

MATHÉMATIQUES, STRUCTURALISME ET TRANSDISCIPLINARITÉ

par André LICHNEROWICZ

Une démonstration de l'unicité de la démarche de pensée qui préside à la formation d'un concept, à travers les différentes "disciplines"; un plaidoyer pour une formation universitaire moins spécialisée; par le "père" de la réforme de l'enseignement des mathématiques.

LES DISCIPLINES

A travers nos universités, presque partout dans le monde, la formation des hommes, les moyens et la finalité de la recherche, ainsi que l'acquis des résultats de cette recherche se trouvent fragmentés en disciplines aux frontières mouvantes, à la définition tantôt fine et tantôt grossière. Mais il est clair que, dans la terminologie courante, le mot même de discipline recouvre des notions variées relevant souvent de plusieurs conceptions philosophiques d'époques différentes et parfois contradictoires entre elles. Le concept de discipline recouvre ainsi des fonctions diverses attribuées aussi bien à l'université qu'à cette exploration du réel qu'on nomme recherche.

Dans un texte préparatoire à l'Encyclopédie, Diderot distingue soigneusement "les sciences, les arts et les histoires". Pour lui, grosso modo, une science se veut effort de connaissance et d'explication d'un champ de phénomènes, définie par ce champ et contribuant à la définir. Un art - nous dirions aujourd'hui une technique - est un faisceau de procédés, plus ou moins inspirés par des sciences, destiné à construire et agir. C'est dans ce sens que la France connaît encore le vieux titre "d'ingénieur des Arts et Manufactures". Une histoire enfin est une description classificatrice du monde, univers physique (c'est le vrai sens de l'expression "histoire naturelle") comme univers social. Au triplet sciences, arts, histoires toujours inconsciemment présent, il conviendrait d'ajouter les disciplines dites "normatives" (droit par exemple ou grammaire au sens traditionnel) pour obtenir la quasi-totalité des étiquettes qui ornent encore les frontons de nos temples universitaires.

Comme l'ont montré les épistémologues récents, Piaget en particulier, le positivisme n'a fait qu'approfondir la définition d'une science par le champ des phénomènes observables auxquels elle a choisi de s'intéresser. Ennemi de toute entreprise véritablement théorique, le positivisme se veut cramponné aux observables et ne visant qu'à les relier par des lois numériques, aisément et directement vérifiables. Dans ses versions contemporaines, il conduit, en sciences humaines par exemple, à ces monographies basées sur une statistique à ras de sol et qui ne débouchent sur nulle globalisation ou synthèse théorique. Il s'agit là de matériaux pour la science, mais non encore de science. Les essais embarrassés de classification linéaire des sciences, inspirés au XIX^e siècle par le positivisme, apparaissent trop souvent comme l'équiva-

lent en ce temps des analyses médiévales des différents "miroirs du Monde". C'est aussi le temps où tous croient et enseignent que les mathématiciens règnent sur la quantité et sur l'étendue ; or déjà à travers les algébristes anglais, à travers Riemann ou Dedekind, les mathématiciens ne savent plus ce qu'est cette prétendue quantité ou cette prétendue étendue. Si le positivisme a été trop longtemps la philosophie explicite de beaucoup d'hommes de science, il reste que nous savons désormais qu'il n'est pas et n'a jamais été la philosophie implicite de l'entreprise scientifique elle-même, dont l'ambition est tout autre et suppose pour son accomplissement, l'achèvement d'un stade théorétisant. Le stade dit "positif" représente en fait un stade infantile de la science. Celle-ci est devenue consciemment ce tissu indéchirable, fait d'une chaîne théorique et d'une trame expérimentale, où la chaîne peut et doit réunir bien des fils variés venus des différents domaines de notre expérience concrète.

Le positivisme, stade infantile de la science.

Une discipline n'est donc plus aujourd'hui accumulation lente et prudente de faits et de petites lois cherchant à les relier, sauf peut-être à ses débuts. Elle est d'abord méthodes et techniques, arsenal conceptuel aussi et élaboration d'un discours adapté à traduire ses conquêtes, plus encore elle est souvent point de vue privilégié sur une large fraction du monde et, par là, elle se révèle dans beaucoup de cas impérialiste vis à vis d'autres disciplines concurrentes. Il en fut ainsi hier de la physique, il en est aujourd'hui ainsi de la biologie qui, à travers l'écologie par exemple, vise la primauté de l'étude de tous les systèmes vivants, y compris ceux où participe l'homme. La sociologie, même marxiste, ne saurait abandonner à l'économie ce qu'elle considère comme de son ressort propre et se demande en vain ce que peut bien être la géographie humaine. L'histoire, au sens contemporain du terme, se veut analyse et synthèse globale de civilisations et aucune activité humaine des dix derniers millénaires ne saurait, en droit, lui être étrangère ; d'où ses difficultés à définir son statut au contact, par exemple, de l'ensemble des différentes sciences sociales.

Les disciplines, points de vue privilégiés sur le monde

Cette exigence impérialiste, manifestée par une discipline, n'est pas en soi malsaine pour les autres ; elle les oblige à recevoir, à accueillir, elle leur impose de nuancer leurs propres points de vue, d'utiliser concepts, méthodes et techniques venus d'ailleurs. Elle traduit l'impossibilité d'une définition spécifique des champs de phénomènes, et paradoxalement, l'unité de la démarche scientifique. C'est pour la discipline trop impérialiste qu'est le danger, si elle finit par transformer ses maîtres-mots et ses maîtres-concepts en idoles intellectuelles, risquant ainsi de se figer, de perdre ses pouvoirs de renouvellement.

Il est certes possible de faire indifféremment des mathématiques, de la physique ou de la biologie, de l'histoire, de la sociologie, de la linguistique, de l'économie ou de la psychologie la discipline reine, de prétexter avec une égale bonne foi qu'au début est l'être vivant, ou le langage, ou le raisonnement, ou la société des hommes et ses projets, ou le fonctionnement de notre esprit. J'ajouterai que certains ont proposé que l'épistémologie ou l'analyse des projets technico-sociaux soient des candidats à cette primauté. Mais tous ces jeux sont vains. Le "savoir-faire" global qu'est devenue au vrai notre science ou notre technique ne supporte pas un point de vue privilégié sur lui-même qui ne saurait que le mutiler et le figer.

MATHEMATIQUES CONTEMPORAINES

Ayant ainsi mis en garde contre une tentation, je vais m'empresser d'y succomber très volontairement. Ce sera, si vous le voulez bien, la règle de notre jeu

d'aujourd'hui. L'activité théorétisante qui, pour moi, fait partie intégrante de l'entreprise scientifique elle-même, s'appuie sur un ensemble de méthodes déductives auxquelles participent logique, mathématiques au sens usuel et strict du terme, informatique théorique aussi. C'est cet ensemble que je baptiserai désormais mathématique au singulier, parce que tout cela est homogène à la démarche mathématique et à son ambition de bâtir un discours parfait de communication objective, un type de discours "sans bruit de fond", cohérent en soi, et contraignant pour l'autre, capable d'interdire par sa forme tout refus de son contenu.

Le meccano

Depuis un siècle et demi, mettons depuis Calois mort à 21 ans et créateur de la notion de groupe, la mathématique s'est étudiée elle-même, a pris conscience de ses ambitions véritables et des limites imposées à ces ambitions. Elle a porté partout témoignage, un témoignage aseptique sur le fonctionnement de notre esprit et sur les conditions de la communication. Elle s'est d'abord constituée en une sorte de meccano dont les pièces sont ce que nous nommons les structures élémentaires, c'est-à-dire celles où le nombre des axiomes est faible et qui surgissent fréquemment. Au lieu de commencer l'étude mathématique selon l'histoire, par des structures riches comme celles de la géométrie euclidienne, avec sa multiplicité d'axiomes, on devrait, en droit, commencer selon le bon ordre des mathématiques par l'étude des pièces élémentaires, les structures pauvres qui doivent s'emboîter les unes avec les autres pour bâtir ces machineries complexes et puissantes que sont les grandes théories.

La notion première est généralement la notion d'ensemble, d'ensemble de n'importe quoi, de nombres, de figures géométriques, mais aussi d'ensembles de mots d'un dictionnaire, des phrases de la langue allemande ou des échanges au sein d'une économie. Une telle notion, même prise très naïvement comme un langage commode et précis, se révèle très utile, même si au niveau élémentaire nulle théorie n'en est faite. Elle présente cependant des pièges dont nous avons fait l'expérience et que nous savons désormais éviter. Un ensemble est formé d'éléments, il a des sous-ensembles qui comprennent une partie de ses éléments. Entre deux ensembles convenables, il peut exister des sortes de dictionnaires parfaits : à tout élément d'un ensemble, on peut en associer un élément d'un autre ensemble et réciproquement. C'est ce que nous faisons naïvement et naturellement quand nous comptons sur nos doigts les brebis d'un troupeau ou les jours qui doivent s'écouler.

Les structures élémentaires intéressantes, toutes bâties avec la même cohérence et la même solidité, appartiennent à deux types principaux : les structures algébriques (au sens contemporain du terme) et les structures topologiques. Des premières groupe, anneau, corps, espace vectoriel, relèvent les opérations, la théorie des calculs, des secondes celles de voisinages, limites, convergence, continuité etc...

Ce que je viens de dire doit être modéré par quelques considérations concernant la méta-mathématique. Le paysage décrit est grosso modo celui de la mathématique proprement dite, fondée sur une théorie des ensembles convenablement axiomatisée à la Gödel et conçue comme un point de départ. Mais nous savons désormais, grâce à Gödel en particulier, que la vieille ambition d'un discours qui trouve en lui-même sa propre justification, capable d'auto-prouver sa propre cohérence, est un rêve. Plus positivement, cela veut dire qu'il faut avoir recours à une méta-mathématique pour tenter de prouver la non-contradiction des mathématiques elles-mêmes et ainsi de suite. La mathématique au sens large que j'ai défini a appris qu'elle est inépuisable non seulement vers l'aval - cela, elle l'avait toujours deviné ou su - mais aussi vers l'amont. Ce n'est que conventionnellement que nous plantons, ici ou là, un drapeau portant : "Ici commence le pays des mathématiques". Récemment le drapeau s'est déplacé, pour des

Le discours métamathématique est indispensable pour prouver la non-contradiction du discours mathématique

raisons proprement mathématiques, avec l'apparition de la notion de catégorie, en amont de celle d'ensemble. Le point essentiel du témoignage porté par l'activité mathématique sur le fonctionnement de notre esprit et sur les conditions de la communication semble être le suivant : tout discours qui se veut sans quiproquo, ni malentendu, tout discours sans bruit de fond ne peut-être qu'un discours soumis à l'ascèse mathématique, c'est-à-dire en fait un discours mathématique. Mais l'ironie mathématique doit compléter cet énoncé par le suivant : il est impossible de prouver mathématiquement que le discours mathématique est effectivement lui-même sans quiproquo.

A qui étudie l'optique de la mathématique contemporaine sur elle-même, trois traits principaux apparaissent :

Absence de toute métaphysique

Ce qui frappe tout d'abord, je crois, c'est l'absence de toute métaphysique de l'identité et de la chose en soi, de toute idolâtrie de la chose. Sur les ensembles peuvent être définies des structures variées, la notion même de structure mathématique se prêtant aisément à une définition technique qui n'a pas sa place ici et qui repose sur deux opérations fondamentales concernant les ensembles : prendre le produit de plusieurs ensembles, prendre l'ensemble des parties d'un ensemble. Le mathématicien travaille toujours à un dictionnaire parfait près. L'identité de nature entre les êtres sur lesquels il raisonne lui importe peu. Ce qui importe, c'est la possibilité de ces dictionnaires parfaits dont j'ai parlé et l'isomorphisme correspondant des structures transportées. L'identité, pour le mathématicien identifie bien souvent, sans scrupules, des objets d'origine différente, lorsqu'un isomorphisme l'assure qu'il ne ferait que prononcer deux fois le même discours dans deux langues différentes.

Caractère non ontologique

Il m'est arrivé d'employer l'expression d'être mathématique. Au vrai, cette expression n'a pas grand sens : un ensemble est, j'ai osé le dire, un ensemble de n'importe quoi. Par suite tout donné peut être considéré comme mathématisable, s'il consent à se soumettre au traitement des ensembles, catégories, morphismes, c'est-à-dire plus précisément, dans la mesure exacte où ce que nous négligeons ainsi - tout le contenu ontologique - ne nous importe pas. Il est essentiel de noter que ce que nous devons négliger ainsi ne peut être défini une fois pour toutes. On peut dire que, par son discours même, la mathématique a un caractère radicalement non ontologique ou, si vous préférez, qu'elle met l'Être entre parenthèses. Ce caractère, la mathématique le transporte partout avec elle et c'est lui qui lui confère, pour une large part, sa puissance, sa fidélité et sa polyvalence. Nous pouvons toujours tresser un filet mathématique aux mailles arbitrairement serrées, mais d'où s'écoulera nécessairement l'onde ontologique.

Unité de la mathématique contemporaine

Un troisième caractère de la mathématique contemporaine est son unité. Par l'élaboration d'un langage commun et le dégagement des structures élémentaires communes, elle a brisé les vieux cadres historiques qui auraient tendu, en se remplissant, à la fragmenter en des disciplines distinctes évoluant de manière divergente. La géométrie, entre autres, est morte en tant que branche autonome ; la géométrie euclidienne n'est plus que l'étude fort intéressante d'un espace vectoriel réel de dimension 3 muni d'un produit scalaire et, dans cette courte phrase, tous les axiomes nécessaires sont contenus.

"La" mathématique

On voit pourquoi il nous est permis de parler de "la mathématique". On voit aussi combien le point de vue de la mathématique sur elle-même est éloigné du point de vue historique qui lui a donné naissance. Mais disait Bachelard, "dans le règne de la pensée scientifique, ce qui mérite le nom d'idée nouvelle est immédiatement réorganisation des idées anciennes". La réforme de soi qu'entraîne une idée scientifique nouvelle nous offre un passé lui-même nouveau, un passé renouvelé en même temps qu'un avenir à bâtir. Cela n'est nulle part plus vrai que dans cette mathématique qui se veut

théorie unifiée au feu de l'esprit et non savoir poussiéreux accumulé couche par couche. C'est là, bien souvent, l'origine de l'économie de pensée due aux mathématiques.

MODELES ET STRUCTURES

Pour le savant contemporain, c'est la science toute entière qui est une, en droit comme en fait. L'interdisciplinarité n'apparaît pas comme un produit de la mode, mais comme une nécessité du succès global de la recherche. Nous allons en donner tout à l'heure quelques exemples.

Pour qui prend au sérieux la science et son unité, nous avons vu que celle-ci apparaît comme un tissu indéchirable dont la trame est faite des résultats des analyses et des expériences privilégiées par lesquelles nous enserrons le réel, tandis que la chaîne procède de la démarche théorique, donc mathématique.

es deux niveaux de nos
mathématiques

Nos mathématiques jouent là en fait à deux niveaux : elles peuvent être outil auxiliaire de presque toutes les disciplines, intervenant notamment dans l'analyse du réel soit par l'informatique théorique, soit par l'approche statistique et probabilitaire. Elles peuvent se faire aussi instrument véritable de pensée. L'ambition asymptotique de tout savant, ambition avouée ou non, est l'élaboration d'un modèle mathématique permettant de prévoir et de dominer, à une approximation aussi grande que possible, une classe de phénomènes aussi large que possible. Un tel modèle n'est autre qu'une structure plus ou moins riche. Ce n'est que lorsqu'un tel modèle a pu être construit que nous considérons qu'il y a véritablement explication et dénouement de la complexité des apparences.

L'introduction de la notion de modèle appelle quelques réflexions : tout d'abord savoir mettre les mathématiques à son service consiste aussi à ne jamais leur faire dire plus qu'elles ne peuvent, à mettre en pleine lumière, de manière correcte, les présupposés et les approximations propres à chaque domaine. De présupposés, servant d'axiomes, trop éloignés de l'expérience, on ne tire, mathématiquement ou non, que des sottises.

expérience et imagination
théorique

D'autre part, si l'expérience peut conduire à écarter certaines structures, si l'accord avec elle demeure la condition impérative, qui nous assure que nous ne faisons pas vainement la théorie de quelque monde imaginaire, il reste que ce n'est pas de l'expérience, en dernière analyse, que dépend le surgissement d'un modèle nouveau, mais de l'imagination d'un esprit théorique, le jeu royal que le savant joue ne trouvant sa justification qu'à posteriori. Nous sommes ici bien loin du positivisme. Cela fut vrai de Newton comme de Maxwell, d'Einstein comme de Pauli, de Walras comme de Von Neumann. La théorie quantique des champs et une part notable de l'économie attendent aujourd'hui de nouveaux modèles suffisamment raffinés.

Il convient aussi d'observer, à la lumière de ces exemples, qu'il existe une hiérarchie naturelle des modèles correspondant d'une part à leurs champs d'action respectifs, d'autre part à la généralité et à la simplicité des postulats qui les engendrent. Il ne faut pas confondre le petit modèle phénoménologique local, à l'ambition limitée, et les grands modèles théorétisants, visant à synthétiser les phénomènes de champs apparus initialement comme distincts.

Enfin, pour ces derniers modèles, il importe de ne pas succomber à une tentation, ce que nous faisons trop souvent : identifier modèle et réalité, confondre par exemple l'espace de la géométrie euclidienne et l'espace où jouent les

Attention à l'idolâtrie
des modèles

phénomènes physiques à notre échelle. Tel modèle traduit au mieux, à un certain degré d'approximation, tout ce que nous pouvons dire de sérieux aujourd'hui sur tels phénomènes physiques ou économiques. Demain, il se trouvera englobé dans quelque nouveau modèle plus satisfaisant, mais que nous n'avons pas plus de raison de "croire vrai". Il faut nous garder de l'idolâtrie des modèles.

J'aimerais donner quelques exemples privilégiés : toute une classe de phénomènes électriques. A partir de cet isomorphisme, on a construit ces "calculateurs analogiques" qui permettent, par mesure d'effets électriques, de prévoir numériquement des résultats hydrodynamiques et d'épargner des expériences grossières et coûteuses sur des modèles hydrauliques réduits.

Des théories mathématiques toutes prêtes, celle des espaces de Hilbert provenant lointainement dans son histoire de l'analyse des vibrations et celle de la représentation des groupes largement polyvalente ont permis l'élaboration de notre mécanique quantique contemporaine et de notre théorie des particules élémentaires. Celle-ci construite sous l'influence de Dirac, Pauli et Wigner, procède d'une pensée algébrique globalement simple, même si la technique effective en est fort raffinée.

On s'efforce actuellement de bâtir une théorie abstraite des échanges qui s'applique aussi bien aux échanges entre systèmes physiques qu'aux échanges entre cellules économiques. Ainsi l'économie d'échange et la thermodynamique pourraient recevoir un cadre commun de pensée où s'identifieraient par exemple prix et potentiels thermodynamiques, fonction de satisfaction et entropie. Une certaine forme de l'économie de production, à technologie fixée, pourrait trouver son analogue dans la cinétique chimique contemporaine.

Modèles polyvalents

On voit l'intérêt de ces modèles polyvalents, à interprétations variées, qui permettent l'échange des intuitions. Chaque discours interprétatif représente une médiation différente entre notre volonté de rationalité et le choc d'un réel plus ou moins affiné ; dans une certaine mesure, il montre, par son existence même, notre maladresse relative à mathématiser le réel ; d'autre part il est, concurremment avec les motivations propres aux mathématiques, source pour notre imagination. Il semble que demain, il soit possible d'élaborer une "économie statistique", analogue, c'est-à-dire convenablement isomorphe à des parties notables de la mécanique statistique ou de la théorie de l'information. Ainsi certains phénomènes physiques, économiques et linguistiques pourraient trouver un cadre commun de pensée.

Structuralisme et démarche
synchronique

Ailleurs, l'ethnologue Levi-Strauss dégage des structures algébriques vraies, dans l'étude comparée des systèmes de parenté à travers les différentes civilisations ; c'est ce qu'il nomme structures élémentaires de la parenté et ce sont effectivement des structures mathématiques, au plein sens du terme. Mais je dois avouer que quand Levi-Strauss lui-même veut mettre en jeu ce qu'il nomme les "structures des mythes", la notion de structure sous-jacente apparaît comme profondément différente et n'entraîne pas, pour moi, la même conviction. Il reste que ces efforts méthodologiques ont ouvert de nouvelles voies de réflexion. Le structuralisme manifeste une prise de conscience certaine dans le domaine social, sur la manière dont se constitue une science. Abandonnant le concept pseudo-scientifique de cause, il vise dans sa démarche dite synchronique, à dégager globalement de l'ensemble des phénomènes un système apte à fonctionner et qu'il soit raisonnable d'isoler, systèmes de parenté par exemple ou système constitué par une langue naturelle, où à la limite système de schèmes de pensée dont il convient de décrire abstraitement pour une structure aussi mathématisée que possible l'adéquation et la stabilité.

A travers la mécanique statistique contemporaine, comme à travers toute une part du réel économique et social, à travers beaucoup de problèmes d'organisation aussi, règnent deux complexes théoriques, l'un réunissant la combinatoire et la théorie des graphes, l'autre fait de la programmation convexe (théorie de l'optimisation), de théorie des jeux et de théorie du contrôle au sens de Pontryagin, tout deux trouvant leur efficacité dans l'usage des ordinateurs. C'est au second de ces complexes que je veux m'intéresser quelques instants.

Cela a commencé vers 1930 avec les travaux de von Neumann sur la théorie des jeux et ses applications à l'économie, cela a continué avec les recherches de Kuhn et Tucker concernant l'optimisation et, plus récemment, nous avons bénéficié des résultats généraux de Pontryagin concernant le contrôle d'un système en évolution. Ainsi s'est constitué un magnifique instrument d'intelligence et d'action, transdisciplinaire par sa nature même.

*Transdisciplinarité du
complexe : programmation
convexe, jeu, contrôle.*

A ce sujet, j'aimerais faire deux remarques : tout d'abord, tous les systèmes que nous envisageons, qu'ils soient physiques, économiques ou sociaux, connaissent dans leur évolution de larges phases de stabilité, entrecoupées par des chocs (dus à des modifications brutales de liaisons, des technologies, etc.) ou des périodes d'instabilité. Il apparaît que cette apparence de régularité ou de stabilité correspond au rôle prépondérant que jouent dans leur description, des fonctions convexes par morceaux, les frontières de convexité correspondant à l'apparition des phénomènes d'instabilité ou de choc. Il en est ainsi en thermodynamique pour l'entropie considérée comme fonction des variables intensives, en économie pour les différentes fonctions décrivant les processus d'échange ou de production etc ; c'est ce qui explique le rôle joué par la programmation convexe et l'optimisation.

*Le jeu est la chose la
plus sérieuse du monde*

D'autre part, le jeu est la chose la plus sérieuse du monde et nous jouons tous ou plutôt nous pouvons décrire notre action en termes de jeu. Le physicien joue avec la nature, le dirigeant d'entreprise, l'aménageur et l'urbanisme jouent avec les phénomènes économiques, et, bien entendu, les militaires jouent. Beaucoup de ces jeux sont, hélas, traduisibles en termes de jeux à coalitions variables que nous sommes mal armés pour traiter. Nous jouons tous et nous voulons élaborer des stratégies qui, compte tenu à chaque instant de notre information, nous donnent le maximum de chances d'un certain type de gain. Certains de ces jeux sont aléatoires, d'autres non. A travers le complexe programmation convexe, jeux, contrôle, des problèmes importants pour notre action, notre vie sociale, ont trouvé un cadre unique de pensée et commencent à être justifiables de techniques analogues, où les ordinateurs jouent un grand rôle. Certains problèmes limités ont reçus des solutions rigoureuses : il est devenu impossible de gérer des stocks, un port maritime important ou un aéroport, d'organiser de vastes projets aux multiples tâches élémentaires, sans l'appui de programmes mis en oeuvre par des ordinateurs grands ou petits. Dans d'autres cas, les plus nombreux, ce sont seulement des approches qui sont suggérées et ces approches ne dictent évidemment pas les solutions, mais indiquent les choix cohérents réellement possibles et permettent, par simulation sur des modèles simplifiés, l'étude des prévisions à court terme en fonction de différentes hypothèses.

Un concept comme le temps physique a une longue histoire et son évolution peut être prise comme symbole de l'évolution d'une partie importante de la science.

C'est l'écoulement uniforme du temps, la notion de durées égales qu'il a d'abord fallu saisir. Jusqu'à Galilée et Newton, on peut dire que cette notion n'a été appréhendée qu'implicitement et que les mesures correspondantes ne reposaient que sur la répétition : la rotation de la sphère céleste qui ramène les étoiles à la même position apparente, qui détermine le spectacle du ciel et conditionne étroitement la vie humaine était prise pour uniforme. Pour fractionner cette unité, on s'efforçait de répéter sur terre le déroulement d'un phénomène dans des conditions aussi identiques que possible (sablier, clepsydre), tout en étant parfaitement incapable de faire la théorie du phénomène. On réussit aussi à aboutir à un temps cinématique, apte à la description des mouvements les plus simples, mais dont la mesure précise demeure longtemps au delà des forces humaines.

Impossibilité de mesurer avec précision le temps cinématique

Il faut attendre l'apparition de la dynamique classique pour, à la fois, comprendre que l'écoulement uniforme du temps pose un problème, pour penser et résoudre ce problème, pour véritablement mesurer le temps dynamique et relier complètement le temps astronomique au temps terrestre. Qu'est-ce que le temps pour la mécanique classique ? C'est en vérité l'équation fondamentale de la dynamique qui le définit. Selon la boutade d'un astronome célèbre "c'est cette variable appelée "t" qui fait que les équations de la mécanique sont vraies". C'est le caractère universel de ces équations et leur manière de relier des concepts de temps et d'espace, de masse et de force qui définit au fond globalement l'ensemble de ces concepts, une définition indépendante de chacun d'entre eux se révélant vite impossible. La prévision extrêmement précise de tout un réseau de coïncidences temporelles entre phénomènes justifie cette approche et la prise de tout arbitraire.

Le temps dynamique: celui des équations

Tout système mécanique simple dont nous savons faire la théorie dynamique complète peut aussi servir au repérage du temps, à la mesure indirecte du temps. La rotation de la Terre sur elle-même va continuer longtemps à être considérée comme uniforme, ce qu'elle est à une haute approximation, mais il faudra se résigner à lui attribuer des irrégularités, à la considérer comme une horloge qui tantôt avance, tantôt retarde ? Mettant en jeu toute la mécanique céleste et une grande partie des observations, le temps astronomique (qui va être jusqu'à nos jours le temps physique) ne peut plus être mesuré, mais savamment calculé, déterminé par le calcul à 10^{-10} près environ.

Le temps astronomique : le temps calculé

Il nous faut maintenant voir les incidences sur le temps de la relativité d'une part et de la mécanique quantique d'autre part. La pensée d'Einstein a mûri à partir d'une analyse des expériences, réelles ou de pensée, de "coïncidences temporelles" qui ne peuvent s'effectuer au mieux qu'à l'aide d'ondes électromagnétiques se propageant à la vitesse $C = 3000.000$ km/sec élevée certes, mais finie. C'est de cette analyse qu'a surgi le caractère relatif à l'observateur des coïncidences, la nécessité de modifier la cinématique galiléenne et de bâtir une nouvelle dynamique "relativiste", celle enfin de considérer l'espace-temps comme le seul background physique, où l'ensemble des phénomènes peut être décrit d'une manière objective. Avec cette théorie, de nouveaux problèmes relatifs au temps sont apparus. Tout d'abord, il convient de distinguer dans l'espace-temps des variables temporelles jouant un rôle purent topologique, c'est-à-dire servant à la manière des coordonnées cartographiques purement à repérer les événements. C'est seulement ensuite que l'on peut aborder l'aspect métrique

L'espace-temps de la relativité

Le passé et le futur

et prendre conscience du rôle du temps propre qui devient un temps s'écoulant uniformément presque par définition. Enfin alors que "la flèche du temps", son orientation du passé vers le futur ne posait guère de questions dans le cosmos newtonien ou même dans l'espace-temps plat de Minkowski (relativité restreinte), à l'échelle du cosmos einsteinien représenté sur un espace-temps courbe, pourraient apparaître des topologies étranges permettant l'échange passé-futur, ce qu'on interdit généralement. Cette question de la flèche du temps joue aussi un grand rôle en mécanique quantique (symétrie temporelle T).

Le temps métrique de la mécanique quantique

De 1920 à 1940, la mécanique quantique a elle aussi conduit à une dynamique autre que la classique et pour le problème du temps à une véritable dynamique du rayonnement, dynamique qui est à la fois quantique et relativiste. C'est sur elle que nous basons désormais la définition et la mesure d'un temps métrique, notre temps physique actuel et de la notion d'écoulement uniforme. Les horloges dites "atomiques" stabilisées sur résonnances atomiques particulièrement aiguës nous fournissent un temps ainsi "stabilisé" supérieur au temps astronomique lui-même, défini à 10^{-12} environ. C'est par ce moyen, qui tient compte à la fois de la mécanique quantique et de la relativité, que se trouve défini et réalisé ce qu'on peut appeler l'étalon de temps.

On voit quel a été le chemin parcouru et comment la définition scientifique d'une seule grandeur, l'affinement d'un seul concept n'a pu s'effectuer qu'à travers la mise en jeu de toutes les grandes théories, mécanique céleste classique d'abord, puis relativité et mécanique quantique.

Que conclure au terme de cette analyse ? Essentiellement, me semble-t-il, à l'homogénéité de l'activité théorique à travers science et technique, indépendamment des domaines où elle s'exerce. C'est le développement et l'adaptation de cette activité théorique qui supposent et imposent une certaine transdisciplinarité. Le structuralisme, pour une large part, vis à en faire bénéficier ce qui n'était que des

"histoires" sur la société. C'est ainsi une démarche unique, théorique et expérimentale, qui nous conduit à comprendre et à agir, qui inspire simultanément "science et arts", les pouvoirs acquis se révélant les garants de notre intelligence des phénomènes et nous permettant, sans rien perdre, de tout remettre en question.

Nos universités présentes forment, semble-t-il, à travers le monde une proportion trop grande de spécialistes de disciplines prédéterminées, donc artificiellement bornées, alors qu'une grande partie des activités sociales, comme le développement même de la science, demandent des hommes capables à la fois d'un angle de vue beaucoup plus large et d'une focalisation en profondeur sur des problèmes ou des projets nouveaux, transgressant les frontières historiques des disciplines. Ce sont ces hommes qu'il nous faut aussi former.