publié à Leyde en 1638 : "Rappelons-nous que nous traitons d'infinis et d'indivisibles, inaccessibles à notre entendement fini, les premiers à cause de leur immensité, les seconds à cause

* Conférence donnée le 19 mars 2002 au Centre François Viète.

de leur petitesse. Pourtant nous constatons que la raison humaine ne peut s'empêcher de sans cesse y revenir"[1]. À cela Blaise Pascal (1623-1662) fait écho dans les *Pensées* : "Connaissons donc notre portée. Nous sommes quelque chose et ne sommes pas tout. Ce que nous avons d'être nous dérobe la connaissance des premiers principes qui naissent du néant, et le peu que nous avons d'être nous cache la vue de l'infini"[2], tandis que René Descartes (1596-1650), en affirmant clairement dans les *Principes de la philosophie* (Paris 1647, première édition latine, Amsterdam 1644) que le mot d'infini doit être réservé à Dieu seul, introduit l'indéfini comme unique domaine à l'intérieur duquel la pensée humaine peut effectivement se développer : "Qu'il ne faut point tâcher de comprendre l'infini, mais seulement penser que tout ce en quoi nous ne trouvons aucunes bornes est indéfini"[3]. L'infini est donc ce qui est toujours à l'horizon des questionnements et toujours impossible à pleinement s'approprier.

Comment penser alors la nouvelle science sans penser pleinement l'infini? Comment construire la nouvelle science sans construire un concept de l'infini?

C'est cette tension entre, d'une part, un infini qui toujours surgit dans le mouvement, dans sa continuité, son commencement et sa fin ou dans la cosmologie et, d'autre part, l'impossibilité qu'il y a à saisir cet infini en tant qu'il appartient à Dieu seul, qui traverse la pensée du XVII^e siècle; c'est ce souci à la fois mathématique et métaphysique, apparaissant comme l'un des foyers vivants de la pensée du XVII^e siècle, que nous voudrions, dans ces quelques pages, donner à voir dans sa dimension de quête et d'interrogation.

D'abord, l'effort mathématique pour penser le mouvement et les conditions de sa géométrisation, puis les enjeux métaphysiques de l'impossible pensée de l'infini; enfin, pour rompre cette tension, l'apaisement fontenellien de la distinction entre l'infini métaphysique et l'infini géométrique; c'est-à-dire l'ouverture sur le XVIII^e siècle et l'avènement de la science classique.

---

[1] Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, in *Opere*, ed. nationale en vingt volumes publié par Favaro et Longo, Florence, 1890-1909, VIII, p. 73 (Dans la suite *Opere*) et *Discours concernant deux sciences nouvelles*, traduction par Maurice Clavelin, Paris, PUF, 1995, première édition Paris Armand Colin, 1970, p. 26 (Dans la suite *Discours*).

[2] Blaise Pascal, Œuvres complètes, collection l'Intégrale, Le Seuil, 1963, p. 528.

[3] René Descartes, *Les Principes de la philosophie*, in *Œuvres*, éditées par Ch. Adam et P. Tannery, 12 vol. plus un suppl., 1896-1913, rééd. Vrin-CNRS, 1964-1974, vol. IX, première partie, paragraphe 26. (Dans la suite *AT*).

1. L'infini à penser

L'un des aspects les plus novateurs du développement de la science au début du XVII^e siècle consiste dans la géométrisation du mouvement. Par géométrisation, il faut comprendre une démarche dont l'objet consiste à reconstruire les phénomènes du mouvement à l'intérieur du domaine de l'intelligibilité géométrique, de telle sorte que ces phénomènes se trouvent soumis à l'emprise de la raison géométrique et puissent être l'objet d'une mise en forme déductive sur le modèle des *Éléments* d'Euclide.

Cependant, cette entreprise ne va pas sans difficultés. Elle se heurte rapidement à des questions impliquant la considération de l'infini et, bien sûr, le retour des célèbres paradoxes de Zénon d'Elée (la dichotomie, l'Achille et la flèche). Comment peut-on penser la continuité d'un mouvement, le début et la fin d'un mouvement? Comment expliquer la variété des mouvements accélérés; doit-on avoir, comme le suggèrent certains atomistes, recours à un mélange de mouvements et de repos?

Autant de questions qui occuperont les savants du XVII^e siècle, Galilée, Bonaventura Cavalieri (1598-1647), Blaise Pascal, et qui ne trouveront finalement une réponse mathématique explicite qu'au début du XVIII^e siècle avec l'algorithmisation de la cinématique.

Dans une lettre adressée à Galilée en date du 21 mars 1626, Cavalieri souligne parfaitement l'importance et la difficulté des problèmes posés, dans le cadre de la géométrisation, par la compréhension du commencement et de l'évolution continue du mouvement : "[...] je suis arrivé à composer quelque petite chose sur le mouvement [...] : lorsqu'on en arrive à devoir prouver que le mobile, qui du repos doit passer à un degré quelconque de vitesse, doit passer par les (degrés) intermédiaires, je ne trouve aucune raison qui me tranquillise, bien qu'il me semble que généralement il en soit ainsi [...]"[4].

La quête d'une raison qui tranquillise, c'est ici à la fois un programme de travail et une attitude d'esprit; c'est la volonté de comprendre le commencement et l'évolution continue du mouvement, mais surtout de les penser mathématiquement, ou plutôt d'en construire les raisons mathématiques.

Cependant le traitement de ces questions est d'une extrême difficulté, car s'y attaquer c'est immédiatement se trouver confronté à

---

[4] *Opere*, XIII, p. 312.

l'infini. Blaise Pascal en témoigne explicitement, par exemple, dans son petit traité intitulé *De l'esprit géométrique* : "[...] quelque prompt que soit un mouvement, on peut en concevoir un qui le soit davantage, et hâter encore ce dernier; et ainsi toujours à l'infini, sans jamais arriver à un qui le soit de telle sorte qu'on ne puisse plus y ajouter. Et au contraire, quelque lent que soit un mouvement, on peut le retarder davantage, et encore le dernier; et ainsi à l'infini, sans jamais arriver à un tel degré de lenteur qu'on ne puisse encore en descendre à une infinité d'autres sans tomber dans le repos"[5].

Dans une perspective très voisine Galilée écrit dans les *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, en plaçant les mots dans la bouche de son ami et porte-parole, Salviati : "Ecoutez-moi bien. Vous ne refuserez pas, je crois, de m'accorder qu'une pierre tombant de l'état de repos acquiert ses degrés successifs de vitesse selon l'ordre dans lequel ces mêmes degrés diminueraient et se perdraient, si une force motrice la reconduisait à la même hauteur; et le refuseriez-vous que je ne vois pas comment la pierre, dont la vitesse diminue et se consume en totalité au cours de son ascension, pourrait atteindre l'état de repos sans être passée par tous les degrés successifs de lenteur"[6].

Dans ce texte, Galilée souligne, comme Pascal, mais d'une façon plus précise, la continuité caractérisant selon lui la croissance ou la décroissance de la vitesse dans un mouvement naturellement accéléré. Ainsi dans un tel mouvement, comme le précise également Galilée dans les *Discorsi*, "un grave [...] ne demeure en aucun de ces degrés de vitesse pendant un temps fini"[7]. Ce qui revient encore à dire que, suivant Galilée, dans un mouvement accéléré ou retardé, un grave qui sort du repos ou qui y retourne passe par une infinité de degrés de vitesse dans un intervalle de temps qui, si petit qu'il soit, contient une infinité d'instants. En ce sens, le repos peut être considéré, non comme opposé au mouvement, mais comme une limite ou un cas particulier du mouvement.

Les problèmes soulevés par cette analyse de la continuité du mouvement, tout en rendant possible la géométrisation du mouvement, comme en témoigne le traitement galiléen de cette question dans les *Discorsi* ou dans le *Dialogo* (Florence, 1632), sont d'une extrême difficulté. En effet, s'il y a une infinité de degrés de lenteur pour atteindre le repos, ne faut-il pas un temps infini pour que ce mouvement puisse s'accomplir ou, plus exactement, pour que le mobile animé d'un tel mouvement s'arrête en passant successivement par tous les degrés de

---

[5] *op. cit.*, note 2, p. 351-352.

[6] *Opere*, VIII, p. 200. *Discours* p. 133.

[7] *Ibid.* p. 133.

lenteur? Et, à l'inverse, pour qu'un mouvement commence en passant successivement par tous les degrés croissants de vitesse ne faut-il pas, là aussi, un temps infini pour atteindre la moindre vitesse? Dans un cas le repos est impossible à atteindre, dans l'autre c'est le mouvement qui ne peut, à strictement parler commencer. Or, bien évidemment, les mouvements commencent et finissent !

1.1. Continuité/discontinuité

Que le mouvement commence et voilà les paradoxes de l'infini qui s'insinuent et semblent venir ruiner toute possibilité de penser la continuité du début et de la fin du mouvement. Une réponse consiste à rejeter l'idée d'un commencement non fini du mouvement ou plutôt de considérer que, par exemple, le mouvement de chute des graves commence, non pas à partir d'une vitesse nulle par accroissements successifs continus, mais à partir d'une vitesse petite mais finie. C'est ainsi qu'Edme Mariotte (1620?-1684) envisage la question. Dans son *Traitté de la percussion ou chocq des corps*, publié à Paris en 1673, il refuse l'idée qu'un mouvement accéléré puisse l'être dès le premier instant. Son argumentation repose, bien évidemment, sur un rappel des difficultés engendrées par les paradoxes de Zénon sur l'infini, mais aussi, bien que le contexte infinitésimal y semble peu propice, sur diverses expériences en rapport principalement avec l'écoulement et la force des fluides : "Galilée fait quelques raisonnements assez vraisemblables pour prouver qu'au premier moment qu'un poids commence à tomber, sa vitesse est plus petite qu'aucune qu'on puisse déterminer : mais ces raisonnements sont fondés sur les divisions à l'infini, tant des vitesses que des espaces passés, et des temps de chutes, qui sont des raisonnements très suspects, comme celui que les anciens faisaient pour prouver qu'Achille ne pourrait jamais attraper une tortue, auquel raisonnement il est difficile de répondre et d'en donner la solution; mais on en démontre la fausseté par l'expérience, et par d'autres raisonnements plus faciles à concevoir. Ainsi l'on objectera à Galilée les raisonnements ci-dessus qui sont faciles à concevoir, particulièrement celui de la balance, et qui sont beaucoup plus clairs que les siens, qu'il a fondez sur les divisions à l'infini, qui sont inconcevables, et sur certaines règles de l'accélération de la vitesse des corps, qui sont douteuses : car on ne peut savoir si le corps tombant ne passe pas un petit espace, sans accélérer son premier mouvement, à cause qu'il faut du temps pour produire la plupart des effets naturels, comme il paraît lorsqu'on fait passer du papier au travers d'une grande flamme, avec une grande vitesse, sans qu'il s'allume; et par conséquent on doit préférer les raisonnements ci-dessus à ceux de Galilée"[8].

Il devient donc possible d'éliminer l'infini au début du mouvement en considérant qu'il n'y a pas, au sens strict, de début au mouvement. Dès le premier instant le corps est animé d'une vitesse très petite mais finie. De même le repos peut être atteint sans que le mobile passe par tous les degrés de lenteur ainsi que le propose, par exemple Hartsocker dans une lettre adressée à G.W. Leibniz (1646-1716) en date du 6 janvier 1712 : "Il y a une loi dans la Nature, dites-vous, Monsieur, qui porte qu'il n'y a aucun passage *per saltum*. Je vous l'accorde dans un certain sens; mais quand vous dites, que cette loi ne permet pas qu'il n'y ait point de milieu entre le dur et le fluide, je n'y vois aucune nécessité. Si vous ne saviez pas par l'expérience, Monsieur, qu'un corps qui se meut avec tout autant de vitesse qu'il vous plaira peut demeurer en repos dès l'instant du choc, sans perdre peu à peu et par degrés son mouvement, ne diriez-vous pas par votre loy que cela est impossible?"[9].

Descartes est également très prudent concernant l'accroissement continu de la vitesse lorsque les corps descendent et suggère, qu' "ordinairement", ils ne passent pas par tous les degrés de vitesse[10]. D'ailleurs en énonçant, dans la deuxième partie de ses Principes de la philosophie, ses lois du choc, dont la réforme va reposer entre autres, pour Leibniz, sur l'application de sa loi de continuité, Descartes se met précisément en contradiction avec les exigences de la continuité. Par l'expression de la première loi du choc, Descartes indique que "deux corps [...] exactement égaux et se (mouvant) d'égale vitesse en ligne droite l'un vers l'autre, lorsqu'ils viendraient à se rencontrer [...] rejailliraient tous deux également, et retourneraient chacun vers le côté d'où il serait venu, sans perdre rien de leur vitesse", mais, si l'on suppose maintenant avec Descartes, respectivement dans les deuxième et troisième lois, que l'un des corps est "tant soit peu plus grand" ou qu'il a "tant soit peu plus de vitesse", alors il n'y aura par la deuxième loi que le plus petit ou, par la troisième loi, que le plus lent qui rejaillira seul, de sorte que les corps iront après, dans un cas comme dans l'autre, tous les deux du même côté[11]. Une telle analyse est en parfaite contradiction avec l'idée même de continuité, comme le souligne par exemple Leibniz en 1691-

---

8 Edme Mariotte, *Traitté de la percussion ou chocq des corps*, Paris, 1673, avertissement placé à la fin de la proposition X, p. 247-249.

9 *Die philosophischen Schriften von Leibniz*, Hrsg. von C.I. Gerhardt, Bd. 1-7, Berlin, 1875-1890, rééd. Hildesheim, 1960-1961, III, p. 531.

10 *AT*, II, p. 399.

11 *AT*, IX, paragraphes 46, 47, 48.

1692 dans ses *Animadversiones in partem generalem principiorum cartesianorum*[12].

Le traitement "à la façon" galiléenne de l'évolution "sans sauts", "pauses" ou discontinuités du mouvement apparaît au XVII^e^ siècle comme le résultat d'un choix théorique risqué mais décisif car, comme Galilée l'a parfaitement perçu, c'est la possibilité même de la géométrisation du mouvement qui est ici en jeu. Le traitement géométrique du mouvement requiert de dépasser par la construction rationnelle, mais avec les risques de l'infini, ce qui, chez Mariotte relève d'une sorte d'évidence expérimentale qui n'apprend rien.

1.2. Le "commencement" leibnizien

Alors qu'il ne développera son calcul différentiel et intégral qu'en 1676, Leibniz rédige en 1670 une *Théorie du mouvement abstrait* (*Theoria motus abstracti*)[13] qui a essentiellement pour objet d'édifier une théorie a priori ou purement rationnelle du mouvement. Ce travail s'inspire de certains résultats mathématiques de Cavalieri exposés dans son célèbre écrit intitulé *Geometria indivisibilibus* publié à Bologne en 1635.

Dans sa *Théorie du mouvement abstrait* Leibniz considère que le mouvement est un continu, c'est-à-dire qu'il est "nullement entrecoupé de petits repos", comme cela était parfois envisagé par les atomistes. Donc, en tant qu'il est continu, le mouvement, comme c'est d'ailleurs le propre de tout continu suivant Leibniz est, non seulement divisible à l'infini mais effectivement divisé, en ce sens qu' "il y a des parties données en acte dans le continu" et que "celles-ci sont infinies en acte". Cependant "il n'y a pas de minimum dans l'espace ou le temps", car un tel minimum "implique contradiction". En effet, dans ce cas, il y aurait autant de minima dans le tout que dans la partie puisque toute partie de même espèce que le tout est encore infiniment divisible. Leibniz échappe à cette contradiction en s'appuyant sur son interprétation de la méthode

[12] *Op. cit.*, note 9, IV, p. 350 et sq.

[13] G.W. Leibniz développe sa théorie du mouvement dans son *Hypothesis physica nova*, rédigé en 1670 et publié à Mayence en 1671. Cet écrit regroupe deux textes complémentaires intitulés respectivement : *Theoria motus concreti, seu hypothesis de rationibus phaenomenorum nostri orbis* et *Theoria motus abstracti seu rationes motuum universales, a sensu et phaenomenis independentes*; cet écrit a été réédité dans *Sämtliche Schriften und Briefe*, Akademie Verlag, Berlin, 1966, VI, II, p. 262 et sq., et dans *Leibnizens mathematische Schriften*, Hrsg. von C.I. Gerhardt, Bd. 1-7, Berlin, Halle, 1849-1863, rééd. Hildesheim, 1960-1961, VI, p. 17-80. Pour des raisons de commodité nous donnerons nos références dans ce dernier recueil (abréviation *GM*).

cavalierienne, méthode qu'il est conduit à envisager, plus préoccupé qu'il est ici sans doute par l'analyse du mouvement et des trajectoires que par les pures questions de géométrie, sous l'angle de la composition du continu. Il introduit donc son concept d'indivisible : "Des indivisibles ou inétendus sont donnés, sans quoi ni le commencement, ni la fin du mouvement et du corps ne sont concevables". Que dire, en effet, comme on l'a vu précédemment, du "commencement" que ce soit celui d'un corps, d'un espace, d'une durée ou d'un mouvement sans retomber dans les paradoxes de Zénon?

Pour Leibniz un tel commencement appartient à l'espace, au temps, au mouvement sans pour autant être lui-même divisible. Comme on l'a vu, la notion d'un commencement divisible est contradictoire. Il y a donc des indivisibles, constitutifs de l'espace, du temps et du mouvement, et cependant hétérogènes à ce qu'ils constituent. Ce faisant, Leibniz introduit alors les êtres mathématiques pour le moins surprenants que sont "le commencement du corps, de l'espace, du mouvement, du temps (à savoir le point, l'effort, l'instant)". C'est à Thomas Hobbes (1588-1679) que Leibniz emprunte en le transformant le concept d'effort pour en faire son indivisible de mouvement : "L'effort est au mouvement ce que le point est à l'espace, soit comme l'unité à l'infini, il est en effet le commencement et la fin du mouvement"[14]. Il existe donc un indivisible de mouvement, "l'effort", qui, d'un certain point de vue, bloque la régression à l'infini qui interdisait de penser le commencement ou la fin du mouvement.

Les tentatives pour penser mathématiquement l'engendrement du mouvement font immédiatement surgir l'infini; penser la continuité du mouvement, son commencement ou sa fin c'est faire entrer l'infini dans le monde, en en affirmant la présence. Dans cette perspective le projet de géométrisation retrouve, comme une conséquence inévitable et, non plus, sur le mode de la décision péremptoire, les thèses de Giordano Bruno présentées en particulier dans *De l'infinito, universo e mondi* publié à Londres en 1584 : "[...] d'autant que, s'il y a une raison pour qu'existe un bien fini, un parfait terminé, il y a incomparablement plus de raison pour qu'existe un bien infini : car tandis que le bien fini existe par convenance et raison, le bien infini existe par absolue nécessité"[15].

---

[14] *GM*, VI, p. 67-68.

[15] Giordano Bruno, *Œuvres complètes*, IV, *De l'infini, de l'univers et des mondes*, texte établi par G. Aquilecchia, notes de Jean Seidengart, introduction de M.A. Granada, traduction de G.-P. Cavaillé, Les Belles lettres, 1995, p. 74.

Comment penser un infini réel et présent dans le monde alors que précisément le discours sur l'infini est réservé au créateur ou que le nom d'infini est réservé à Dieu seul?

2. L'infini impensable

La position de Pascal est, dans cette affaire, particulièrement éclairante. Car tout en affirmant la double infinité qui se rencontre dans toute chose, il souligne simultanément que cette double infinité ne peut être conçue par notre esprit et donc, finalement, que notre connaissance ne peut effectivement pénétrer pleinement dans la nature des choses : "Voilà l'admirable rapport que la nature a mis entre ces choses, et les merveilleuses infinités qu'elle a proposées aux hommes, non pas à concevoir mais à admirer"[16].

Le monde est infini, traversé de toute part par l'infini, mais l'infini n'est pas de notre monde, en ce sens que nous ne pouvons ni le saisir, ni le concevoir, mais seulement le contempler. La construction d'un concept mathématique de l'infini qui soit également un mot du langage de la nature totalement compréhensible par la pensée humaine est donc hors de notre portée. Galilée ne manque pas non plus de le rappeler dans les *Discorsi* : "[...] nous traitons d'infinis et d'indivisibles inaccessibles à notre entendement fini"[17], et Descartes s'appuie sur cette incompréhensibilité pour construire son opposition infini/indéfini qu'il formule avec soin dans la première partie des *Principes* : "26. Qu'il ne faut point tâcher de comprendre l'infini, mais seulement penser que tout ce en quoi nous ne trouvons aucunes bornes est indéfini. Ainsi nous ne nous embarrasserons jamais dans les disputes de l'infini; d'autant qu'il serait ridicule que nous, qui sommes finis, entreprissions d'en déterminer quelque chose, et par ce moyen le supposer fini en tâchant de le comprendre; c'est pourquoi nous ne nous soucierons pas de répondre à ceux qui demandent si la moitié d'une ligne infinie est infinie, et si le nombre infini est pair ou non pair, et autres choses semblables, à cause qu'il n'y a que ceux qui s'imaginent que leur esprit est infini qui semblent devoir examiner telles difficultés. Et, pour nous, en voyant des choses dans lesquelles, selon certains sens, nous ne remarquons point de limites, nous n'assurerons pas pour cela qu'elles soient infinies, mais nous les estimerons seulement indéfinies. [...] Et nous appellerons ces choses indéfinies plutôt qu'infinies, afin de réserver à Dieu seul le nom d'infini; tant à

---

16 *Op. cit.*, note 2, p. 354.

17 *Opere*, VIII, p. 73. *Discours*, p. 26.

cause que nous ne remarquons point de bornes en ses perfections, comme aussi à cause que nous sommes très assurés qu'il n'y en peut avoir. Pour ce qui est des autres choses, nous savons qu'elles ne sont pas ainsi absolument parfaites, parce qu'encore que nous y remarquions quelquefois des propriétés qui nous semblent n'avoir point de limites, nous ne laissons pas de connaître que cela procède du défaut de notre entendement, et non point de leur nature"[18].

La finitude de la pensée humaine, confrontée à l'infinitude du créateur, interdit au processus de la connaissance de pouvoir s'accomplir complètement. Ce faisant le projet de géométrisation de la nature dans sa visée ontologique et fondatrice perd son sens : il est impossible de lire, tout en le comprenant, l'infini dans la nature, de pénétrer donc pleinement dans la nature des choses. Une déchirure de l'espace des savoirs s'accomplit; d'un côté donc la science du mouvement ou la cosmologie de Giordano Bruno avec l'appel insistant de l'infini, le retour incessant de la raison vers le concept d'infini et, de l'autre, la pensée impossible de l'infini, la mise en demeure adressée à l'entendement humain de rester dans les limites de sa finitude.

3. L'apaisement fontenellien ou l'inauguration du XVIII^e siècle

Cette tension du travail de la pensée où viennent converger les discours de la science et de la métaphysique trouve un apaisement dans l'effort fontenellien pour dénouer les liens de la géométrie et de la transcendance. La rédaction de ses *Éléments de la géométrie de l'infini* marque définitivement un nouveau rapport de la pensée à l'infini, c'est-à-dire à la construction du monde.

Si ce nouveau rapport peut se constituer c'est aussi parce que l'algorithme du calcul différentiel et intégral inventé par G.W. Leibniz apparaît susceptible, par sa mise en œuvre, de ramener de difficiles problèmes conceptuels impliquant l'infini à des procédures bien réglées; il semble maintenant possible de tracer avec quelque assurance des chemins dans l'infini, d'en saisir certains contours, de penser l'impensable, de rendre raison de l'infini.

Je ne prendrai qu'un exemple, celui relatif à la science du mouvement, science qui, précisément, nous a occupé dans les pages précédentes et qui a tant préoccupé les esprits au XVII^e siècle.

Leibniz introduit donc à l'occasion de la rédaction de deux brefs Mémoires publiés l'un dans le numéro d'octobre 1684 des *Acta Erudito-*

---

[18] *AT*, IX, première partie, paragraphe 26.

rum sous le titre "Nova methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus, quae nec fractas, nec irrationales quantitatis moratur, et singulare pro illis calculi genus"[19] et l'autre dans le numéro de juin 1686 des mêmes *Acta Eruditorum* sous le titre : "De geometria recondita et analysi indivisibilium atque infinitorum"[20], l'algorithme de son calcul qu'il appelle différentiel. La diffusion de ce nouveau calcul est lente et difficile. À partir des années 1690 les deux frères Jean et Jacques Bernoulli, en contact étroit, principalement épistolaire, avec Leibniz, vont s'attacher à appliquer les nouvelles méthodes leibniziennes aux sujets les plus divers, l'occasion leur en étant souvent fournie par un défi lancé par un représentant de l'Europe savante.

C'est ensuite, au cours de son séjour parisien, pendant l'hiver 1691-1692, que Jean Bernoulli initie, sous la forme de "leçons particulières" le marquis Guillaume de l'Hospital au calcul leibnizien. Ces leçons, portant à la fois sur le calcul différentiel et le calcul intégral, constitueront la base à partir de laquelle le Marquis de l'Hospital rédigera le premier traité ou manuel de calcul différentiel. Celui-ci sera publié à Paris à la fin du mois de juin 1696 sous le titre : *Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courbes*. L'introduction des nouvelles méthodes se trouve ainsi grandement facilitée bien qu'elles suscitent, à l'Académie Royale des Sciences, jusqu'à la fin de la première décennie du XVIII^e siècle, de vives polémiques.

Il n'en reste pas moins que Pierre Varignon (1654-1722), après avoir assimilé assez rapidement les principaux éléments du nouveau calcul, va s'attacher, dans les dernières années du XVII^e siècle et les premières du XVIII^e, à reprendre, dans le cadre des méthodes leibniziennes, l'étude du mouvement. Il construit ainsi l'algorithme de la cinématique, le premier algorithme appartenant au champ spécifique de la physique mathématique[21].

Comment procède-t-il? D'abord en élaborant le concept de "vitesse dans chaque instant". En 1698, dans un Mémoire conservé dans les "Registres manuscrits des séances de l'Académie Royale des Sciences", Varignon suppose que la vitesse d'un corps peut être considérée comme uniforme pendant chaque instant de son mouvement. Puis, mettant en œuvre les démarches mathématiques décrites par le Mar-

---

[19] *Acta Eruditorum*, octobre 1684, p. 467-473, et *GM*, V, p. 220-226.

[20] *Acta Eruditorum*, juin 1686, p. 292-300, et *GM*, V, p. 226-233.

[21] Sur ces questions voir Michel Blay, *La naissance de la mécanique analytique. La science du mouvement au tournant des XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, PUF, 1992 et *Les raisons de l'infini. Du monde clos à l'Univers mathématique*, Paris, Gallimard, 1993.

quis de l'Hospital il parvient à l'expression de la vitesse dans chaque instant $v = \frac{dx}{dt}$ où x représente l'espace parcouru et t le temps.

Deux ans plus tard, en 1700, partant du concept newtonien de force accélératrice tel qu'il est exprimé, non pas dans la loi II, mais dans le Lemme X de la section I du livre I des *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Newton (Londres 1687)[22], Varignon parvient à l'expression de la "force accélératrice dans chaque instant" $y = \frac{ddx}{dt^2}$ ou $y = \frac{dv}{dt}$.

C'est à l'issue de cette double construction qu'il aboutit à l'algorithmie de la cinématique. En effet les deux formules qu'il vient d'établir indépendamment l'une de l'autre, celle de la vitesse dans chaque instant et celle de la force accélératrice dans chaque instant apparaissent comme pouvant se déduire l'une de l'autre par la simple mise en œuvre des méthodes du calcul différentiel et intégral. La théorie du mouvement varié se réduit donc à de simples recherches analytiques qui consisteront ou dans des différentiations ou dans des intégrations.

Les difficiles problèmes de la science du mouvement où l'infini semblait à chaque moment menacer les constructions conceptuelles semblent avoir disparu ou du moins n'apparaissent plus que dans le cadre d'un travail technique sur le fondements du calcul différentiel. L'infini semble donc être appréhendé à l'intérieur d'un ensemble de procédures formelles. Il devient donc possible de travailler sur l'infini, sur de l'infini, faire des mathématiques et de la physique sans que les enjeux de la métaphysique et de la transcendance y semblent directement impliqués.

C'est donc à Fontenelle que va revenir, comme nous l'indiquions précédemment, la tâche de dénouer clairement dans une démarche théorique les liens de la géométrie et de la transcendance, c'est-à-dire, de donner, d'un point de vue épistémologique, à la mathématique comme à la physique leur autonomie, de les ouvrir sur la modernité.

En décembre 1727, Fontenelle fait donc paraître à Paris un ouvrage qui lui tient profondément à cœur et auquel il a consacré près de trente années de travail : *Les Élémens de la géométrie de l'infini*[23]. Dans

---

[22] Pour une étude comparée du statut de la loi II et du lemme X, voir Michel Blay, *Les 'Principia' de Newton*, Paris, PUF, collection philosophies, 1995.

[23] *Fontenelle. Éléments de la géométrie de l'infini, Paris 1727*, réédition en fac-simile avec une introduction de Michel Blay et Alain Niderst, Paris, Klincksieck, 1995.

son édition originale, cet ouvrage in 4° de 548 pages en deux parties, sortie des presses de l'Imprimerie Royale, est présenté comme une "suite des Mémoires de l'Académie Royale des Sciences".

Le livre reçut de la part des contemporains un accueil très réservé. Ces derniers, au lieu de porter leur attention sur le projet intellectuel fontenellien, s'attachèrent seulement à souligner, souvent d'ailleurs à juste titre, les insuffisances mathématiques et les difficultés de la construction théorique. En adoptant une telle attitude, ils méconnaissaient le véritable enjeu du travail et de la réflexion du secrétaire perpétuel de l'Académie Royale des sciences.

La raison de cette incompréhension réside pour une grande part dans une méconnaissance du concept fontenellien de système géométrique, concept dont l'introduction donne tout son sens à la distinction essentielle pour Fontenelle entre infini géométrique et infini métaphysique. Fontenelle insiste sur l'importance de ce concept en donnant à la première partie de son ouvrage le titre de "Système général de l'infini". C'est, par ailleurs, principalement sur cette question qu'il attire dans sa correspondance, l'attention de ses lecteurs. Ainsi, dans sa lettre à Jean I Bernoulli en date du 22 avril 1725, il se "flatte" que son "assez gros ouvrage [...] soit une espèce de système, non pas métaphysique, mais géométrique, assez bien lié de tout ce que vous nous avez découvert sur cette grande matière. J'en crois l'ordre à peu près aussi exact qu'il puisse l'être, et le spectacle assez beau pour un esprit mathématicien, il a fallu, ne fut-ce que pour la liaison des pierres du bâtiment, que j'aie mêlé un grand nombre de pensées qui n'étaient qu'à moi, avec celles qui vous appartenaient [...]"[24].

Fontenelle revient à de multiples reprises sur ces mêmes thèmes dans sa correspondance avec Jean I Bernoulli, mais aussi avec Jean-Pierre de Crousaz (1663-1750), s'Gravesande (1668-1742) et Boullier (1669-1759)[25]. À la lecture de ces différents textes, il apparaît clairement que, pour lui, ses *Éléments* se présentent comme un "système géométrique" doté d'une remarquable cohérence interne ("bien lié"), et faisant usage, entre autres, d'une hypothèse en forme de paradoxe présidant à l'introduction de ses étranges "finis indéterminables". Dans cette perspective, et c'est l'essentiel ici, l'existence des objets du système repose, en dernier ressort, sur cette cohérence interne. Elle est le garant de leur réalité, leur seul support ontologique. Fontenelle écrit d'ailleurs

---

[24] Öffentliche Bibliothek der Universität, Basel, ms. LIa 692.

[25] Sur ces correspondances, voir Michel Blay, "Du fondement du calcul différentiel au fondement de la science du mouvement dans les Éléments de la géométrie de l'infini' de Fontenelle", *Studia leibnitiana*, 1989, p. 99-122.

dans la Préface de ses *Éléments* : "La géométrie est toute intellectuelle, indépendante de la description actuelle et de l'existence des Figures dont elle découvre les propriétés. Tout ce qu'elle conçoit nécessaire est réel de la réalité qu'elle suppose dans son objet. L'Infini qu'elle démontre est donc aussi réel que le Fini, & l'idée qu'elle en a n'est point plus que toutes les autres, une idée de supposition, qui ne soit que commode, & qui doive disparoître dès qu'on en a fait usage"[26].

Cela étant, la distinction fontenellienne entre infini géométrique et infini métaphysique prend toute sa signification : "Nous avons naturellement une certaine idée de l'Infini, comme d'une grandeur sans bornes en tous sens, qui comprend tout, hors de laquelle il n'y a rien. On peut appeler cet Infini *Métaphysique* : mais l'Infini *Géométrique*, c'est-à-dire celui que la Géométrie considère, & dont elle a besoin dans ses recherches, est fort différent, c'est seulement une grandeur plus grande que toute grandeur finie, mais non pas plus grande que toute grandeur. Il est visible que cette définition permet qu'il y ait des Infinis plus petits ou plus grands que d'autres Infinis, & que celle de l'Infini Métaphysique ne le permettroit pas. On n'est donc pas en droit de tirer de l'Infini Métaphysique des objections contre le Géométrique, qui n'est comptable que de ce qu'il renferme dans son idée, & nullement de ce qui n'appartient qu'à l'autre"[27].

L'infini géométrique, selon Fontenelle, apparaît donc, dans le cadre de sa conception du "système géométrique", comme un concept mathématique qui, en tant que tel, est ontologiquement indépendant de l'infini métaphysique. Il ne relève que de la cohérence du système à l'intérieur duquel il se déploie. En conséquence, pour Fontenelle, aucune critique du concept d'infini géométrique s'appuyant sur celui, d'ailleurs pour lui assez flou, d'infini métaphysique, ne peut être d'une quelconque valeur. Par cette volonté de considérer le concept d'infini géométrique comme un concept spécifique dont le contenu doit être défini à l'intérieur du seul discours mathématique, Fontenelle annonce incontestablement (en dépit de certaines faiblesses mathématiques) les travaux de Cantor et de ses successeurs.

Fontenelle a dénoué les liens de l'infini avec la transcendance en offrant à la réflexion géométrique la possibilité de penser un infini ou plusieurs en dehors du discours spécifique consacré à Dieu. Une géométrie de l'infini est possible par delà les inquiétudes métaphysiques sous-jacentes à toute conceptualisation infinitiste au XVII^e siècle. Notre modernité s'accomplit définitivement en faisant de l'infini un objet de tra-

26 *Éléments de la géométrie de l'infini*, préface, p. 11.

27 *ibid.*, p. 13.

vail et de réflexion, un objet à partir duquel il devient possible de penser, c'est-à-dire de construire un monde où le nom d'infini n'est plus réservé à Dieu seul.

CNRS, michel.blay@ens.fr

Cahiers François Viète, 3, 2002, 31-55

LE PROGRAMME DE GÖDEL ET LA SUBJECTIVITÉ MATHÉMATICIENNE*

Pierre CASSOU-NOGUÈS

Résumé
Le but de cet article est de mettre en évidence un programme gödelien, faisant suite au programme formaliste. Les théorèmes de 1931, sur l'incomplétude de l'arithmétique élémentaire, marquent l'échec du programme formaliste, tel que Hilbert l'a formulé. Pourtant, Gödel reprend les objectifs hilbertiens : établir le fondement et donner une représentation rationaliste des mathématiques. Ainsi, le logicien lance un véritable programme. Mais, alors que Hilbert entendait éliminer les arguments épistémologiques et transformer le problème du fondement des mathématiques en un exercice mathématique, le programme gödelien passe par une analyse de la subjectivité mathématicienne. Nous distinguons deux modèles de la subjectivité mathématicienne dans ce que nous appelons le programme gödelien.

Nous voudrions suivre le mouvement continu qui va du programme formaliste à ce que nous appelons le programme gödelien. En effet, si les théorèmes d'incomplétude ont rendu caduque le programme formaliste dans la lettre hilbertienne, Gödel reprend à son compte la perspective fondationnelle et le rationalisme de Hilbert. Le logicien lance ce que nous pouvons appeler un programme qui poursuit les mêmes objectifs que le programme formaliste. Néanmoins, après les théorèmes d'incomplétude, le programme gödelien ne peut plus se réduire à un exercice mathématique mais doit passer par une analyse épistémologique. Celle-ci est tournée vers la subjectivité mathématicienne. Chemin faisant, nous nous attacherons à analyser les deux modèles de la subjectivité qui accompagnent le pro-

* Conférence donnée le 26 mars 2002 au Centre François Viète. Cet article résume des analyses développées dans Cassou-Noguès ("à paraître-a").

gramme gödelien. Nous commencerons par évoquer la controverse sur le problème des fondements, entre l'intuitionisme de Brouwer et le formalisme de Hilbert, nous analyserons l'impact des théorèmes d'incomplétude et suivrons l'élaboration du programme gödelien en distinguant deux aspects, le fondement et le rationalisme.

1. Le programme de Hilbert et les théorèmes de 1931

Les paradoxes découverts autour de 1900 conduisent les mathématiciens intuitionistes, dirigés par Brouwer, à une critique des raisonnements classiques. En effet, les raisonnements classiques reposent sur des inférences, transfinies, qui ne semblent se justifier que sous l'hypothèse d'une existence actuelle de l'infini. Par exemple, en arithmétique, le tiers exclu permet d'affirmer, P étant une propriété quelconque, que ou bien tous les entiers naturels vérifient la propriété P ou bien il existe un entier qui ne vérifie pas la propriété P. Et, dans un raisonnement par l'absurde, lorsque l'on prouve que l'hypothèse que tous les entiers vérifient P conduit à une contradiction, on déduit l'existence d'un entier ne vérifiant pas P. Pourtant, au moment où l'on affirme l'existence d'un tel entier, on ne peut pas le calculer. En réalité, on suppose que les entiers existent en soi et possèdent des propriétés déterminées, P ou non P, indépendamment des calculs ou, ce qui revient au même, on suppose qu'il serait possible de parcourir en totalité la suite des entiers pour trouver un entier vérifiant non P. Cependant, après les paradoxes, il vaut mieux faire l'économie de ces hypothèses. L'intuitionisme pose que les objets mathématiques n'existent pas en soi mais sont engendrés par la conscience mathématicienne. Celle-ci vit dans le temps. C'est dans le temps qu'elle raisonne et constitue ses objets. Or une inférence transfinie, qui supposerait le parcours achevé d'une collection infinie, ou un processus qui exigerait une infinité d'étapes n'est pas possible dans le temps. Dans le temps, ne se réalisent que des processus finis ou, s'ils se laissent prolonger, indéfinis. Les raisonnements mathématiques doivent pouvoir être vérifiés dans de tels processus, finis ou indéfinis. Les mathématiques classiques, et déjà l'arithmétique élémentaire, outrepassent ces limites. Elles ne constituent qu'un langage vide de contenu et c'est la raison pour laquelle elles donnent lieu à des et c'est la raison pour laquelle elles donnent lieu à des contradictions[1]. L'intuitionisme rejette les mathématiques classiques, dont une conscience temporelle ne peut ni engendrer les objets, ni conduire les raisonnements, et élabore une nouvelle mathématique, dirigée par une nouvelle logique, conforme à l'exigence de constructivité.

Acceptant, pour l'essentiel, la critique intuitioniste du raisonnement mathématique[2], Hilbert reconnaît qu'un raisonnement ne peut être vérifié et ne peut prendre une évidence propre qu'à la condition de ne faire intervenir qu'un nombre fini, quoique illimité, d'étapes ou d'objets. Techniquement, les limites, par lesquelles Hilbert définit le raisonnement "finitiste", sont plus strictes que celles de l'intuitionisme. Mais le but de Hilbert est d'utiliser les raisonnements finitistes pour fonder les mathématiques classiques, qui outrepassent les limites finitistes.

Les mathématiques transfinies seront formalisées et représentées par des manipulations de signes dépourvus de sens. Partant d'une théorie donnée, on commence par faire l'inventaire des signes utilisés, analogue à un alphabet. On donne des règles, analogues à l'orthographe et à la grammaire, pour constituer à partir de ces signes des formules. On donne des axiomes qui serviront de prémisses dans les déductions. On donne des règles pour déduire une formule d'une autre. Ces règles ne s'appliquent qu'aux signes figurant dans les formules et ne prennent pas en considération le sens que pourraient posséder ces signes. Le raisonnement est remplacé par une manipulation de signes. La théorie est remplacée par "un stock de formules", construites et enchaînées selon des règles explicites[3]. Une démonstration se présente comme un dessin conforme à des règles convenues.

Ainsi, Hilbert distingue une mathématique finitiste, dont les raisonnements possèdent une évidence propre mais sont soumis à des restrictions, et une mathématique formelle, qui consiste en manipulations symboliques selon des règles convenues. Il s'agira de démontrer la non contradiction des théories formelles au moyen de raisonnements finitistes. Pour cela,

---

[1] Notamment, Brouwer (1908), p. 20. Sur la temporalité comme condition de possibilité des constructions mathématiques, Brouwer (1913), p. 43-44.

[2] Dans Pierre Cassou-Noguès (2001), nous discutons de façon plus précise la dette de Hilbert envers Poincaré et Brouwer (p. 98-105). Également, Hourya Sinaceur (1994) et (1996).

[3] Hilbert (1926), p. 233.

on raisonnera sur les dessins, qui représentent les démonstrations dans un système formel. Une contradiction se manifesterait par un dessin ayant pour conclusion une ligne de la forme $0 \neq 0$. On analysera les dessins conformes aux règles convenues pour démontrer que de tels dessins ne peuvent pas s'achever sur une ligne comme $0 \neq 0$, en se limitant dans ces raisonnements à des inférences finitistes. Ces raisonnements sur les démonstrations mathématiques constituent une métamathématique. La métamathématique doit donner un fondement à la mathématique : établir, au moyen de raisonnements finitistes, qui, possédant une évidence propre, n'ont pas à être justifiés, que les raisonnements mathématiques s'effectuent sans contradiction. Pour fonder les raisonnements classiques, il n'est pas nécessaire d'affirmer la réalité des collections infinies sur lesquelles ils portent ou de prêter à la conscience mathématicienne la faculté de réaliser des processus transfinis. En fait, le programme formaliste fait de l'infini "quelque chose de purement apparent" que l'on peut utiliser en mathématiques sans lui reconnaître aucune réalité[4].

En outre, la métamathématique semble permettre d'établir une représentation rationaliste des mathématiques. Dès 1900, Hilbert posait en principe la résolubilité de tout problème mathématique. Tout problème mathématique est susceptible d'une solution définitive. Il n'y a donc rien que l'esprit soit condamné à ignorer. "Jamais le mathématicien ne sera réduit à dire *Ignorabimus*"[5]. Ce principe épistémologique peut prendre plusieurs formes logiques. Le plus naturel serait d'établir que, dans un système formel, toute proposition qui peut être formulée peut être ou démontrée ou réfutée. Cette propriété logique, la complétude syntaxique, est mentionnée dans l'article de 1928, "Problèmes de fondation des mathématiques"[6]. Dans l'article de 1926, "De l'infini", Hilbert pose comme un lemme, qui reste à démontrer, la résolubilité finitiste des problèmes arithmétiques : une formule "tout entier vérifie P", P étant une propriété arithmétique, peut être ou démontrée ou réfutée par la donnée d'un contre-exemple[7]. Cela impliquerait la complétude syntaxique. Les deux propriétés

[4] Hilbert (1926), p. 222. La traduction française donne "fictif" au lieu de "apparent".

[5] Hilbert (1900), p. 11-12.

[6] Hilbert (1928), Problème III, p. 182.

[7] Hilbert (1926), Lemme I, p. 238. Techniquement, il s'agit de l'élimination de la fonction ϵ.

logiques, complétude syntaxique et décidabilité finitiste, semblent, comme la non-contradiction, être susceptibles d'une preuve métamathématique.

Avant tout, Hilbert, avec son école de Göttingen, tente d'appliquer ce programme à l'arithmétique élémentaire, qui, avec le tiers exclu, fait déjà intervenir le transfini. Le problème des fondements est transformé en un exercice mathématique : établir au moyen de raisonnements finitistes que les systèmes formels qui représentent les théories classiques, arithmétique, théorie des ensembles, possèdent les propriétés logiques de consistance et de complétude syntaxique. Le seul facteur extra-mathématique, dans le programme formaliste, tient à ce qu'il lui faut reconnaître une évidence immédiate aux raisonnements finitistes. Mais ce facteur épistémologique semble négligeable, dans la mesure, d'une part, où les raisonnements finitistes sont plus simples que les raisonnements transfinis de sorte qu'il y a un gain à fonder ceux-là par ceux-ci, dans la mesure, d'autre part, où les mathématiciens critiques et, au premier chef, Brouwer reconnaissent l'évidence immédiate des raisonnements finitistes. Hilbert pouvait espérer prouver la décidabilité des problèmes mathématiques et donner au problème du fondement une solution définitive et dépourvue de présupposés extra-mathématiques[8].

Les deux théorèmes que Gödel donne en 1931 répondent au programme de Hilbert. D'une part, un système, supposé consistant, comprenant l'arithmétique élémentaire, permet de formuler des propositions indécidables, ni démontrables ni réfutables, à partir des axiomes[9]. D'autre part, il est impossible de démontrer la consistance d'un système, supposé consistant, comprenant l'arithmétique élémentaire, au moyen de raisonnements qui se laisseraient exprimer dans le système.

---

[8] Hilbert (1927), p. 163 ; (1928), p. 179.

[9] Techniquement, dans l'article de 1931, "Über formal unentscheidbare Sätze der *Principia Mathematica*...", Gödel utilise l'hypothèse que le système est ω-consistant. Un système est *ω-consistant* s'il est impossible de vérifier une propriété P(n) pour chacun des entiers naturels : P(0), P(1), P(2), etc. et de démontrer la proposition "il existe un entier ne vérifiant pas P" : $\exists n \neg P(n)$. Il n'y a pas contradiction entre les formules P(0), P(1), P(2), etc. et la formule $\exists n \neg P(n)$. Une ω-contradiction n'est pas une contradiction. L'hypothèse de ω-consistance est plus forte que l'hypothèse de consistance. C'est J. B. Rosser qui, en 1936, réussit à remplacer l'hypothèse de ω-consistance par celle de consistance, ce qui donne aux théorèmes leur énoncé usuel.

Commençons par examiner le second théorème. Hilbert voulait établir la consistance de l'arithmétique élémentaire au moyen de raisonnements finitistes. Les raisonnements qu'utilisent Hilbert et son école sont des méthodes arithmétiques simplifiées, qui se laissent formaliser dans l'arithmétique élémentaire. Ils ne sont pas susceptibles d'apporter une preuve de consistance. Néanmoins, il pourrait exister d'autres raisonnements, qui restent finitistes mais ne s'expriment pas dans l'arithmétique élémentaire. Le programme formaliste est suspendu à cette possibilité, que, dans l'article de 1931, Gödel laisse ouverte[10]. En réalité, Hilbert se contentait d'une définition épistémologique du raisonnement finitiste : un raisonnement est finitiste s'il porte sur des objets concrets et peut être vérifié dans l'expérience et dans le temps. Une telle définition ne permet pas de trancher la question de l'inscription des raisonnements finitistes dans l'arithmétique élémentaire. Dans un exposé de 1933, Gödel donne une définition mathématique des raisonnements finitistes et conclut que ceux-ci, s'exprimant dans l'arithmétique élémentaire, ne permettent pas d'en établir la consistance[11].

Pour démontrer la consistance de l'arithmétique, il faudrait développer les raisonnements métamathématiques au-delà des limites qu'indiquait Hilbert. La difficulté est que resurgissent dans le fondement des mathématiques les arguments épistémologiques que Hilbert entendait éliminer. En effet, Hilbert tentait d'assurer la consistance de l'arithmétique par des raisonnements finitistes qui restent plus faibles que l'arithmétique, puisqu'ils se laissent formaliser dans l'arithmétique, et auxquels les mathématiciens s'accordaient à reconnaître une évidence propre. Après les théorèmes de 1931, il faut introduire des inférences qui ne se laissent pas traduire dans l'arithmétique élémentaire et justifier, par des arguments épistémologiques, l'évidence accordée à ces raisonnements "finitistes" et leur primat par rapport aux raisonnements classiques, que l'on prétend fonder. On ne peut plus éliminer les hypothèses qui sous-tendent une théorie, comme celle de l'infini actuel dans l'arithmétique élémentaire. On ne peut que les remplacer par d'autres, qui seront équivalentes d'un point de vue mathé-

---

10 Gödel, "Über formal unentscheidbare Sätze der *Principia Mathematica...*", 1931, dans (1986-95), t. I, p. 194-195.

11 Gödel, "The present situation in the foundations of mathematics", 1933, dans (1986-95), t. III, p. 51. Également, "Lecture at Zilsel's", 1938, dans (1986-95), t. III, p. 90-91.

matique mais que l'on pourra justifier d'un point de vue épistémologique. Il ne s'agit pas d'une réduction des hypothèses mais d'une reformulation ou d'un déplacement[12]. Dans un texte de 1951, Gödel pose, comme un "principe" général, "la non-éliminabilité du contenu mathématique d'un système axiomatique" [13]. En particulier, pour l'arithmétique élémentaire, il faudra reconnaître, sous une forme ou une autre, la réalité de l'infini. Du coup, une analyse épistémologique réapparaît au centre de ce programme modifié, qui consiste à remplacer des hypothèses pour les justifier par des arguments épistémologiques. Ceux-ci auront pour tâche d'établir, sous une forme ou sous une autre, la réalité de l'infini.

Le programme formaliste ne survit aux théorèmes de 1931 que sous une forme affaiblie et en se complétant d'une analyse épistémologique. Mais, sous cette forme, il est repris par les élèves de Hilbert et par Gödel : "il reste un espoir, écrit celui-ci en 1933, que dans le futur on puisse trouver des méthodes satisfaisantes [...] dépassant les limites du système [finitiste de Hilbert] et permettant de fonder l'arithmétique classique et l'analyse. Cette question ouvre un champ de recherches fécond."[14] En 1935, Gentzen donne une première démonstration de la consistance de l'arithmétique élémentaire, au moyen d'une induction sur les ordinaux transfinis de la classe II jusqu'à ε_0, qu'il justifie par une analyse des figures que prend l'infini dans les raisonnements classiques[15]. Dans des exposés de 1938 et de 1941, Gödel passe en revue différentes méthodes pour étendre le finitisme, étudiant la démonstration de Gentzen et esquissant ce qui deviendra le système *Dialectica*[16]. Ainsi, le logicien amorce des recherches sur les fondements de l'arithmétique, liées à sa philosophie des mathématiques et, croyons-nous, à une analyse de la subjectivité mathématicienne.

Parallèlement, le premier théorème de 1931, l'incomplétude, semble mettre en question le rationalisme de Hilbert. Les systèmes formels, qui

---

[12] Gödel, "Lecture at Zilsel's", 1938, dans (1986-95), t. III, p. 112-113

[13] Gödel, "Is mathematics syntax of language?", 1953-1959, dans (1986-95), t. III, p. 345.

[14] Gödel, "The present situation in the foundations of mathematics", 1933, dans (1986-95), t. III, p. 53.

[15] Gentzen (1935). ε_0 est la limite de la suite définie par $u_0=\omega$ et $u_{n+1}=\omega^{u_n}$.

[16] Gödel, "Lecture at Zilsel's", 1938 ; "In what sense is intuitionistic logic constructive?", 1941, dans (1986-95), t. III.

représentent les théories mathématiques, l'arithmétique, la théorie des ensembles, ne sont pas syntaxiquement complets et, par exemple, il existe des problèmes arithmétiques insolubles au moyen des méthodes de l'arithmétique élémentaire. Le théorème d'incomplétude réfute les propriétés logiques par lesquelles Hilbert exprimait le principe épistémologique de la décidabilité des problèmes mathématiques. Cependant, il ne réfute pas ce principe même. On ne peut pas tirer du théorème d'incomplétude l'existence de problèmes mathématiques dépourvus de toute solution mais seulement l'existence de problèmes arithmétiques dépourvus de solution dans l'arithmétique et exigeant un détour par une théorie plus puissante, comme la théorie des ensembles, l'existence de problèmes ensemblistes dépourvus de solution dans la théorie classique et exigeant la position de nouveaux axiomes.

Avec le théorème d'incomplétude, Gödel ne met pas en évidence de propositions indécidables en soi, indécidables pour l'esprit humain mais indécidables par les axiomes d'un système donné, comme l'arithmétique élémentaire. En réalité, le théorème repose sur la construction d'une formule arithmétique, I, dont on montre qu'elle signifie "I n'est pas démontrable". Le raisonnement métamathématique, qui établit l'indécidabilité de la formule I dans l'arithmétique élémentaire, montre, du même coup, que la formule I est vraie, selon une interprétation standard. La formule I pourrait être démontrée dans une métamathématique formalisée. Bref, "la preuve que la proposition I est indécidable est en même temps une procédure de décision, qui, simplement, ne s'exprime pas dans le système initial" et, par conséquent, "la conviction dans la décidabilité des problèmes mathématiques n'est pas affaiblie par ce résultat"[17].

En outre, sachant qu'une formule dont est établie l'indécidabilité doit être vraie, nous pouvons l'ajouter comme axiome au système initial, pour obtenir un système plus puissant qui comportera des indécidables mais, à son tour, pourra être complété. Une telle procédure semble permettre de constituer une série indéfinie de systèmes formant un édifice complet : toute proposition formulée dans l'un des systèmes est décidable, ou démontrable ou réfutable, dans ce même système ou dans un système plus puissant. La difficulté est de fixer la règle qui, à chaque étape, détermine la formule indécidable qui complète le système antérieur. La généralisation

---

[17] Gödel, "Undecidable diophantine propositions", 193 ?, dans (1986-95), t. III, p. 174-175.

qui sera donnée au théorème d'incomplétude à partir des travaux de Turing montrera que, pour que l'édifice soit complet, il faut que la règle, qui gouverne l'extension des mathématiques formelles, ne puisse pas être suivie par une machine, qu'elle ne se réduise pas à une manipulation de signes mais fasse intervenir un élément sémantique.

Gödel peut maintenir le principe hilbertien de la résolubilité des problèmes mathématiques : "à toute question claire que la raison pose, la raison peut trouver une réponse claire"[18]. Si l'on part de ce principe, le théorème d'incomplétude oblige à admettre que la raison humaine surpasse toute machine de Turing et à reconnaître que les mathématiques font intervenir une série indéfinie de systèmes formels[19]. "Il n'existe aucun formalisme qui puisse embrasser toutes les étapes (du développement mathématique), mais il n'est pas exclu que toutes ces étapes (...) puissent être décrites et, pour ainsi dire, rassemblées d'une façon non constructive"[20]. Le problème est de décrire la règle qui détermine l'extension des systèmes et de la justifier en analysant ce qui distingue la raison humaine d'une machine de Turing.

Cependant, le théorème d'incomplétude révèle une autre difficulté dans le programme formaliste. En effet, Hilbert représentait les théories classiques par des systèmes formels, dans lesquels le raisonnement mathématique était remplacé par des manipulations symboliques. Il était supposé qu'un système consistant, comprenant un minimum d'arithmétique, n'admettrait pas de propositions fausses dans leur contenu intuitif. Or c'est ce que le théorème d'incomplétude met en question. La proposition indécidable I, qui signifie "I n'est pas démontrable", est vraie, dans une interprétation standard. Néanmoins, puisqu'elle est indécidable, on pourrait en poser la négation comme axiome. On obtiendrait un système consistant, qui comprend l'arithmétique élémentaire mais comporte des propositions

---

[18] Gödel, "The modern development of the foundations of mathematics...", 1961, dans (1986-95), t. III, p. 381.

[19] Gödel, "Some basic theorems on the foundations...", 1951, dans (1986-95), t. III, p. 308, p. 310. Egalement, Gödel, "The present situation in the foundations of mathematics", 1933, dans (1986-95), t. III, p. 47-48, et la célèbre note de Gödel, "Über formal unentscheidbare Sätze der *Principia Mathematica*...", 1931, dans (1986-95), t. I, p. 181, n. 48a

[20] Gödel, "Remarks before the Princeton bicentennial conference ...», 1946, dans (1986-95), t. II, p. 151.

aberrantes[21]. Bref, dans la mesure où les systèmes formels qui représentent les mathématiques classiques comportent des propositions indécidables, il ne suffit pas de s'assurer de leur consistance. Il faut rendre leur sens aux symboles et s'assurer de leur vérité contentuelle. Or, dès lors que l'on rend un sens aux symboles et que l'on considère le contenu des axiomes, on retombe dans les difficultés épistémologiques que dénonçaient les mathématiciens critiques, Borel, Poincaré et Brouwer. En particulier, on ne peut accepter les procédés transfinis utilisés dans les mathématiques classiques, le tiers exclu en arithmétique, les définitions imprédicatives en analyse et l'axiome du choix en théorie des ensembles, qu'à la condition de reconnaître la réalité de l'infini et d'accorder une existence en soi, indépendante des actes, aux objets mathématiques. Ainsi, dans le cas même où l'on donnerait des preuves satisfaisantes pour la consistance des théories classiques, dans le cadre d'un formalisme assoupli, il faudrait revenir à ce platonisme, dont se défendait Hilbert. En 1933, Gödel ne fait que poser le problème d'une réalité mathématique[22]. Dans des textes ultérieurs, Gödel adoptera une position platoniste : "les mathématiques décrivent une réalité non sensible, qui existe indépendamment des actes et des facultés de l'esprit humain, une réalité qui n'est que perçue et, probablement, perçue de façon très incomplète par l'esprit humain"[23]. Tandis que Poincaré, par exemple, refusant d'admettre l'existence en soi des objets mathématiques, rejetait les inférences transfinies des mathématiques classiques, Gödel, acceptant celles-ci, doit reconnaître l'existence en soi des objets mathématiques[24].

Les théorèmes de 1931 montrent qu'il est impossible d'établir le fondement et de donner une représentation rationaliste des mathématiques dans le cadre du programme de Hilbert. Néanmoins, Gödel reprend les deux objectifs de Hilbert et, en cela, lance ce que nous pouvons appeler un

---

[21] Nous reprenons grossièrement l'argument de Gödel, dans "Diskussion zur Grundlegung der Mathematik" 1931, dans (1986-95), t. I, p. 200-201. C'est en développant cet argument que Gödel annonce son théorème d'incomplétude lors d'une conférence à Königsberg en septembre 1930.

[22] Gödel, "The present situation in the foundations of mathematics", 1933, dans (1986-95), t. III, p. 50.

[23] Gödel, "Some basic theorems on the foundations", 1951, dans (1986-95), t. III, p. 323

[24] Notamment, Gödel, "Russell's mathematical logic", 1944, dans (1986-95), t. II, p. 127-128.

programme, qui prolonge celui de Hilbert mais doit trouver de nouvelles formulations et de nouvelles méthodes. En particulier, alors que le programme formaliste fait de l'infini une sorte de fiction et entend se réduire à un exercice mathématique, celui de Gödel repose sur l'hypothèse de l'infini comme réel et passe par une analyse épistémologique, une analyse de la subjectivité mathématicienne.

2. Le rationalisme de Gödel

Le principe hilbertien, de la résolubilité des problèmes mathématiques, pourra être maintenu si les systèmes formels, qui représentent les théories usuelles, s'intègrent dans un édifice complet. Après le théorème de 1931, un tel édifice ne peut consister qu'en une série indéfinie de systèmes déterminés par une loi sémantique, non mécanique. Le problème est de décrire et de justifier cette règle qui gouverne l'extension des systèmes mathématiques.

Considérons la procédure suivante. Supposons que, à chaque étape, est ajoutée comme axiome une formule exprimant la consistance des systèmes antérieurs. En effet, dans le second théorème de 1931, Gödel construit une formule exprimant la consistance du système et montre qu'elle est indécidable, ni démontrable, ni réfutable, dans le système. Partant, par exemple, de l'arithmétique élémentaire, il suffit de poser comme axiome sa consistance, pour obtenir un second système, dont la consistance est indécidable et sera posée comme axiome. Et ainsi de suite. L'extension, indéfinie, des mathématiques vient de ce que, à chaque étape, on reconnaît la consistance des déductions effectuées, et celle-ci, qui ne se déduit pas du système antérieur, constitue un nouvel axiome. L'extension obtenue, à partir de l'arithmétique élémentaire, ne provient que d'une indéfinie réflexion sur les déductions effectuées. Elle ne fait qu'expliciter toujours à nouveau le même postulat : les raisonnements que l'on a conduits jusqu'à présent étaient consistants.

Cette procédure, qui consisterait, à chaque étape, à écrire une formule exprimant la consistance du système antérieur pour l'ajouter aux axiomes, peut être implémentée sur une machine et ne permet pas de constituer une extension complète de l'arithmétique élémentaire. Il faudrait ou bien pouvoir la prolonger dans le transfini[25] ou bien utiliser des formules exprimant, non plus la consistance, mais, en un sens à préciser, la vérité des théorèmes antérieurs[26]. Néanmoins, la procédure initiale illustre l'orientation réflexive dans laquelle peut se faire l'extension de l'arithmétique. Or c'est bien une telle orientation que Gödel semble d'abord avoir en vue : "[Quel que soit le formalisme], la considération de ce formalisme même produit de nouveaux axiomes, qui sont aussi évidents et justifiés que ceux dont vous êtes partis."[27] Il suffit que le mathématicien puisse réfléchir sur le formalisme qu'il utilise, reconnaître la vérité des déductions qu'il a effectuées, leur consistance, et exprimer ces propriétés métamathématiques dans de nouveaux axiomes pour que la mathématique se développe indéfiniment.

C'est également par cette réflexivité que Gödel distingue l'esprit et la machine. Une machine ne peut pas établir la consistance du système dans lequel elle déduit. C'est grossièrement le résultat qu'établit Turing en 1937. En fait, une machine, ou l'esprit conçu comme une machine, "ne peut pas se comprendre lui-même", "ne peut pas comprendre son propre mécanisme", en ce sens qu'il ne peut pas reconnaître que ses déductions restent consistantes et aboutissent à des résultats corrects et, par exemple, applicables à la nature[28]. Or c'est par là que l'esprit se distingue de la machine : "lorsque l'on parle de l'esprit comme d'une machine, on entend une machine qui se reconnaît être correcte (*a machine that recognizes itself as right*)."[29]

Dans cette perspective, l'esprit serait une machine universelle, capable de déduire dans tout système, couplée à un dispositif réflexif, qui éta-

---

[25] Dès 1939, Turing définit, pour remédier à l'incomplétude des formalismes, des procédures de ce type, mais transfinies, produisant des systèmes superposés, coordonnés aux nombres ordinaux, et obtient des résultats pour la décidabilité de certaines classes de formules arithmétiques. *Cf.* Turing (1939), également Salomon Feferman (1988).

[26] Salomon Feferman a travaillé sur de telles extensions de l'arithmétique élémentaire, sans obtenir de résultats de complétude (S. Feferman (1991). Également, Salomon Feferman (1998)).

[27] Gödel, "Remarks before the Princeton Bicentennial conference...", dans (1986-95), t. II, p. 151.

[28] Gödel, "Some basic theorems on the foundations...", 1951, dans (1986-95), t. III, p. 310.

[29] Gödel, cité dans Wang (1996), p. 189.

blit les propriétés métamathématiques des déductions effectuées, consistance, vérité, et utilise ces propriétés dans des axiomes pour de nouvelles déductions. A chaque étape de son développement, l'esprit est analogue à une machine, déduisant dans un système. Mais, contrairement à la machine, l'esprit "se comprend lui-même" et cette auto-compréhension engage un développement indéfini. La différence entre l'esprit et la machine résiderait dans cette réflexivité et la possibilité de cet indéfini développement. Si les termes et les états internes, dont dispose l'esprit restent finis, comme ceux d'une machine, ils convergent vers l'infini dans l'extension des mathématiques : "Ce que Turing a négligé [en identifiant l'esprit à une simple machine], c'est que l'esprit, en pratique, n'est pas statique mais en développement permanent"[30].

Nous pouvons interpréter de deux façons différentes la position de l'esprit comme machine réflexive. Ou bien le point de départ est la reconnaissance, quasi phénoménologique, des deux composantes de l'esprit : la composante déductive, qui n'est que mécanique, la composante réflexive, qui reconnaît les propriétés métamathématiques des déductions effectuées. Et, de cette analyse de la subjectivité mathématicienne, se déduit l'extension indéfinie des systèmes formels et la possibilité, qui reste ouverte, de constituer un édifice complet, vérifiant le principe de la décidabilité des problèmes mathématiques. Ou bien le point de départ est le principe de la décidabilité des problèmes mathématiques, posé comme postulat épistémologique, exigeant une extension indéfinie des systèmes formels et dont l'esprit comme machine réflexive n'est que le corrélat, la traduction subjective. Selon cette seconde interprétation, le cheminement de Gödel est à l'inverse de celui de Descartes. En effet, selon la tradition, Descartes appuie la vérité, des mathématiques et des sciences de la nature, sur le "Je pense donc je suis". La conscience, qui permet d'affirmer "Je pense", fonde l'être de la subjectivité, "Je suis", et, dans la mesure où l'existence de Dieu s'en déduit, le "Je suis" fonde la vérité mathématique. Or reprenons le chemin qui semble conduire Gödel à la position de l'esprit comme machine réflexive. Nous commençons par décrire un édifice mathématique. Nous concevons une machine réflexive, une machine à déduire couplée à un dispositif réflexif, qui reconnaît les propriétés métamathématiques et, en particulier, la vérité des déductions effectuées et les affirme

---

30 Gödel, "Some remarks on the undecidability results", 1972, dans (1986-95), t. III, p. 306.

dans de nouveaux axiomes pour de nouvelles déduction. Une telle machine serait capable de développer un édifice complet. Nous concluons que nous sommes de telles machines. L'idée de vérité détermine notre description de l'édifice mathématique et de la machine réflexive, à laquelle, finalement, nous nous identifions. Ici, la conscience est un effet de miroir : c'est en voyant dans l'édifice mathématique fonctionner la machine réflexive que nous nous apercevons être cette machine réflexive et que nous prenons conscience de nous-mêmes. Bref, si Descartes va de la conscience, à la subjectivité et à la vérité mathématique, Gödel irait de la vérité mathématique, à la subjectivité et à la conscience.

Nous avons, avec cette machine réflexive, un premier modèle de la subjectivité mathématicienne, justifiant l'objectif d'une représentation rationaliste de l'édifice mathématique. Pour un esprit de ce genre, tout problème, en mathématiques, peut admettre une solution. Néanmoins, à propos de la théorie des ensembles, Gödel modifie, ou approfondit, son épistémologie. Il proposera un deuxième modèle de la subjectivité mathématicienne, dans la tradition cartésienne[31].

En 1938, Gödel établit la non contradiction de l'hypothèse du continu et de l'axiome du choix avec les autres axiomes de la théorie des ensembles[32]. On ne peut pas réfuter l'hypothèse du continu, dans la théorie usuelle, et Gödel conjecture qu'on ne peut pas non plus la démontrer, de sorte que l'hypothèse du continu est indécidable dans la théorie usuelle. Cette conjecture sera vérifiée en 1963 par P. Cohen.

En 1939, Gödel considère l'hypothèse du continu, indécidable dans la théorie des ensembles formalisée par Zermelo ou par Bernays, comme une proposition "absolument" indécidable et, par conséquent, comme un problème sans solution pour l'esprit humain[33]. Dans les textes ultérieurs, Gödel reconnaît l'existence d'une réalité mathématique, indépendante de nos théories, et admet que l'hypothèse du continu, exprimant une relation déterminée entre des objets de la réalité mathématique, possède une valeur de vérité. L'indécidabilité de l'hypothèse du continu n'est que le signe de

[31] Nous passons plus rapidement sur cette deuxième analyse, que nous avons déjà évoquée dans Cassou-Noguès ("à paraître-b").

[32] Gödel, "The consistency of the axiom of choice and of the generalized continuum hypothesis", 1938, dans (1986-95), t. II.

[33] Gödel, "Lecture at Göttingen", 1939, dans (1986-95), t. III, p. 154-155 ; "Brown University lecture", 1940, dans (1986-95), t. III, p. 185.

l'insuffisance de la théorie usuelle[34]. Il s'agit d'étendre les axiomes de la théorie des ensembles pour donner une réponse au problème du continu.

Gödel isole deux critères pour l'adoption de nouveaux axiomes. Le premier est la fécondité de l'axiome. La vraisemblance d'un axiome sera mesurée à ses applications : conséquences vérifiables au moyen d'axiomes reconnus évidents ou simplification dans des démonstrations connues. Ce premier critère, qui est en quelque sorte inductif, rapproche les mathématiques de la physique. En effet, les deux sciences, mathématique et physique, décrivent une réalité, indépendante de l'esprit, et ces axiomes, posés au nom de leur fécondité et au regard de leurs applications, sont analogues aux théories physiques, dont on ne fait que vérifier les conséquences observables.

Le deuxième critère est l'évidence de l'axiome, reconnue dans une réflexion phénoménologique sur la perception que nous avons des objets mathématiques. Les objets mathématiques existent en soi mais sont présentés dans une intuition, analogue à l'intuition sensible et qui se laisse ressaisir par coïncidence à soi. Or c'est, finalement, à la réflexion phénoménologique que Gödel en appelle pour justifier les axiomes et produire des systèmes, non plus "probables", mais "évidents" [35]. En effet, la formulation des axiomes dépend d'une clarification du sens des objets mathématiques. Or la phénoménologie de Husserl constitue, selon Gödel, une méthode systématique pour cette clarification du sens[36].

Ainsi, une réflexion phénoménologique intervient dans la découverte des axiomes et, de façon générale, dans le progrès scientifique. Gödel distingue deux directions, transversales, dans le développement de la pensée d'un enfant, par exemple. La première direction explore le monde extérieur, au moyen des organes sensoriels, puis d'instruments techniques. La seconde est un retour réflexif, qui interroge les concepts impliqués dans une activité antérieure. La science empirique et la technologie proviennent d'un progrès systématique dans la première direction. En revanche, la ma-

---

34 Gödel "What is Cantor's continuum problem?", 1947, dans (1986-95), t. II, p. 181; 1964, dans (1986-95), t. II, p. 260 et p. 258.

35 Sur la "probabilité" des axiomes issus de la méthode inductive : Gödel, "What is Cantor's continuum problem?", 1947, dans (1986-95), t. II, p. 182 ; 1964, dans (1986-95), t. II, p. 261.

36 Gödel, "The modern development of the foundations...", 1961, dans (1986-95), t. III, p. 382-383.

thématique semble se développer dans la seconde direction, par réflexions successives sur une activité primitive et sur les concepts qui y sont impliqués. C'est par réflexion sur son activité, sur ses actes antérieurs, que l'esprit mathématicien découvre de nouveaux axiomes et réalise une extension des théories, au-delà des possibilités d'une machine : "dans l'établissement systématique des axiomes mathématiques, de nouveaux axiomes, qui ne découlent pas formellement des précédents, deviennent évidents (...). C'est ce devenir évident de nouveaux axiomes, sur la base du sens des notions primitives, qu'une machine ne peut pas imiter."[37]

Les méthodes, inductive et phénoménologique, qui dirigent l'extension d'une théorie, en garantissent également les fondements : "Pour ces axiomes, il n'existe pas d'autre *fondation rationnelle* si ce n'est qu'ils (...) sont directement perçus comme étant vrais (...) ou qu'ils sont admis (comme des hypothèses physiques) à partir d'arguments inductifs (...)"[38]. Néanmoins, les axiomes, posés par la méthode inductive, restent probables alors que les axiomes, tirés de la réflexion phénoménologique, deviennent "évidents" et sont "perçus comme vrais"

Finalement, Gödel semble donner à la réflexion phénoménologique, qui fournit des axiomes, non probables mais évidents, la double tâche de la découverte et de la justification, de l'extension et de la fondation des théories. A propos de la théorie des ensembles, Gödel décrit la méthode, qui dirige l'extension indéfinie des théories mathématiques, comme une réflexion sur notre intuition. La subjectivité, qui sous-tend le développement de l'édifice mathématique, n'est plus une machine "qui se sait être correcte" et dont la réflexion ne consiste qu'à reconnaître et à affirmer les propriétés métamathématiques des déductions antérieures. La subjectivité mathématicienne est la conscience de la phénoménologie, capable de réfléchir ses actes, capable de saisir ses vécus dans une sorte "d'auto-illumination intérieure"[39].

---

[37] Gödel, "The modern development of the foundations...", 1961, dans (1986-95), t. III, p. 384-385. "Is mathematics syntax of language", 1953/59, dans (1986-95), t. III, p. 349.

[38] Gödel, "Is mathematics syntax of language?", 1953-59, dans (1986-95), t. III, p. 346-347. Nous soulignons.

[39] Nous reprenons une expression de Cavaillès (1947), p. 3

3. Le fondement de l'arithmétique

Finalement, Gödel place le fondement des théories classiques dans une réflexion phénoménologique sur l'intuition des objets mathématiques. Cette réflexion doit permettre de clarifier le sens des objets et de justifier les axiomes mathématiques. Le fondement des mathématiques relève d'une analyse épistémologique. Néanmoins, partant d'une théorie quelconque, il reste à donner aux hypothèses qui la sous-tendent, l'infini actuel de la suite des entiers, une formulation qui se prête à cette justification épistémologique. Cela exige un travail technique. Gödel procède à des traductions de l'arithmétique classique dans d'autres systèmes : dès 1933, traduction de l'arithmétique classique dans l'arithmétique intuitioniste[40]; traduction de l'arithmétique intuitioniste, et de l'arithmétique classique, dans le système dit *Dialectica*, exposée pour la première fois en 1941, publiée en 1958 et remaniée en 1972[41]. Nous verrons que le système *Dialectica* reflète l'épistémologie mise en place à propos de la théorie des ensembles.

Hilbert espérait fonder l'arithmétique élémentaire avec une preuve finitiste de consistance. Les théorèmes de 1931 établissent qu'il est impossible de prouver la consistance de l'arithmétique au moyen de raisonnements qui s'expriment dans l'arithmétique. En 1933, Gödel montre que les raisonnements finitistes s'expriment dans l'arithmétique. La seule solution est d'étendre les raisonnements métamathématiques au-delà des limites finitistes qu'indiquait Hilbert. Mais il faut justifier cette extension et montrer, par des arguments épistémologiques, la légitimité des raisonnements utilisés dans le fondement des mathématiques. C'est ce que tentait Gentzen dans sa preuve de consistance, dès 1935. La même préoccupation guide Gödel.

En 1933, Gödel traduit l'arithmétique classique dans l'arithmétique intuitioniste de telle sorte qu'une formule démontrable, dans l'arithmétique classique, se traduit par une formule démontrable de l'arithmétique intuitioniste et qu'une contradiction dans l'arithmétique classique se traduirait par une contradiction dans l'arithmétique intuitioniste. Brouwer refusait

---

[40] Gödel, "Zur intuitionistischen Arithmetik und Zahlentheorie", 1933, dans (1986-95), t. I.

[41] Gödel, "Über eine bisher noch nicht benützte Erweiterung des finiten Standpunktes", 1958, dans (1986-95), t. II.

l'usage du tiers exclu et ouvrait une nouvelle arithmétique, soumise à une exigence de constructivité et justifiée par une analyse de la conscience temporelle. La traduction dans l'arithmétique intuitioniste pourrait constituer un fondement pour l'arithmétique classique. Selon Gödel, ce n'est pas le cas. La possibilité d'une telle traduction ne fait que manifester l'insuffisance des critiques intuitionistes au niveau de l'arithmétique[42]. Gödel distingue deux difficultés dans la critique et l'arithmétique intuitionistes. La première vient de l'absurdité, la négation intuitioniste, qui s'applique aux propositions universelles. Dans l'arithmétique intuitioniste, on peut affirmer, pour une équation comme $n^2=n^3+1$, que ou l'équation est vérifiée par tous les entiers ou cette hypothèse est absurde, c'est-à-dire conduit à une contradiction. Or, dans cette disjonction, le deuxième terme joue le rôle des propositions d'existence dans le tiers exclu classique : ou l'équation est vérifiée par tous les entiers ou il existe un entier ne vérifiant pas l'équation. On pourra traduire les propositions d'existence de l'arithmétique classique par des propositions d'absurdité dans l'arithmétique intuitioniste. Cela montre que la critique intuitioniste du tiers exclu est inefficace. Pour obtenir un système constructif, en réalité, il faudrait franchir un pas supplémentaire et éliminer ces propositions d'absurdité, par lesquelles on traduit les propositions d'existence classiques. Autrement dit, il faudrait interdire la négation des propositions universelles ou ne lui donner sens que dans la mesure où l'on a calculé un contre-exemple[43].

L'équivalence entre l'arithmétique classique et l'arithmétique intuitioniste manifeste l'insuffisance de la critique intuitioniste du tiers-exclu. L'intuitionisme a reformulé l'arithmétique classique, sans éliminer les considérations transfinies qui la sous-tendent. Pour Gödel, les restrictions qu'impose l'intuitionisme par rapport au raisonnement classique ne deviennent efficaces qu'en analyse, avec l'interdiction des définitions imprédicatives[44].

---

[42] Gödel, "The present situation in the foundations ...", 1933, dans (1986-95), t. III, p. 53 ; "In what sense is intuitionistic logic constructive?", 1941, dans (1986-95), t. III, p. 190.

[43] Gödel "The present situation in the foundations ..."1933, dans (1986-95), t. III, p. 51.

[44] Gödel, "Zur intuitionistischen Arithmetik...", 1933, dans (1986-95), t. I, p. 294-285 ; "The present situation in the foundations ...", 1933, t. III, p. 53

En fait, cette première difficulté est le signe d'une deuxième, plus grave. La logique intuitioniste fait problème dans son principe même. L'intuitionisme part d'une exigence de constructivité : on ne reconnaît que des opérations que l'on peut accomplir et des objets que l'on peut construire à partir des entiers ; on n'affirme que des propositions que l'on peut prouver. Ainsi, Heyting est conduit à fixer le sens des connecteurs de la logique intuitioniste en se référant aux déductions et aux conséquences possibles d'une proposition. Par exemple, p implique q, signifie, en logique intuitioniste, qu'il existe une déduction de q à partir de p. L'absurdité de p, qui tient lieu de négation, signifie que l'on peut déduire une contradiction de p. Cependant, les déductions, auxquelles Heyting renvoie pour fixer le sens des connecteurs, ne sont pas des dérivations à l'intérieur du système formel mais des raisonnements quelconques dans un univers mathématique[45]. La logique intuitioniste suppose données, et formant une totalité bien définie, les preuves et les conséquences possibles d'une proposition dans l'univers mathématique. Elle semble reposer sur un cercle imprédicatif, puisque, en s'appuyant sur la totalité des preuves, elle définit un système formel et de nouveaux moyens de preuve. La logique intuitioniste repose sur une totalité transfinie, celle des preuves. L'intuitionisme ne respecte pas le principe de constructivité. C'est pourquoi son arithmétique se révèle aussi problématique que l'arithmétique classique[46].

La traduction dans l'arithmétique intuitioniste ne suffisant pas à fonder l'arithmétique classique, Gödel propose une seconde traduction de

---

[45] En effet, dans un autre article de 1933, Gödel traduit la logique intuitioniste, le calcul propositionnel, dans un système classique auquel est ajouté un connecteur unaire B, signifiant "être prouvable" et caractérisé par trois axiomes : $Bp \rightarrow p$, $Bp \rightarrow (B(p \rightarrow q) \rightarrow Bq)$, $Bp \rightarrow BBp$. Gödel exprime les connecteurs intuitionistes au moyen de ce B. Or ce B s'interprète comme un "être prouvable" dans l'univers mathématique mais ne peut pas s'interpréter comme "être prouvable" dans un système donné, si celui-ci comprend l'arithmétique élémentaire. Car on déduit la formule $B(Bp \rightarrow p)$, qui signifierait, pour p : $(0 \neq 0)$, que l'on prouve à l'intérieur du système $B(0 \neq 0) \rightarrow (0 \neq 0)$ et $\neg B(0 \neq 0)$, la consistance du système, ce que le théorème de 1931 interdit. *Cf.* Gödel, "An interpretation of the intuitionistic propositional calculus",1933, dans Gödel (1986-95), t. I, p. 302-303.

[46] Gödel, "The present situation in the foundations ...", 1933, t. III, p. 53 ; "Lecture at Zilsel's",1938, dans (1986-95), t. III, p. 100-101 ; Gödel, "In what sense is intuitionistic logic constructive?", 1941, dans (1986-95), t. III, p. 190.

l'arithmétique intuitioniste et, indirectement, de l'arithmétique classique dans le système *Dialectica*. Le système tire son nom de la revue dans laquelle paraît l'article de 1958, "Sur une extension des mathématiques finitistes qui n'a pas encore été utilisée". Le problème est de fonder et, pour cela, de traduire l'arithmétique dans un système qui dépasse le finitisme mais dont on puisse justifier les hypothèses. Cette extension, à partir du finitisme, dépend d'une analyse épistémologique. Or Hilbert, se référant à Kant, soutenait que les raisonnements finitistes, qui possèdent une évidence immédiate, portent sur "objets concrets", des objets donnés dans une expérience, une intuition sensible[47]. Ces objets sont, dans l'arithmétique finitiste, des séries de bâtons tracés sur une feuille de papier, qui figurent les entiers, et, dans la métamathématique, les assemblages de signes qui forment les dessins de démonstration. Gödel refuse cette clause qui rapporte le raisonnement à des objets concrets. L'extension, à partir du finitisme, sera obtenue par l'introduction de "concepts abstraits", de "concepts du deuxième ordre ou plus" qui ne représentent pas les propriétés des objets concrets mais celles "des productions mentales", "des structures", "des contenus de pensée", qui interviennent dans nos opérations sur les objets concrets[48]. Cette extension doit se comprendre dans l'épistémologie qu'a développée Gödel à propos de la théorie des ensembles. D'une part, les objets "abstraits", de la réalité intelligible, ont la même évidence et sont donnés dans une intuition de même nature que les objets "concrets", de la réalité sensible. Gödel peut donc refuser de réduire la mathématique intuitive à la manipulation d'objets concrets et intégrer des objets abstraits dans l'extension qu'il se propose de la mathématique finitiste. D'autre part, le logicien distinguait deux directions dans le progrès de la pensée, l'une qui poursuit une exploration du monde extérieur, l'autre qui revient sur nos opérations primitives pour dégager les concepts qui y sont impliqués. Le progrès et, maintenant, le fondement des mathématiques dépendent de ce retournement réflexif. En effet, les objets "abstraits", dont il est question, ne représentent pas les propriétés des objets concrets, qui intervenaient dans l'arithmétique finitiste, mais celles de nos constructions mentales, de nos contenus de pensée. Si, pour fonder l'arithmétique, il est nécessaire de dépasser le finitisme de Hilbert, il faut tirer des opérations finitistes de

[47] Hilbert, "De l'infini", p. 232

[48] Gödel, "Über eine bisher noch nicht benützte Erweiterung des finiten Standpunktes", 1958, t. II, p. 240-241 ; 1972, t. II, p. 272-273.

nouveaux concepts, qui constituent des objets abstraits mais dont on peut faire une mathématique intuitive. En fait, l'arithmétique finitiste, telle que la caractérisait Gödel, consistait en procédures de calcul sur les entiers naturels. Mais on peut saisir pour lui-même ce concept de calculabilité et, en le considérant comme une notion intuitive, s'y appuyer pour donner un fondement à l'arithmétique.

Nous ne discuterons pas de la technique que Gödel utilise pour la traduction de l'arithmétique intuitioniste. Les objets du système, que Gödel note T, sont des fonctions calculables de type fini, des fonctions calculables qui ont pour arguments et pour valeurs des entiers ou des fonctions de type plus simple[49]. L'arithmétique, à travers cette traduction, se trouverait fondée sur une hiérarchie de fonctions calculables. Il faut admettre que celles-ci forment un domaine fixé et bien déterminé. Or la définition des fonctions calculables de type fini fait problème. Gödel adopte deux stratégies différentes, dans l'exposé de 1941 et dans l'article de 1958, remanié en 1972.

Dans ce premier exposé, les fonctions, qui constituent les objets du système, sont définies par la donnée de schémas explicites[50]. Il faut alors vérifier que les fonctions, de différents types, définies par ces schémas sont calculables. Gödel indique deux démonstrations possibles[51]. La première

---

[49] Les entiers forment le type 0. Le type 1 ou (0, 0) est constitué de fonctions, qui associent un entier à un entier. Une fonction, qui associe un entier à une fonction de type 1, est de type 2 ou ((0,0), 0). Plus généralement, deux types t_1 et t_2 étant définis, une fonction qui associe un objet de type t_1 à un objet de type t_2, est de type (t_2, t_1).

L'idée, grossièrement, est de coordonner les formules intuitionistes à des énoncés de la forme :

$\exists f_1 \ldots \exists f_n \forall g_1 \ldots \forall g_m R(f_1, \ldots, f_n, g_1, \ldots, g_m)$, où les f_i, g_i, sont des fonctions calculables de type fini et R est une relation décidable. L'énoncé coordonné à une formule démontrable est vérifié par la donnée de termes $a_1, \ldots, a_n$ tels que $\forall g_1 \ldots \forall g_m R(a_1, \ldots, a_n, g_1, \ldots, g_m)$. Une contradiction dans l'arithmétique intuitionisme signifierait que les fonctions calculables, $g_1, \ldots, g_m$, vérifient deux relations contradictoires.

[50] Gödel, "In what sense is intuitionistic logic constructive?", 1941 t. III, p. 194-195.

[51] Gödel, "In what sense is intuitionistic logic constructive?", 1941, t. III, p. 195 et l'introduction de A. Troelstra, p. 188-189.

utiliserait les axiomes de l'arithmétique, que l'on veut fonder, et doit être écartée. La deuxième fait intervenir une induction sur le segment $(0,\epsilon_0)$ de la classe II des ordinaux. Gentzen utilisait la même induction dans sa démonstration de consistance, de 1935. L'arithmétique apparaît fondée sur une induction transfinie.

Dans l'article de 1958 et la version remaniée de 1972, Gödel part de la notion de procédure calculable, sur quelque objet que ce soit, en la considérant comme une notion primitive, "immédiatement intelligible"[52]. Il renvoie, pour justifier l'intelligibilité de la notion de procédure calculable, à l'analyse de Turing. Turing a donné une définition de la calculabilité, sur les entiers, qu'il justifiait en analysant la façon dont on conduit un calcul. Mais, soutient Gödel, il faut que la notion de procédure calculable, sur les entiers ou sur quelque objet que ce soit, ait été intelligible avant la définition de Turing, pour que la question de l'adéquation de celle-ci se pose. Loin d'introduire un nouvel objet au moyen d'une définition arbitraire, Turing fixe le contenu mathématique d'une notion intuitive, qui préexistait à sa définition, bien que n'étant perçue que de façon indistincte[53]. Or, à partir de la notion de procédure calculable, considérée comme notion primitive, Gödel peut définir les fonctions du système sans introduire les schémas de 1941 et l'induction transfinie qui les justifie.

La question reste de savoir si la traduction dans le système *Dialectica* donne un fondement satisfaisant à l'arithmétique élémentaire. Cela revient à demander si la hiérarchie des fonctions calculables de type fini forme une totalité bien définie. La difficulté est que les fonctions calculables de type fini et, déjà, les fonctions calculables sur les entiers, de type 1, ne peuvent pas être engendrées dans une procédure uniforme. Techniquement, c'est par là que le système, dans lequel est traduit l'arithmétique, transgresse les clauses qui définissent la mathématique finitiste[54]. La hiérarchie des fonctions calculables échappe à la pensée constructive et doit être supposée exister en soi et être délimitée, indépendamment de nos constructions. En fait, elle est supposée fixée par la notion intuitive de

---

[52] Gödel "Über eine bisher noch nicht benützte Erweiterung des finiten Standpunktes" 1958, t. II, p. 244-245 ; 1972, t. II, p. 275.

[53] *Cf.* Lettre à H. Wang, citée dans Wang (1974), p. 12.

[54] *Cf.* Gödel, "The present situation in the foundations ...", t. III, p. 51 ; "Lecture at Zilsel's",1938, t. III, p. 90-91.

procédure de calcul. Il faudrait donc admettre une intuition de ce que c'est qu'une procédure calculable, indépendamment de ses objets. Cette intuition deviendrait alors le fondement de l'arithmétique.

La traduction dans l'arithmétique intuitioniste revient à fonder l'arithmétique classique sur la notion de prouvabilité. La traduction *Dialectica* revient à fonder l'arithmétique classique sur la notion de calculabilité, appliquée à des fonctions de type arbitraire. La question serait de savoir si cette notion de calculabilité constitue un fondement adéquat pour l'arithmétique élémentaire. Les révisions successives auxquelles Gödel a soumis son texte semblent indiquer qu'il n'a pas de réponse satisfaisante à cette question épistémologique.

Quoi qu'il en soit, la perspective dans laquelle Gödel veut fonder l'arithmétique correspond à l'épistémologie développée à propos de la théorie des ensembles. La mathématique finitiste consistait en manipulations réglées sur des objets concrets, des bâtons tracés sur une feuille de papier et figurant les nombres entiers. Le système que décrit Gödel pour fonder l'arithmétique représente une extension de la mathématique finitiste grâce à la thématisation d'un concept abstrait, la calculabilité, dégagé par réflexion sur les opérations finitistes. Le progrès, en mathématiques, passe par une conversion réflexive, qui, plutôt que de poursuivre une activité sur des objets concrets, se retourne sur cette activité et dégage les concepts qui y interviennent. Les objets abstraits, qui se constituent alors, ont la même évidence que les objets concrets et peuvent être réintroduits dans la mathématique intuitive.

C.N.R.S. U.M.R. 8519, cassou-nogues@wanadoo.fr

TEXTES CITÉS

[1] BROUWER Luitzen E. J. (1908) : "De Onbetrouwbaarheid der logische principes", Tijdschr. voor Wisbegeert, 1908, t.2, p. 152-8 ; tr. fr. : "Qu'on ne peut pas se fier aux principes logiques", dans Largeault (1992), p. 15-24.

[2] BROUWER Luitzen. E. J. (1913) : "Intuitionism and formalism", Bull. Amer. Math. Soc, 1913, t.20, p. 81-06 ; tr. fr. "Intuitionisme et formalisme", dans Largeault (1992), p. 39-55.

[3] CASSOU-NOGUÈS Pierre (2001-a) : *Hilbert*, Les Belles Lettres, Paris, 2001.

[4] CASSOU-NOGUÈS Pierre (à paraître-a) : *Gödel*, Les Belles Lettres, Paris, à paraître 2002-2003.

[5] CASSOU-NOGUÈS Pierre (à paraître-b) : "La double orientation et l'idéal rationaliste de la logique : Husserl et Gödel", à paraître.

[6] FEFERMAN Salomon (1988) : "Turing in the land of O(z)", dans Herken, R. (éd), *The Universal Turing Machine: A Half Century Survey*, Oxford Univ. Press., Oxford, 1998.

[7] FEFERMAN Salomon (1991) : "Reflecting on Incompleteness", *Journal of Symbolic Logic*, 56, 1991, p. 1-49.

[8] FEFERMAN Salomon (1998) : *In Light of Logic*, Oxford Univ. Press, Oxford, 1998.

[9] GENTZEN Gerhard (1935) : "Die Widerspruchsfreiheit der reinen Zahlentheorie", *Mathematische Annalen*, 1935, t.112, p. 493-565 ; tr. fr. : "La consistance de l'arithmétique élémentaire", dans Largeault (1992), p. 285-358.

[10] GÖDEL Kurt (1986-1995) : *Collected Works*, S. Feferman et alii, Clarendon Press, Oxford, 1986-1995.

[11] HILBERT David (1900) : "Mathematische Probleme. Vortrag gehalten auf dem internationalen Mathematiker-Kongress zu Paris, 1900", *Arch. der Math. und Physik*, 1900, t.1, p. 44-63 et p. 213-37 ; tr. fr. L. Laugel : *Sur les problèmes futurs des mathématiques*, Ed. J. Gabay, Sceaux, 1990.

[12] HILBERT David (1925) : “Ueber das Unendliche”, *Mathematische Annalen*, 1926, t.95 ; tr. fr. : “Sur l’infini” dans Largeault, *Logique mathématique, textes*, A. Colin, Paris, 1972, p. 220-45.

[13] HILBERT David (1927) : “Die Grundlagen der Mathematik”, *Abh. aus d. Math. Semin. d. Hamb. Univ.*, 1928, t.6, p. 65-83 ; tr. fr. : “Les fondements des mathématiques”, dans Largeault (1992), p. 145-64.

[14] HILBERT David (1928) : “Probleme der Grundlegung der Mathematik”, *Mathematische Annalen*, 1929, t.102, p. 1-9 ; tr. fr. : “Problèmes de fondation des mathématiques”, dans Largeault (1992), p. 175-87.

[15] LARGEAULT Jean (1992) : *Intuitionisme et théorie de la démonstration*, Vrin, Paris, 1992.

[16] SINACEUR Hourya (1994) : “Du formalisme à la constructivité : le finitisme”, dans *Revue internationale de philosophie*, 1994.

[17] SINACEUR Hourya (1996) : “Le rôle de Poincaré dans la genèse de la métamathématique de Hilbert”, dans Greffe, J.-L. et Heinzmann, G. et Lorenz, K. (éds.), *Henri Poincaré : Science et philosophie*, Blanchard, Paris, 1996, p. 493-511.

[18] TURING Alan (1937) : “On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem”, reproduit dans Davis, M. (éd.) *The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions*, Raven Press, Hewlett (N.Y.), 1965.

[19] TURING Alan (1939) : “Systems of logic based on ordinals”, reproduit dans Davis, M. (éd.) *The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions*, Raven Press, Hewlett (N.Y.), 1965.

[20] WANG Hao (1974) : *From Mathematics to Philosophy*, Humanities Press, New York, 1974.

[21] WANG Hao (1996) : *A Logical Journey*, M.I.T. Press, London, 1996.

Cahiers François Viète, 3, 2002, 57-70

LE DÉBAT SUR L'ÉDUCATION EN FRANCE AU XVIII^{e} SIÈCLE*

Marcel GRANDIÈRE

Résumé
Le XVIII^{e} siècle est passionné d'éducation et de pédagogie. Certes le sujet bénéficie de l'ouverture d'un espace public où se débattent les grandes questions du royaume, mais il révèle surtout des remises en cause d'une importance considérable. Le siècle s'est mis à l'école de Newton et de Locke, la méthode de l'expérience est partout sollicitée, de même que la nouvelle métaphysique. Le point de vue de la société civile tente de s'imposer dans le domaine éducatif. Saisir ces évolutions, et les blocages qu'elles entraînent, donne un moyen d'observation privilégié sur le siècle qui précède la Révolution et les processus de transformation au cœur d'une société.

1. L'intérêt du sujet

La question de l'idéal d'éducation est au cœur de l'histoire du XVIII^{e} siècle, de l'histoire de la pensée, mais également de l'histoire sociale et politique[1]. Jacques Verger constatait il y a plus de dix ans que les historiens commençaient à "envisager les pratiques éducatives à la fois comme un des révélateurs des structures de la société, ou comme un des moteurs possibles de son évolution (ou de son blocage)"[2]. La méthode est toujours à suivre.

L'éducation des enfants est un lieu d'observation privilégié. C'est le lieu de convergence des grandes questions auxquelles la monarchie doit donner réponse à l'époque des Lumières : l'humanisme des collèges, né de la Renaissance et de la Réforme catholique, est-il toujours adapté au siècle ? Quelle place donner à l'Église dans la vie du royaume ? Com-

* Conférence donnée le 6 novembre 2001 au Centre François Viète.

1 Marcel Grandière, *L'Idéal pédagogique en France au dix-huitième siècle* (Oxford, Voltaire Foundation, 1998).

2 Jacques Verger, (1991), "Les historiens français et l'histoire de l'éducation au Moyen Age onze ans après", *Histoire de l'éducation* (mai 1991), p. 6.

ment intégrer les sciences nouvelles ? Comment accueillir les démarches de pensée issues en particulier de Newton et de Locke qui éclairent les évolutions en cours ? Comment adapter l'éducation aux besoins économiques et sociaux de la société ? Ces questions expliquent que les principaux personnages de l'État, les grandes institutions, les "Gens de lettres", ainsi que les maîtres et les régents, tous ceux qui animent alors le débat public, ont été les principaux acteurs du débat pédagogique, l'une des premières préoccupations des Français au temps de J.-J. Rousseau et de D. Diderot.

2. Construction du sujet

C'est un sujet un peu négligé depuis quelques décennies. L'histoire culturelle, à la suite de l'école des Annales, s'est heureusement portée vers des méthodes et des questions empruntées à la sociologie et à l'économie et s'est quelque peu désintéressée des "idées". Elle s'est particulièrement attachée à connaître les consommations ordinaires aussi variées que possibles, comme celles du vêtement et des "choses banales", qui toutes sont significatives d'évolutions culturelles[3]. Les chercheurs se sont aussi intéressés aux conditions sociales de production et de consommation de biens culturels plus classiques : la production d'imprimés, sous toutes ses formes, est analysée par les historiens du livre, de même que la consommation et la pratique de la lecture[4]. Les sources notariales, entre autres, servent d'entrée dans l'intime des foyers pour connaître l'univers matériel et mental des gens du XVIII[e] siècle[5].

Le domaine de l'histoire de l'éducation a également renouvelé ses questionnements. Des travaux ont été conduits pour mieux connaître la géographie et la sociologie éducative, l'alphabétisation, le milieu des élèves, des étudiants, et des maîtres, les comportements vis-à-vis des enfants, des jeunes, le rôle des pères, des mères. Travaux des élèves, matériaux pédagogiques, contenus éducatifs, démarches autodidaxiques, les

---

[3] Daniel Roche, *La culture des apparences : une histoire du vêtement, XVII[e] – XVIII[e] siècle* (Paris, 1989), *Histoire des choses banales : naissance de la consommation dans les sociétés traditionnelles (XVII[e] – XIX[e] siècle)* (Paris, 1997).

[4] H.-J. Martin, Roger Chartier, *Histoire de l'édition française*, (Paris, 1983–1990), Robert Darnton, *Gens de lettres, gens du livre* (Paris, 1992) et *L'Aventure de l'Encyclopédie : 1775-1800 : un best-seller au siècle des Lumières* (Paris, 1982).

[5] Annik Pardailhé Galabrun, *La Naissance de l'intime : 3000 foyers parisiens, XVII[e] – XVIII[e] siècles* (Paris, 1988).

approches sont nombreuses pour interroger les pratiques éducatives et sonder les cultures en prise avec le milieu social.

Pour le XVIII^e siècle, il existe un corpus important de textes dont G. Compayré avait utilisé les éléments les plus saillants dans son *Histoire critique des doctrines de l'éducation en France depuis le XVI^e siècle* (1879) pour montrer que la sécularisation de l'éducation en France devait être imputée aux représentants des Lumières et à leur combat contre les positions de l'Église.

Ce corpus est constitué de nombreux écrits éducatifs — méthode, avis, conduite, essai, règles, règlement, théorie, manière, introduction, éléments, plan, projet, discours... — publiés par les bureaux épiscopaux des écoles, les communautés de maîtres et de maîtresses. Des traités et des propositions diverses ont été donnés au public par les milieux "philosophique", parlementaire, universitaire, des régents et professeurs de collège, des maîtres de pension et de maisons d'éducation, des médecins attentifs alors aux liens corps/esprit et de particuliers qui écrivent pour leurs enfants. Pour la plupart, ces livres sont bien oubliés aujourd'hui : ils n'en constituent pas moins le terreau de la réflexion pédagogique du XVIII^e siècle. Les périodes de crise sont favorables au débat, donc aux publications qui s'accélèrent après 1750[6]. La contestation du modèle éducatif des collèges, le combat des jansénistes très impliqués dans la réflexion sur l'éducation et les controverses du siècle[7], la crise grave de la "destruction" des jésuites, la volonté d'établir une "éducation nationale" prise en main par l'État, l'exigence d'utilité pour la société civile, voilà les thèmes majeurs livrés à "l'espace public" qui se constitue comme lieu de proposition pour les affaires de la nation.

Parallèlement à l'analyse des traités et méthodes, le suivi de l'actualité du débat pédagogique dans les journaux fait apparaître dans leur mouvement les débats qui animent la société. Les journaux sont une source indispensable pour l'histoire culturelle. Certes, le *Journal de Verdun*, le *Mercure de France*, et les autres journaux dont les *Avis* et *Affiches* des provinces[8] ne peuvent guère traiter les sujets sensibles, mais les questions pédagogiques y sont présentées, car elles passionnent les Français. On trouve ainsi de nombreuses analyses critiques d'ouvrages, une innovation du XVIII^e siècle, des prospectus de collèges et de maisons d'éducation, des relations d'exercices publics, des débats critiques sur des

---

[6] *L'Idéal pédagogique*, *op. cit.*, p. 214-215.

[7] Monique Cottret, *Jansénismes et Lumières. Pour un autre XVIII^e siècle* (Paris, 1998).

[8] Jean Sgard, *Bibliographie de la presse classique, 1600-1789* (Genève, 1984).

nouveautés pédagogiques, des lettres et essais sur la morale et sur l'éducation de la jeunesse... Le mouvement scientifique y apparaît dans son contexte, et se décline sous la forme d'annonces de cours (de chimie, de physique, de mathématiques...), de présentations d'ouvrages toujours plus nombreux, de discours sur l'utilité des sciences, dans l'annonce de "machines mathématiques" et d'expériences suscitant la curiosité. Les ouvrages de mathématiques sont nombreux vers 1720-1740[9], et le débat sur les avantages de cette science dans le *Mercure de France*[10], ainsi que la notoriété de certains auteurs comme le père Castel [pour ses articles dans le *Mercure de France* et sa *Mathématique universelle abrégée à l'usage et à la portée de tout le monde* (Paris, 1728)], montrent l'intérêt du public. D'autre part, les académies font paraître des comptes rendus des séances de travail consacrées aux sciences dans une rubrique réservée aux arts utiles qui s'impose dans les publications après le milieu du siècle.

Comment l'éclat des sciences au XVIII^e siècle aurait-il pu laisser le monde éducatif indifférent ? Les modèles de pensée issus du courant cartésien et les chemins méthodiques ouverts par Newton et par Locke interrogent et déstabilisent l'enseignement des collèges et cherchent à devenir opératoires ailleurs, dans d'autres structures de culture. D'autant plus que se développe un formidable intérêt pour les métiers, pour les "arts méchaniques", pour le développement économique, dans un siècle de féroce compétition internationale, surtout sur l'axe désormais dominant est-ouest de l'Atlantique. La pensée éducative ne vit pas recluse dans une tour d'ivoire, mais évolue au contact du siècle. Elle est même un acteur de cette évolution. Le champ éducatif ne peut rester en marge des évolutions, sauf à perdre toute crédibilité. Pour le vérifier, il faut connaître les différents lieux où s'élabore la pensée éducative, le champ institutionnel ordinaire de la monarchie, la cour, les parlements, l'Église, mais aussi, en dehors des cadres traditionnels, l'espace public ouvert à tous ceux qui veulent apporter leur contribution, leurs vues citoyennes à cette grande œuvre nécessaire à la nation.

---

[9] *L'Idéal pédagogique, op. cit.*, p. 78, note 4.

[10] Voir la "Lettre sur les mathématiques" (mai 1726), où le père Castel considère que la géométrie est divine et qu'il faudrait "rendre tout le monde géomètre".

3. L'Idéal chrétien et la fidélité au roi (1715-1746)

Au début du règne de Louis XV, l'Église reste la matrice de formulation des pratiques éducatives. Les bureaux d'éducation des évêques, les congrégations qui se consacrent à l'enseignement, sont à l'origine de nombreux textes normatifs qui cherchent à mettre de l'ordre dans la tenue des classes, cet ordre qui manque tant aux enfants des pauvres. Il s'agit de méthodes épiscopales, de règles ou règlements, de conduites ou d'essais pour les écoles, d'appels lancés aux autorités par des prêtres comme Charles Démia à Lyon, dont le modèle d'écoles sera largement imité en France. Pour les petites écoles, la perspective est claire : enseigner Jésus Christ aux enfants, "former des enfans à Jésus Christ et à l'Église, et de fidèles sujets à l'État"[11]. Éduquer, c'est christianiser. "Nulle belle éducation, si elle n'est chrétienne", écrit le père Croiset pour ses élèves pensionnaires de Lyon[12]. La piété est le fondement de l'édifice, nécessaire pour l'acquisition des connaissances et de la civilité chrétienne, qui sont les deux autres objets de l'éducation.

Les signes de cette éducation chrétienne sont nombreux. Ses sources et références tout d'abord : le *Nouveau* et l'*Ancien Testament*, les écrits des Pères de l'Église, les décisions des conciles, sont constamment sollicités comme références conceptuelles de l'édifice éducatif. Les images employées vont dans le même sens. L'école est présentée comme étant l' "église des Enfans", un "refuge saint"; l'image des maîtres et des régents est construite selon les mêmes modèles. Pierre Coustel, dans son *Traité d'éducation chrétienne et littéraire* (édit. 1749) dresse une sorte d'épure du maître chrétien, de la difficulté de l'emploi à cause de l'ingratitude des enfants et de leurs parents, des qualités de méthode et d'esprit requises, de l'exemple dû aux enfants : c'est un emploi au service de la personne même du Christ, un "saint emploi".

Quant à l'enseignement donné, les maîtres cherchent à réaliser une synthèse de la piété et des études humanistes, sans oublier les sciences mathématiques qui ont pénétré dans le champ des savoirs à la faveur de la révolution culturelle du XVI^e siècle et du début du siècle suivant[13]. Les langues de l'Antiquité forment des chrétiens ainsi que la physique et les mathématiques. Jean Croiset dans ses *Règlemens* (1711) divise les mathématiques en arithmétique, géométrie, optique, astronomie, mécani-

---

[11] *L'Idéal pédagogique, op. cit.*, p. 7-37.

[12] Jean Croiset, *Règlemens pour les pensionnaires des pères jésuites qui peuvent leur servir de règle de conduite pour toute leur vie* (Lyon, 1711), p. 8.

[13] Antonella Romano, *La contre réforme mathématique : constitution d'une culture mathématique jésuite à la Renaissance, 1540-1640* (Rome, Paris, 1999).

que, algèbre, navigation, architecture civile et militaire, statique, et répond ainsi aux sollicitations culturelles du moment comme aux attentes des familles pour un enseignement proche du siècle. Il ne s'agit bien sûr que de récréations mathématiques pour pensionnaires, qui ne modifient pas au fond le plan d'études du collège jésuite.

La révolution des méthodes au XVIII^e^ siècle

Le début du XVIII^e^ siècle est marqué par un point d'équilibre entre les finalités chrétiennes et les besoins de la société civile. Deux livres majeurs dans l'histoire pédagogique témoignent de cet équilibre fragile, la *Conduite des écoles chrétiennes* (1720) de Jean-Baptiste de La Salle et le *Traité des études* de Charles Rollin (1726). Dans ces textes fondateurs — toujours utilisés au siècle suivant et même au début du XX^e^ siècle —, le souci de méthode l'emporte sur l'exposé des connaissances chrétiennes. Si les frères de Jean-Baptiste de La Salle veulent attirer les enfants des métiers urbains pour les christianiser, ils doivent pour cela enseigner des contenus scolaires utiles aux familles, et avec des méthodes efficaces. De même, Rollin, recteur de l'Université de Paris, introduit nettement la pédagogie dans le champ de la méthode en laissant moins de place à la spéculation chrétienne. En écrivant désormais l'éducation en termes de manières et de méthodes, on la détache de ses sources chrétiennes. Autrement dit, la sécularisation de l'enseignement commence avec de prestigieux représentants de l'Église comme Jean Baptiste de La Salle.

Cet équilibre est bientôt rompu, le siècle se dirigeant naturellement vers les besoins de la société civile. Ce sont les méthodistes qui prennent aussitôt le devant de la scène pédagogique. Pour le père jésuite Buffier dans son *Traité de la société civile ou du moyen de se rendre heureux* [...] (1726), c'est la "raison naturèle" qui lui sert de guide pour montrer que le but de l'éducation est le bonheur de l'homme vivant en société. Pour lui, "la méthode est une sorte de pierre philosophale avec laquelle on parvient à tout." Les principes dégagés de l'étude du monde physique peuvent servir à établir une science de l'éducation dégagée de ses traditionnelles références religieuses. L'empirisme lockien permet de se limiter à la nature.

L'intérêt pour les sciences, nous l'avons vu, est alors remarquable. Les mathématiques surtout libèrent une pensée enchaînée. Grâce à elles, la puissance de la raison paraît bousculer tous les obstacles jusqu'alors insurmontables. Elles sont les alliées privilégiées de la justesse de l'esprit, elles sont l'école du raisonnement. Newton est le phare et l'exemple d'une méthode de pensée qui fait l'admiration des esprits éclairés. Entre 1720 et 1740, les grands modèles d'émancipation de la pensée et de cheminement de la raison viennent d'Angleterre. Newton et Locke, admirés par Voltaire, poussent les Français à la compétition : ces derniers se passionnent pour la connaissance de la sphère, des éclipses, de l'aplatissement des pôles. L'expédition conduite par La Condamine, envoyée au Pérou en mai 1735, est accompagnée de nombreux scientifiques dont des botanistes (Joseph de Jussieu), des astronomes (Pierre Bouguer, Louis Godin), des cartographes. Celle de Maupertuis, partie vers le nord en mai 1736, réunit des savants comme Clairaut et le suédois Celsius. Leurs travaux sont célébrés à l'Académie des sciences.

La pédagogie ne reste pas en dehors du champ de la recherche. La pensée de Nicolas de Malebranche [*De la recherche de la vérité* (Paris, 1674)], les travaux des jansénistes des petites écoles de Port Royal, et la nouvelle métaphysique de Locke [*Essai philosophique concernant l'entendement humain* (Amsterdam, 1700 et 1729)], inspirent tout un groupe de pédagogues réformateurs, qui font de cette première époque du siècle un moment clef de l'invention pédagogique, un moment souvent oublié au profit de la période suivante. Le père Buffier, de Vallange[14], Louis Dumas[15], Py Poulain de Launay, l'abbé Berthaud, et bien d'autres, cherchent à construire des méthodes qui utilisent les sens et qui libèrent le corps, pour enseigner plus vite, sans effort et sans peine, comme par jeu[16]. L'essentiel est de montrer, de faire voir. Le *Cours d'architecture* (Paris, 1738, 4^e édit.) d'Aviler permet de montrer de nombreuses planches illustrées et expliquées; le sieur Bion compose un *Traité de la construction et des principaux usages des instruments de mathématiques* (Paris, 1709), l'abbé Nollet, instituteur des Enfants de France, un cours de physique [*Leçons de physique expérimentale* (Paris, 1743-1748, 6 volumes] où il met en avant la méthode d'enseigner par l'expérience qui devrait prévaloir dans la formation des enfants. À la révolution de la hiérarchie des savoirs commencée par l'introduction des mathématiques au XVI^e siècle succède, à la fin du siècle classique, et au début du XVIII^e siècle, une révolution des méthodes qui va accélérer la séparation de l'éducation de sa matrice chrétienne.

---

[14] Marcel Grandière, "Education et société dans la première moitié du XVIII^e siècle : de Vallange, et ses projets de réforme complète de l'éducation, 1710-1740", *Paedagogica Historica* (1997.2), p. 413-432.

[15] Marcel Grandière, "Louis Dumas et le système typographique, 1728-1744), *Histoire de l'Education,* (1999), p. 35-62.

[16] Les enfants apprennent à lire et à compter avec des cartes à jouer sur le bureau typographique de Dumas.

4. Les métaphysiciens de l'éducation (1746-1762)

L'année 1746 correspond à la publication de l'*Essai sur l'origine des connaissances humaines* de Condillac. Entre 1746 et 1762, les recherches sur l'homme et sur la société, les travaux sur les arts et les sciences jouissent d'un tel prestige qu'ils sapent les fondements anciens d'un système éducatif pourtant bien établi grâce à son réseau de collèges, et achèvent la déstabilisation de la Compagnie de Jésus, exclue des collèges en 1762. Le combat qui se livre entre 1746 et 1762 est le combat du siècle. La forte accélération des publications sur l'éducation correspond à la rudesse du conflit et à l'ampleur des enjeux. Philosophes liés au mouvement encyclopédique, gens de lettres, médecins, parlementaires, sont les maîtres à penser du mouvement de contestation, mais la troupe principale et oubliée depuis est faite de pédagogues et de régens influencés par les recherches issues des sciences humaines et prompts à correspondre aux idéaux nouveaux des familles éclairées qui cherchent à fuir les classes publiques.

Les métaphysiciens

Qu'apportent les métaphysiciens qui puisse bouleverser l'ordre éducatif ? Il faut noter tout d'abord la concentration d'œuvres autour de 1750 : *Lettre sur les Aveugles* (Diderot, 1749), la *Médecine de l'esprit* (Le Camus, 1753), *Essai de psychologie*, et *Essai analytique de l'âme* (Bonnet, 1755 et 1760), *de l'Esprit* (Helvetius, 1758),...

Les métaphysiciens apportent une méthode et une culture d'opposition née en partie dans les combats jansénistes contre le pouvoir. La méthode est celle brillamment illustrée par Newton. Les nouveaux métaphysiciens veulent appliquer à l'esprit humain la méthode de l'expérience et de l'observation qui a permis d'élucider les mouvements de l'univers. Elle consiste tout d'abord à refuser tout système général d'explication et toutes qualités occultes. Il s'agit d'aller pas à pas, de partir des faits. L'attachement aux faits et à l'expérience est premier. Comme Buffon, qui affirme dans son *Histoire des animaux* (1746) : "Rassemblons des faits pour avoir des idées"[17]. La connaissance se trouve dans la nature des choses, et l'éducation peut en conséquence, selon la méthode des physiciens, partir des faits.

L'image construite alors de l'esprit humain influence la réflexion pédagogique. L'âge de la psychologie commence sa carrière avec l'*Essai de psychologie ou considérations sur les opérations de l'âme* de Charles

---

[17] Cité par Jacques Roger, *Les sciences de la vie dans la pensée du XVIII^e siècle* (Paris, 1971), p. 543.

Bonnet, genevois comme Rousseau. Le sensualisme de Condillac qui explique quelles sont les opérations de l'âme aura une solide résonance chez les novateurs en éducation. Encore en l'an VII, le ministre Neufchâteau écrit aux professeurs des écoles centrales : "songez que toutes nos idées nous viennent des sens"[18].

La métaphysique nouvelle justifie de nouvelles attitudes pédagogiques. Tout d'abord, elle donne au corps une très grande importance. Il "est, ou paraît être, l'instrument universel des opérations de l'âme", selon Bonnet[19]. L' "éducation physique" prend désormais place dans les essais pédagogiques, à la suite des médecins qui s'introduisent dans le champ éducatif en proposant une méthode qui plaît aux pédagogues : la marche de la nature[20]. *La médecine de l'esprit* (1753) de Le Camus, la *Dissertation sur l'éducation physique des enfans* (1762) de Ballexserd, et surtout l'*Avis au peuple sur sa santé* (1761) et *De la santé des gens de lettres* (1769) du médecin suisse Tissot profitent d'une mode qu'ils amplifient, appuyée sur un discours à tonalité "philosophique", et suscitent chez les parents éclairés des attentes que les pédagogues s'efforcent de prendre en compte.

Cet ancrage sur les sciences de l'homme permet de donner à l'éducation une toute puissance dont les maîtres ont souvent rêvé. La nouvelle métaphysique leur permet de façonner quasiment à leur guise l'esprit des enfants. L'habitude n'est que l'impression des fibres du cerveau par des sensations dûment répétées, selon Bonnet[21]. Il suffit à l'éducateur de bien utiliser la machine humaine reçue de la nature : "selon qu'elle est maniée, (elle) produit la toile la plus grossière, ou un chef d'œuvre des Gobelins"[22].

La métaphysique nouvelle pousse encore l'éducation à se constituer sur le modèle newtonien en véritable physique de l'âme. La grande affaire des savants du XVIIIe siècle est de découvrir ce qui explique et

---

18 Renaud d'Enfert, "L'enseignement du dessin dans les écoles centrales (1705-1802)", *Paedagogica Historica* (XXXVI.2000.2), p. 619. Sur les relations entre philosophie et pédagogie, voir "L'enseignement des sciences naturelles entre philosophie et pédagogie", Pierre Kahn, dans Nicole Hulin (éd.), *Sciences naturelles et formation de l'esprit. Autour de la réforme de l'enseignement de 1902. Études et documents*, Presses universitaires du Septentrion, 2002, pp. 85-106.

19 Charles Bonnet, *Essai anlytique* [...], *op. cit.*, préface, p. XXIII.

20 Marcel Grandière, "L'activité du corps et l'éducation dans les traités de la deuxième moitié du XVIIIe siècle en France : quelques aspects", dans *Education, physical activities and sport in a physical perspective.* XIV ISCHE Conférence, (Barcelone, 1992), p. 180-190.

21 Charles Bonnet, *Essai de psychologie, op. cit.*, p. 209.

22 *Ibid.*, p. 218.

donne le mouvement. Qu'est-ce qui meut la société? Quel est le ressort de l'homme? Montesquieu, dans *L'Esprit des lois* (1748), s'est attaché à découvrir le mouvement des sociétés, Locke et Condillac celui de l'esprit humain. Helvétius fait scandale en 1758 avec *De l'Esprit* qui attribue à l'intérêt la principale motivation des actions humaines. Un thème promis à un long avenir.

Voilà qui donne des raisons à tous ceux qui cherchent à modifier le plan d'études. Si l'intérêt allié aux besoins (Condillac) suscite le mouvement, la volonté, si le travail dépend du plaisir ressenti, il faut en conséquence supprimer tout ce qui dégoûte les jeunes des études, c'est-à-dire l'insipide "étude des mots", les langues, que doit remplacer l'étude des choses, la physique, les mathématiques, l'histoire naturelle et celle des hommes, la morale qui elle aussi entre dans le champ de la physique de l'âme[23]. C'est l'ébranlement en France des fondations qui soutenaient l'éducation depuis plusieurs siècles.

Premières réalisations concrètes

Les idées de la métaphysique nouvelle connaissent leurs premières mises en œuvres concrètes. De nouvelles structures éducatives s'y réfèrent. Il paraît important à la monarchie elle-même que l'éducation des jeunes gens ne s'éloigne pas des données scientifiques nouvelles et des besoins de la nation engagée dans une aventure commerciale et militaire qui la met en compétition avec les puissances maritimes. Le mercantilisme découvre l'utilité pour l'économie nationale de favoriser un type d'éducation qui puisse servir les intérêts nationaux.

Les écoles des métiers montrent l'intérêt pour l'étude des choses qui caractérise si bien le siècle des Lumières et qu'encourage l'*Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences et des métiers*. Les écoles de dessin sont la grande invention du siècle. L'une des premières de ces écoles est établie à Rouen en 1746. Le *Mercure de France* et les *Affiches provinciales* défendent et font connaître ces nouvelles écoles pour encourager des créations. L'ouvrier pourra ainsi s'élever au-dessus de la routine et de la coutume! Au niveau supérieur, Blondel crée son École des Arts à Paris en 1740, devenue Académie des Sciences en 1750, juste au moment où l'École militaire (1751) rassemble dans la capitale les jeunes gens qui se destinent à l'armée. Les ponts et chaussées, la médecine, l'art vétérinaire, la marine, l'artillerie... créent leurs structures de formation et retiennent l'attention des ministres comme Bertin et de la presse toute dévouée aux œuvres citoyennes.

---

[23] *Ibid.*, "La vertu tient beaucoup au physique, le cœur comme l'esprit, a ses fibres, ses humeurs, son méchanisme", p. 225.

Ce mouvement vers des études concrètes où les sciences tiennent un grand rôle n'épargne pas la cour elle-même. Les Enfants de France ont une formation scientifique. Le duc de Bourgogne, petit-fils de Louis XV, né en 1751, reçoit bien sûr une forte éducation morale et religieuse, mais l'enfant ne manifeste guère d'intérêt pour le latin. Par contre, ses "récréations scientifiques" le passionnent. Il faut dire qu'il est conduit par de grands savants, l'abbé Nollet (physique), Philippe Buache (géographie), Leblond (mathématiques). Ce dernier, auteur lui-même de traités de mathématiques[24], lui apprend, avant sept ans, en jouant et uniquement par la pratique, l'utilisation du compas, du rapporteur et de l'équerre, les principaux termes utilisés en géométrie. Le jeune prince sait retrouver le centre d'un cercle à partir d'un arc, tracer perpendiculaires, angles, carrés, parallèles et tangentes, résoudre de petits problèmes d'amusement. Un mouvement éducatif est donc lancé au sommet même de l'État. Il ne s'arrêtera plus au XVIII^{e} siècle.

D'autre part, les almanachs et journaux mettent en évidence le développement des cours et des écoles privées. L'enseignement des sciences dans des cours publics se répand à Paris, assurés par des professeurs connus, comme le célèbre Bezout, ou Camus (mathématiques), par Sigaud de La Fond (physique expérimentale), par l'abbé Sauri (mathématiques physico-expérimentales), Valmont de Bomare (histoire naturelle)...[25] Ce sont surtout les écoles particulières qui obtiennent un franc succès, au point de susciter beaucoup de colère de la part des collèges qui perdent ainsi une part significative de leur clientèle. Les enfants du peuple peuvent avoir accès à des cours de mathématiques comme le révèle le beau cahier (1764-1765, 107 pages) de Jacques Aurégan de la paroisse de Plouberre en Bretagne, réalisé chez un maître de Saint Brieuc. Ces cours, qui n'ont guère laissé de traces contrairement aux collèges des villes, n'en ont pas moins existé, car ils répondaient à une culture populaire établie.

5. L'éducation nationale (1762-1788)

L'Église n'est plus la matrice de formulation de l'idéal éducatif, mais l'esprit des Lumières, l'esprit du siècle. C'est cet esprit du siècle qui informe désormais les nombreux traités et essais qui tentent de tracer des voies pour réorganiser l'éducation des collèges mis à mal par le départ des jésuites, la désertion des élèves, et la condamnation quasi générale des

---

[24] G. Leblond, *Élémens de fortifications* (Paris, 1756, 4^{e} édit.).

[25] *L'Idéal pédagogique* [...], *op. cit.*, p. 252.

méthodes et du plan d'études. Parlementaires comme La Chalotais et Rolland d'Erceville, philosophes, tous ceux qui ont une place reconnue dans les lettres, cherchent à imposer leurs vues pour une réforme nécessaire. Les maîtres de pension, directement intéressés par l'opportunité que leur offre le courant pédagogique du siècle, régents et professeurs ouverts à la réforme, tous font valoir leurs idées auprès du public. Des voix contraires s'élèvent aussi pour défendre une éducation qui avait fait ses preuves, avec talent souvent et virulence comme Feller, animateur du *Journal de Verdun*[26].

L'idée d'éducation nationale l'emporte, une éducation régie par le roi pour être au service de la société civile, de l'utilité commune. Ainsi se concrétise la défaite politique et pédagogique de l'éducation humaniste, tout en sachant que l'attachement à la religion demeure, puisque à la veille de la Révolution, Dieu fait toujours partie du triangle pédagogique, avec l'homme et la nation. Le fait essentiel est bien sûr l'expulsion des jésuites des collèges en 1762, suivi de l'édit sur les collèges de février 1763 qui sécularise l'administration de ces établissements par la création de bureaux d'administration. Cette expulsion est accompagnée d'une très vive campagne des parlementaires (une revanche janséniste contre les jésuites, selon G. Compayré) contre l'éducation des "moines", "l'esprit de moinerie", le "vice de monasticité" qui corromprait l'éducation des jeunes Français présents dans des collèges où règne toujours "la barbarie des siècles passés".

La conséquence, c'est la volonté d'exclusion des réguliers, la prise en charge de l'éducation par l'État, pour les besoins de l'État. C'est un sujet à la mode, largement débattu et expliqué. La Chalotais reçoit les compliments de Voltaire pour son *Essai d'éducation nationale* (s.l., 1763), un modèle du genre. Les auteurs accusent les réguliers d'empêcher l'esprit scientifique du siècle d'entrer dans les collèges, de refuser les nouveaux outils intellectuels forgés par la science, de déformer et de corrompre l'esprit des jeunes gens par des pratiques éducatives anciennes, comme l'abus de la mémoire, les jeux de l'esprit et le mauvais goût de faire disputer sans cesse les élèves selon l'ancienne méthode scolastique. Le plan des études maintenu par les pères aurait encore comme conséquence l'oubli du corps, le manque d'exercices physiques, de même que la négligence de la formation du cœur et le "peu de mœurs" des jeunes gens.

L'éducation nationale répond encore au besoin d'union, voire d'uniformité. Selon Rolland d'Erceville, procureur au parlement de Paris, "rien n'est plus désirable dans une monarchie, que l'uniformité" : "des

---

[26] Ou *Clef du cabinet des princes de l'Europe* [...], voir J. Sgard, *op. cit.*

mœurs semblables, une coutume générale, une législation commune, un esprit, un caractère et surtout un même droit national"[27]. Ce qui suppose une organisation des collèges en réseau, mis sous la tutelle des universités, des méthodes et des contenus identiques, à Paris et en province, grâce à des livres composés à cet effet et imposés à tous, un règlement général prescrivant les exercices des écoliers des collèges, exercices imprimés qui supprimeraient la pratique de dicter des cahiers dans les classes.

L'idée d'éducation nationale entraîne aussi la crainte d'une éducation trop libéralement généralisée qui serait nuisible à l'État, en affaiblissant les métiers mécaniques, qui sont la richesse nationale. Il faut simplement apprendre "la science utile à son état", selon le *Journal d'Éducation* (juin 1768). La Chalotais critique les écoles de charité, et en particulier celles des frères de Jean-Baptiste de La Salle, qui enseignent à lire et écrire aux enfants du peuple. La méfiance est la même vis-à-vis des petits collèges qui se sont multipliés au XVIIIe siècle, accessibles sans beaucoup de dépenses à beaucoup d'enfants[28]. L'édit de 1763 vise à en réduire le nombre, ce que réalisera la Révolution en créant les Ecoles Centrales en 1795, création qui provoquera une brutale déscolarisation. L'impulsion est donnée par contre aux écoles professionnelles qui doivent servir de modèle. Elles représentent le type même d'éducation citoyenne dans un siècle qui se donne pour nom "le siècle des arts utiles".

La morale fait partie de ces connaissances utiles à la nation. La crainte de l'immoralité est très forte. "Les mœurs sont l'âme des États, [...] l'éducation n'a d'autre but et d'objet plus essentiels que les mœurs."[29] Il s'agit de la morale des philosophes bien sûr, mais celle-ci donne naissance à une importante littérature sous la forme de morale en action, un concept qui constitue le fonds d'une abondante littérature édifiante illustrée par des "dictionnaire", "ami des enfans", "magasin", "mentor moderne"... Madame Leprince de Beaumont initie ce courant littéraire avec *Le Magasin des Enfans* (1757) qui connut un immense succès. Ces livres moraux mettent en scène des comportements d'enfants bien élevés, une morale en pratique.

Le débat sur l'éducation nationale n'empêche pas un fort mouvement de création de maisons d'éducation, des internats privés qui vident

---

[27] *L'Idéal pédagogique, op. cit.*, p. 240.

[28] Marcel Grandière, "Les petits collèges angevins au XVIIIe siècle", dans *Archives d'Anjou*, 2001, p. 65-81.

[29] Rigoley de Juvigny, *De la décadence des lettres et des mœurs depuis les Grecs et les Romains jusqu'à nos jours*, Paris, 1787.

la population des collèges publics, lesquels essaient de résister en créant des pensions. Les journaux font connaître un grand nombre de ces maisons en publiant les prospectus de leurs “instituteurs” qui sont aussi d’actifs écrivains de méthodes qui veulent actualiser les manières d’enseigner en fonction des nouvelles connaissances sur l’homme. Ces “instituteurs” présentent aux parents un projet éducatif correspondant aux tendances nouvelles de la pédagogie : un cursus de formation rénové, intégrant un enseignement des choses, l’étude du français étant mise en avant, reléguant ainsi le latin au rang d’une matière parmi d’autres. Les sciences utiles comme les mathématiques, la physique, l’histoire, la morale, le souci de l’hygiène et de la santé sont largement développées dans les programmes destinés à attirer la clientèle. La fin du XVIII^{e} siècle correspond à une grande vague d’enfermement des enfants.

Conclusion

Il est facile de voir combien l’éducation est un lieu de convergence de tous les courants qui font la vie du siècle, de toutes les contradictions aussi qui traversent la société et les hommes eux-mêmes.

L’attachement aux valeurs de l’humanisme empêche toute réforme concertée des collèges, même après le départ des jésuites en 1762. Il faudra attendre que le plan de Condorcet se concrétise sous forme des écoles centrales pour que les sciences occupent une place importante dans l’enseignement secondaire, et pour peu de temps ! Mais l’éclat des méthodes nouvelles issues des mutations scientifiques du XVII^{e} siècle est tel qu’il submerge et bouscule le système d’éducation, provoque la naissance de nombreuses nouvelles structures d’enseignement et affaiblit les anciennes. Il est clair aussi que la nécessité économique pèse lourdement sur les débats désormais situés dans l’espace public.

Les pratiques éducatives sont bien à la fois un révélateur des structures sociales comme aussi un acteur de leur évolution.

HIRES, Université d'Angers

Cahiers François Viète, 3, 2002, 71-81

NOBEL ET LES PRIX NOBEL*

Michel SPIESSER

Résumé

2001 est l'année du centenaire de l'attribution des prix Nobel. C'est en effet en 1901 que ces prix ont été attribués pour la première fois. Quelle est l'origine de ce prix international qui couvre à la fois la physique, la chimie, la physiologie et la médecine, la littérature et la paix. Ce genre de prix est tout à fait inhabituel, les prix sont en général très spécifiques et créés en souvenir de personnalités marquantes de la discipline ou au nom d'institutions qui les financent. Ils sont le plus souvent nationaux. Certains sont internationaux comme le prix Pulitzer pour le journalisme, la médaille Fields pour les mathématiques et le prix Pritzker pour l'architecture. La connaissance de certains éléments de la vie d'Alfred Nobel (1833-1896) peut nous aider à comprendre l'histoire de ce prix.

1. Biographie d'Alfred Nobel

Alfred Nobel est né le 21 octobre 1833 à Stockholm, sa mère s'appelle Andrietta et son père Immanuel. Le couple aura dans sa vie onze enfants dont seulement quatre garçons survivront. Le père est autodidacte en chimie, après une expérience dans la marine en tant que mousse, il entreprend des études d'architecte. Le jeune Alfred est de santé fragile, il manifeste cependant une énergie et une inventivité très forte alliées à un tempérament romantique. En cela il est le digne héritier de son père. [7]

En 1837 à la suite d'un incendie, Immanuel Nobel est ruiné. Il est obligé de s'expatrier en Russie, laissant sa famille dans le besoin à Stockholm. Si la Suède n'apprécie pas les inventions d'Immanuel (les mines et les systèmes pour détruire les navires), le tzar Nicolas premier (1796-1855) a besoin de constructeur d'armement. Immanuel réussit et fait fortune rapidement. Il peut alors en 1842 faire venir à Saint Petersbourg

---

* Conférence donnée le 27 novembre 2001 au Centre François Viète (et à l'Université de Nantes, pour la fête de la science, le 21 octobre 2001).

dans de très bonnes conditions Andrietta et ses trois fils Robert, Ludwig et Alfred. Andrietta aura trois autres enfants dans cette ville, seul l'un d'entre eux, Emile, survivra.

Immanuel peut apurer ses dettes en Suède et offrir des précepteurs à ses enfants. Alfred a ainsi un professeur de langues et d'histoire B.Lars Santesson qui le marquera beaucoup. Alfred Nobel parle couramment cinq langues : le Suédois, l'Anglais, le Russe, l'Allemand et le Français. Il a en outre un intérêt prononcé pour la littérature romantique. Il fréquentera Victor Hugo et Guy de Maupassant lorsqu'il résidera à Paris, pendant dix-huit ans au 53 avenue Malakoff. Idéaliste il n'apprécie pas Emile Zola qu'il trouve trop réaliste. Ce qu'il aime en fait c'est la poésie et en particulier celle de Byron et Shelley. Il écrit lui-même une pièce et des poèmes. C'est probablement là que l'on peut trouver l'origine du prix Nobel de littérature. Le premier prix Nobel de littérature sera donné à un poète français : Sully Prudhomme (1839-1907). En cela, le jury Nobel de l'époque s'est souvenu des goûts de A. Nobel.

Un grand chimiste Nicolaï Zinine (1812-1880) lui-même ancien élève de Justus Liebig (1803-1873) lui enseigne les sciences. C'est lui qui lui parle de la découverte de la nitroglycérine en 1846 par l'italien Ascanio Sobrero au laboratoire du chimiste Français Jules Pelouze (1807-1867). Alfred Nobel manifeste un incroyable goût pour apprendre et une très grande curiosité de tout. Il fait ses humanités en allant étudier un peu partout en Europe. Il rencontre Sobrero, l'inventeur de la "piroglicerina" chez le professeur Jules Pelouze, à Paris, ou il travaille en 1850.

Après trois ans, en 1852, il revient à St Petersbourg comme ingénieur dans l'usine familiale "Fonderies et ateliers mécaniques Nobel et fils".

L'époque est favorable aux affaires de la maison Nobel. L'armée du tzar qui se prépare à affronter l'armée française, anglaise et turque a besoin de s'équiper en prévision de la guerre de Crimée. L'invention des mines permet de protéger le golfe de Finlande de la flotte anglo-française. La fin de la guerre soldée par la défaite russe coïncide avec la mort de Nicolas premier à qui succède Alexandre II tzar beaucoup plus pacifique. Il s'en suit une reconversion industrielle qui amène la faillite de l'entreprise Nobel. Immanuel retourne en Suède avec son plus jeune fils Emile. Pour sortir de cette crise A. Nobel a l'idée d'exploiter la nitroglycérine de Sobrero qui est un explosif beaucoup plus performant que la bonne vieille poudre noire. A Paris, il trouve l'appui des frères Pereire les banquiers de Napoléon III. A cette époque, le besoin d'explosif est très important. L'Europe s'industrialise, on perce des tunnels (Saint Gothard) on creuse des canaux (Suez, Panama, Corinthe) on installe des routes et des lignes de chemin de fer, on exploite des mines et bien sûr on fait toujours la guerre. Cependant la nitroglycérine présente l'inconvénient d'être un explosif très instable et très dangereux à manipuler. A. Nobel prend un premier brevet sur un détonateur au fulminate de mercure, produit sur lequel avait travaillé J. Liebig et un deuxième sur l'explosif lui-même. Mais il a breveté une invention qui ne lui appartient pas puisque c'est celle de Sobrero qui à l'époque n'en voyait pas l'utilité. En contrepartie, plus tard, il lui offrira un poste de conseiller scientifique dans son usine suisse. Il fera même construire une de ses usines dans la ville natale de Sobrero à Avigliana en Italie. En l'absence de détonateur, la nitroglycérine n'aurait pas eu d'application. Un autre problème majeur se pose, il faut la stabiliser. Pour ce faire, A. Nobel va mélanger cette huile avec diverses poudres (brique pilée, sciure de bois, papier, ciment) ceci sans succès. Finalement par hasard, il utilise le kieselguhr qui est une terre siliceuse obtenue par décomposition des diatomées. Cette terre servait à caler les bidons de nitroglycérine pendant leur transport. L'ensemble nitroglycérine-kieselguhr est breveté sous le nom de dynamite. Mais ces résultats ne viennent qu'après de nombreuses explosions de bateaux et d'usines. En particulier, dans l'accident d'Heleneborg en Suède, A. Nobel sera blessé et son plus jeune frère Emile sera tué. Cette tragédie anéantit Immanuel et à partir de cette époque, c'est Alfred qui va diriger le groupe et le développer dans de nombreux pays. Aux Etats-unis il s'affrontera à Henry du Pont de Nemours le descendant d'Eleutere Irénée l'ancien collaborateur et ami de A.L Lavoisier (1743-1794). En Ecosse où une grande usine sera installée, à Hambourg en Allemagne en Italie et en France où A. Nobel installera sept usines et un laboratoire à Sevran dans la région parisienne tout près de la régie des poudres et salpêtres dirigée par Paul Vieille (1854-1934), un collaborateur de Marcelin Berthelot (1827-1907).[4]

Pendant ce temps, Robert le frère fonde une société pétrolière à Bakou société où A. Nobel a des actions. Ludwig l'autre frère dirige la société d'armement russe.

En 1874 les usines Nobel produisent 3000 tonnes de dynamite, 960 brevets protègent l'invention, mais les contrefaçons commencent à faire surface. La dynamite ne sera pas le seul explosif mis au point par A. Nobel.

Avec 58% de nitroglycérine, 37 % de nitrate de cellulose et 5 % de vaseline, il crée la balistite. Son invention sera détournée par les Anglais : F. Abel et James Dewar (1842-1923) qui la brevèteront sous le nom de *cordite*. À cette occasion A. Nobel dépité écrira un pamphlet sur les brevets.

Quant à la vie sentimentale d'A. Nobel, elle est peu connue et continue à intriguer. On sait qu'il reste longtemps inconsolable après la mort prématurée d'un premier amour. Par la suite, il rencontre Bertha Kinsky une militante pacifiste dont l'influence sera probablement à l'origine du prix Nobel de la paix. Elle ne partage pas ses sentiments et épouse finalement le comte von Suttner. Il est à noter que Bertha recevra le prix Nobel de la paix en 1905. Ce prix lui sera remis par J.H. Dunant (1828-1910) le fondateur de la Croix rouge, premier prix Nobel de la paix en 1901. La dernière femme de sa vie est une Autrichienne Sophie Hess qui signait ses lettres madame Nobel sans pour autant être mariée. A. Nobel n'ayant jamais été marié, il n'y a pas de problème d'épouse et de mathématicien. Il aurait eu des problèmes relationnels avec le mathématicien suédois Götha Mittag Leffler...

À la suite d'un scandale financier concernant la glycérine et provoqué par son collaborateur français Barbe, il quitte la France pour l'Italie. Il décédera d'une crise cardiaque le 10 décembre 1896.

Alfred Nobel a rédigé un testament daté du 27 novembre 1895 dans lequel il fait le don de sa fortune pour la création de cinq prix :

- un prix de Physique et un prix de Chimie décernés par l'académie des sciences suédoises;
- un prix de physiologie et médecine décerné par le Karolin institut de Stockholm (académie de médecine suédoise);
- un prix de la paix décerné par le Parlement Norvégien le "Storting" et décerné à Oslo;
- un prix de littérature décerné par l'académie des lettres suédoises.

Depuis 1968, en l'honneur du tricentenaire de la banque de Suède, un prix Nobel d'économie est décerné par la banque de Suède qui gère la fortune Nobel.

Alfred Nobel n'a pas d'héritier direct, sa famille respective représentée par son neveu Emmanuel conteste la validité du testament qui n'a pas été rédigé devant notaire. Elle intrigue auprès du roi Oscar II, petit-fils de Benadotte, qui finalement reconnaîtra le bien fondé de ce leg, valorisant l'image de la Suède à l'étranger. Le fidèle collaborateur d'A. Nobel, Ragnar Sohlman s'occupera de régler tous les problèmes de cette délicate succession. La fortune d'A. Nobel repartie en Europe et aux Etats-Unis représente trente millions de couronnes suédoises (80 usines, 350 brevets) ce qui est colossal. Depuis de nombreuses donations et certains reversements ont accru ce capital. En 1901, chaque prix représente 150 800 couronnes, en 1992 six millions cinq cent mille couronnes. Cette augmentation est due non seulement à l'inflation mais aussi à la bonne gestion de la fondation.

Les délibérations des comités Nobel qui attribuent les prix sont secrètes avec une prescription cinquantenaire. Les comités Nobel choisissent les lauréats parmi les candidats présentés par la communauté internationale. B. Wojtkowiack [9] précise qu'en 1989 il y avait 350 noms sélectionnés pour le prix de chimie.

2. La remise des prix

Le capital de la fondation sert aussi à financer la cérémonie de remise des prix par le roi de Suède le dix décembre de chaque année, date anniversaire de la mort d'Alfred Nobel. Le prix de la paix est quant à lui décerné dans la capitale Norvégienne Oslo. À l'époque de Nobel, la Suède et la Norvège étaient un même état qui s'est séparé à l'amiable en 1905. C'est ce qui explique la particularité pour la remise de ce prix. Chaque lauréat est tenu de faire une conférence au cours de la cérémonie qui se termine par un concert et un dîner. Le choix entre les candidats présentés est souvent délicat. Certains sont nominés un grand nombre de fois et ne reçoivent pas pour autant le prix. Dans son testament, A. Nobel précise que le prix doit revenir à celui qui au cours de l'année précédente a fait le plus grand bien à l'humanité dans sa discipline. La fondation Nobel a rectifié en élargissant “aux réussites les plus récentes” [11] [2].

3. Vision de la science à travers l'attribution des prix Nobel pour la première partie du XX^{e} siècle

En regardant la discipline, la nationalité des lauréats [11] et la fréquence d'attribution des prix on peut avoir une radioscopie montrant l'état de la science dans les divers pays du monde. Nous nous limiterons aux sciences dites exactes : Physique et Chimie.

3.1. La découverte des rayons X

Au cours du dix-neuvième siècle la découverte de la pile électrique et le perfectionnement des pompes à vide va amener les physiciens comme Crookes (1832-1919) à étudier les rayonnements émis par les décharges entre les électrodes en atmosphère raréfiée. Le premier prix de physique en 1901 est attribué à l'Allemand Conrad Röntgen (1845-1923) pour la découverte des rayons X. Cette découverte remarquable permet de visionner la matière minérale et vivante. La première radiographie au monde sera celle de la main de son épouse. En 1914 un autre Allemand Max von Laüe (1879-1960) reçoit le prix Nobel de physique pour sa découverte des interférences des rayons X avec la matière cristallisée. Ce savant aura plus tard un comportement remarquable pendant la période nazie de l'Allemagne. En 1915 le prix va récompenser les Anglais Bragg, William Henry (1862-1942) le père et William Laurence (1890-1971) le fils pour leurs travaux sur la détermination de la structure des cristaux au moyen des rayons X.

Henry Moseley (1887-1915) aurait probablement eu le prix Nobel de physique pour sa contribution essentielle à la physique, mais engagé volontairement en 1914, il sera tué en Turquie à Gallipoli. Une partie des travaux sur les rayons X du Néerlandais Peter Debye (1884-1966), sera récompensée par le prix Nobel de chimie en 1936. Plus tard l'utilisation des rayons X permettra de déterminer les structures des molécules complexes comme la pénicilline, la vitamine B_{12} et l'insuline, travail qui donnera le prix Nobel de chimie en 1964 à Mary Hodgkin Crowfoot (1910-1994) [10]. Par cette attribution du prix Nobel à une femme, on remarque que les chimistes ayant donné trois fois le prix Nobel de leur discipline à une femme, sont moins sexistes que les physiciens qui n'en ont donné qu'un à Marie Curie (1867-1934). Lisa Meitner (1878-1968) l'assistante d'Otto Hahn (1879-1968) a été trente neuf fois proposée [11] elle aurait logiquement dû avoir un prix Nobel de physique...

Les rayons X servent beaucoup en médecine, il est vrai maintenant avec des temps d'exposition beaucoup plus courts. Leur utilisation dans les scanners est actuellement fondamentale. Rappelons que Marie et Irène Curie monteront en 1914 des unités mobiles autoportées pour radiographier les soldats sur le front. Marie sera même instructeur auprès des médecins pour cette nouvelle technique.

3.2. La découverte de la radioactivité

La radioactivité est une grande découverte de ce siècle. Henri Becquerel (1852-1908) la découvre en 1896 ce qui lui vaut le prix Nobel de physique en 1903, prix qu'il partage avec Marie Curie et Pierre Curie (1859-1906). Notons que ce prix est le premier prix Nobel scientifique attribué à des Français. Les travaux sur la radioactivité ont à cette époque une importance comparable à ceux effectués sur les rayons X. En science de la matière, ils permettent la découverte de nouveaux éléments et permettent de commencer à comprendre le puzzle qu'est la matière. En médecine, ils s'appliquent au traitement des tumeurs cancéreuses. Marie Curie va s'attacher à développer ces techniques en créant l'institut du Radium en 1921. Marie Curie aura aussi toute seule le prix Nobel de Chimie en 1911. Cette époque est très délicate pour elle, car c'est à ce moment que survient l' “affaire Langevin”. Notons que le fait de recevoir à la fois le prix Nobel de physique et le prix Nobel de chimie est encore un cas unique an monde. La famille Curie offre à la France trois prix Nobel et cinq lauréats Nobel. Qu'une même famille fournisse cinq prix Nobel est encore un cas unique an monde. Irène Joliot-Curie (1897-1956) et Frédéric Joliot (1900-1958) recevront quant à eux le prix Nobel de chimie en 1935 pour la découverte de la radioactivité artificielle. Pour ses travaux sur la configuration atomique et la découverte de la première transmutation artificielle, Ernest Rutherford (1871-1937) obtient le prix Nobel de chimie 1908.

Pour ses travaux sur la radioactivité et l'énergie nucléaire, Otto Hahn (1879-1968) est seul lauréat du prix Nobel de chimie en 1944, prix qu'il ne pourra recevoir qu'en 1946. Emilio Segré (1912-1989) reçoit le Nobel de physique en 1959 pour la découverte du technétium premier élément radioactif du tableau périodique et surtout pour la découverte de l'antiproton. Glenn Seaborg (1912-) et Erwin Mac-Millan (1907-1991) reçoivent conjointement en 1951 le prix Nobel de chimie pour la découverte de la fin des éléments 5f les transuraniens (Pu - Am - Np...) (cf. [5]) Enrico Fermi (1901-1954) aura le prix Nobel de physique en 1938 pour ses travaux sur l'énergie nucléaire. Par la suite, il construira en 1942, la première pile atomique à Chicago.

3.3. La découverte des constituants de la matière

La notion d'atome a été relancée au début du vingtième siècle grâce aux travaux de John Dalton (1766-1844). Le congrès de Karlsruhe le 3 septembre 1860 permet de bien établir la notion de molécule. Les expériences de Michael Faraday (1791-1867) amènent la notion de grain d'électricité élémentaire. Mais à ce stade, on n'a toujours pas visionné ni quantifié les constituants de la matière quant à leur masse et leur charge. Le prix Nobel de physique en 1906 récompense l'Anglais J.J. Thomson (1856-1940) qui grâce à un appareil mis au point par lui va mesurer en 1897 le rapport charge sur masse de l'électron. Son appareillage est à la base des spectrograhes de masse qui permettront de faire les séparations des isotopes. Son élève F. Aston (1877-1945) a le prix Nobel de chimie en 1922 pour la conception d'un spectrographe de masse qui d'ailleurs porte son nom. La spectrographie de masse est actuellement une technique très utilisée dans les laboratoires de chimie organique. L'appareillage de J.J Thomson est l'ancêtre du tube cathodique de télévision. Pendant près de cinquante ans, J.J. Thomson portera à la pointe de la science mondiale le Cavendish Laboratory à Cambridge. Cette institution sera une véritable “pépinière” de prix Nobel.

Niels Bohr (1885-1962), prix Nobel de physique en 1922, introduit un modèle atomique planétaire illustrant en partie les propriétés spectrales observées. Son action dans l'attribution des prix Nobel scientifiques est prédominante, car 78 % des candidats repérés par lui obtiennent finalement un prix Nobel. L'américain R.A. Millikan (1868-1953) détermine avec une chambre à brouillard d'huile la charge élémentaire, celle de l'électron (1,6 10^{-19} C). En 1926, le Français Jean Perrin (1870-1942) obtient le prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'électron et en 1927 l'Anglais Charles Wilson élève de J.J. Thomson au Cavendish laboratory invente la chambre à brouillard d'eau appelée chambre de Wilson qui permet de visionner pour la première fois le trajet des particules et leurs chocs. Cet appareillage est l'ancêtre des chambres à bulles qui servent dans les centres de recherches atomiques. Louis de Broglie (1892-1987) reçoit le prix Nobel de physique en 1929, pour sa théorie de l'onde associée. En 1935, la découverte du neutron échappe de très peu à Irène et Frédéric Joliot-Curie et est finalement faite par J. Chadwick (1891-1974) encore un chercheur du Cavendish laboratory. L'élève de R. Millikan, J. Davisson (1881-1958) confirme les travaux de Louis de Broglie en faisant diffracter des électrons par un cristal de nickel. Davisson reçoit le prix Nobel de physique en 1937 en commun avec Georges Paget Thomson le fils de Sir Joseph John. Les grands théoriciens de la matière E. Schrödinger (1887-1961) et P.A.M. Dirac (1902-1984) sont prix Nobel de physique en 1933 pour la mise en équation de la fonction d'onde d'une particule en mouvement. Albert Einstein (1879-1955) a le prix Nobel de physique en 1921 pour ses travaux sur l'effet photoélectrique et non sur ce qui a fait son renom : la théorie de la relativité.

3.4. La chimie

Quant aux chimistes, ils sont associés aux physiciens pour les travaux sur la matière en particulier dans les conseils Solvay à partir de 1911 [10]. Ils reçoivent aussi des prix pour leurs spécialités. La thermochimie s'illustre avec J.H. Van't-Hoff premier prix Nobel de Chimie en 1901 et W.H. Nernst (1864-1941) prix Nobel en 1920. L'étude des milieux électrolytiques donnera un prix en 1903 à Svante Arrhenius (1859-1927) qui siège plusieurs fois aux comités Nobel où il sera un grand défenseur de Marie Curie en 1911 au moment de l' “affaire Langevin”. Nominée par lui et l'académicien Gaston Bouchard, correspondant étranger à l'université de Stockholm, elle aura le prix Nobel de chimie en 1911 [1]. Les travaux sur les grandes synthèses industrielles récompenseront W. Ostwald (1853-1934) en 1909 pour la synthèse de l'acide nitrique et F. Haber (1868-1934) en 1918 et C. Bosch (1874-1940) en 1931, pour la synthèse de l'ammoniac. Ces trois prix Nobel allemands montrent bien la suprématie de l'industrie chimique allemande en Europe à cette époque. La chimie organique ne sera pas absente avec E. Fisher (1852-1919) prix Nobel en 1902 pour ses travaux sur les sucres, V. Grignard (1871-1935) pour sa découverte des organomagnésiens et P. Sabatier (1854-1941) pour ses travaux sur l'hydrogénation catalytique [8] obtiennent le prix Nobel de chimie 1912.

4. Les "grands Nobel"

On peut qualifier de "grands Nobel" les femmes et les hommes qui ont eu plusieurs fois le prix Nobel dans leur spécialité ou non. Marie Curie est la première femme à recevoir le prix Nobel. Elle reçoit le prix de physique en 1903 associée à son mari Pierre Curie et à Henri Becquerel puis seule le prix de Chimie en 1911 pour ses travaux sur le polonium dernier élément de la famille de l'oxygène (chalcogènes) portant le numéro atomique 84. Il est à noter que la famille Curie et le laboratoire Curie ont découvert quatre éléments nouveaux : Pierre et Marie Curie ont découvert le radium et le polonium, numéros atomiques 88 et 84. André Debierne (1879-1949) le chef de travaux du laboratoire découvre en 1902 l'actinium numéro atomique 89 et l'élève de Marie Curie Marguerite Perey (1909-1975) découvre le francium de numéro atomique 87. Marie Curie est le cas unique de quelqu'un ayant eu à la fois le prix Nobel de physique et de chimie. Linus Pauling (1901-1994) reçoit le prix Nobel de chimie en 1954, et le prix Nobel de la paix en 1962 pour son action en vue d'un désarmement nucléaire. F. Sanger (1918-) reçoit deux fois le prix Nobel de chimie en 1958 pour ses travaux sur les structures des protéines notamment celle de l'insuline et en 1980 pour sa contribution à la détermination des séquences de base (1908-1991) dans les acides nucléiques. John Bardeen (1908-1991) est prix Nobel de physique en 1956 avec H. Brattain (1902-1985) et W. Shockley (1910-1989) pour la découverte du transistor de jonction et en 1979 pour la théorie BCS expliquant la supraconductivité dans les métaux. La découverte du transistor conditionnera toute l'électronique de la deuxième moitié du XX^{e} siècle permettant par la suite la création des circuits intégrés base de toute l'informatique.

5. Prix Nobel et éthique

Certaines options politiques douteuses prises par des prix Nobel feront réagir la communauté internationale. Ce sera le cas de P. Lenard (1862-1947) prix Nobel de physique en 1905 et de W. Heisenberg (1901-1976) prix Nobel de physique en1932 qui affichent des opinions nazies. Ce n'est pas le cas de tous les savants allemands dont certains comme Max Von Laue, Otto Hahn favorisent le départ des savants juifs ou d'autres qui comme Max Planck ont une attitude très réservée vis à vis du nazisme. La persécution des juifs va entraîner une très forte émigration des savants qui se retrouveront aux États-Unis enrôlés pour la plupart dans le projet Manhattan. Le docteur A. Carel (1873-1944) prix Nobel de médecine en 1912, pour ses travaux sur la suture des vaisseaux sera directeur de la "Fondation française pour les problèmes humains" institution à caractère eugéniste créée par le gouvernement de Vichy. [6]

Le père de la guerre des gaz Fritz Haber aura le prix Nobel de chimie en 1918 pour ses travaux sur la synthèse de l'ammoniac. À la suite de quoi certains journaux qualifieront ce prix d'"Haberrant" [11]. Après la guerre 1914-1918 la fondation Nobel voulait éviter de mettre les savants allemands en quarantaine et désirait ressouder la communauté scientifique européenne.

W. Shockley affichera les dernières années de sa vie des idées d'inspiration nazie sur la relation race et intelligence, l'eugénisme et la stérilisation des faibles. Il fera partie de ceux qui participèrent au don de sperme pour la reproduction du génie humain...[5]

Il faut noter que ces attitudes et opinions sont survenues souvent bien après l'attribution du prix Nobel.

6. Conclusion

Pour conclure il est clair que le prix Nobel récompense les meilleurs scientifiques au monde. Comme l'écrit Hilaire Cuny journaliste écrivain dans son livre "les Nobel et la dynamite" [3] :

> "Le prix Nobel, tous ceux qui le méritaient ne l'ont pas eu
> mais tous ceux qui l'ont eu le méritaient"

michel.odile@free.fr