

# LE MODÈLE ÉVOLUTIONNISTE DANS L'HISTOIRE DES TECHNIQUES: LE CAS DES BIOTECHNOLOGIES

CÉDRIC GRIMOULT

Professeur agrégé d'histoire, GEODE (CNRS-Paris X-Nanterre)

Après avoir montré que l'historiographie contemporaine n'offre pas de compréhension satisfaisante de l'histoire des techniques au sein de l'histoire globale, l'article vise à prouver que ce domaine précis valide le modèle évolutionniste sélectif. L'exemple du développement des biotechnologies dans la période contemporaine permet de préciser notamment trois aspects de ce paradigme: son caractère probabiliste – qui ne s'accorde ni avec le hasard pur ni avec un déterminisme absolu –, sa complexité hiérarchique – la sélection multipolaire intervenant de manière spécifique à tous les niveaux d'intégration sociale et culturelle –, et la diversité des modes évolutifs – allant de la stase à la «révolution» du système technique. Le modèle évolutionniste sélectif s'avère ainsi bien supérieur à ses concurrents, et permet de mieux insérer l'histoire des techniques dans l'ensemble de la discipline historique.

Le modèle évolutionniste séduit un nombre croissant de spécialistes des sciences humaines, aussi bien en sociologie et en économie qu'en histoire des sciences et des techniques. Dans tous ces domaines, il reste cependant très controversé. Cet article a pour but de révéler les atouts du modèle évolutionniste en en défendant une conception encore peu connue, mais applicable à l'histoire des techniques. C'est ce qui sera démontré dans le cas des biotechnologies, un thème central au regard des inquiétudes citoyennes actuelles à propos de l'environnement, de l'alimentation et de l'avenir de l'homme notamment, mais encore trop rarement étudié par les historiens.

## 1. UN MODÈLE PROBABILISTE

L'histoire des techniques est souvent placée par les historiens, de façon quelque peu contradictoire, à la fois en amont (par ses retombées économiques) et en aval (à cause de sa dépendance à l'égard de la science et de la culture d'une époque) des domaines de l'histoire classique (économie, société, politique et mentalités). Implicitement, les spécialistes ont tendance aujourd'hui à intégrer cette discipline au sein d'une conception «circulaire», dans laquelle on ne peut définir un moteur particulier de l'histoire (voir Fig. 1). Sa dynamique semble en partie autonome, les diverses sphères d'activité s'entraînant les unes les autres.

Mais un tel déterminisme simpliste ne permet pas d'appréhender la réalité historique sous tous ses angles. En effet, toute histoire possède aussi un aspect aléatoire, non prédictible.

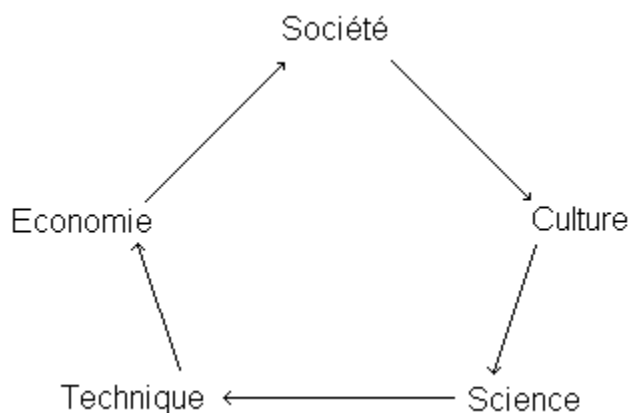


Fig. 1. – Les relations entre activités humaines d’après les historiens contemporains.

#### DÉVELOPPEMENTS PRÉVUS ET IMPRÉVISIBLES

L’histoire des biotechnologies, comme celle de toutes les techniques, s’avère riche en  v nements aussi bien prévisibles et prévus, que totalement surprenants. Ainsi, la naissance du génie génétique fut-elle marquée par des prévisions contradictoires. Dans *Le hasard et la nécessité*, livre essentiel de réflexion sur l’évolution, publié par le prix Nobel Jacques Monod en 1970, il reste écrit: «Non seulement la génétique moléculaire moderne ne nous propose aucun moyen d’agir sur le patrimoine héréditaire pour l’enrichir de traits nouveaux, pour créer un “surhomme” génétique, mais elle révèle la vanité d’un tel espoir: l’échelle microscopique du génome interdit, pour l’instant et sans doute à jamais, de telles manipulations»<sup>1</sup>. Au contraire, dès cette époque, Denis Buican se montrait beaucoup plus nuancé: «“Sans doute à jamais” est sans doute de trop. Pourquoi donc scier sous ses pieds la branche de l’avenir? Aucune raison valable ne nous y oblige. Bien au contraire»<sup>2</sup>. Depuis plusieurs mois en effet, les bases expérimentales de ce qui allait devenir le génie génétique étaient posées, grâce à l’isolement d’un gène de la bactérie *Escherichia coli*, chère à Monod. A partir de 1972, l’équipe de Paul Berg à l’université de Stanford (Californie) découvre des enzymes de restriction, utilisées par les bactéries afin de se protéger des virus venues les parasiter, en découpant leur ADN. Gr ce à ces «ciseaux moléculaires», les chercheurs ont pu créer un ADN hybride à partir de morceaux d’ADN appartenant à deux virus différents. Dès l’année suivante, Herbert Boyer et Stanley Cohen mirent au point la technologie dite «de l’ADN recombinant», qui reste à la

<sup>1</sup> P. 180.

<sup>2</sup> Denis Buican, *Hasard, nécessité et logique du vivant*, La Nouvelle Revue française, septembre 1971, n  225, p. 81.

base du génie génétique. Non seulement ils fabriquèrent un nouveau patrimoine héréditaire – bactérien cette fois – grâce aux enzymes de restriction qui permirent le transfert (transgenèse) d'un gène bactérien dans une autre bactérie, mais ils purent conserver dans leurs cultures les seules bactéries modifiées, car elles portaient aussi un gène leur permettant de survivre dans le milieu de culture choisi afin d'être sélectif. Dès lors, ne se reproduirent que les bactéries génétiquement modifiées (des clones). C'est cette association entre utilisation de la modification et de la sélection du seul clone transformé qui constitue une révolution technique.

Un cas plus clair de l'apparition d'un phénomène inattendu prend place dans le même contexte. Dès 1970, Temin découvre la transcriptase inverse, une protéine capable de transcrire un ARN en ADN, opération que l'on pensait impossible, étant donné que c'est généralement l'ADN qui est transcrit en ARN, lequel est ensuite traduit en protéine. Cette molécule est utilisée par certains virus – constitués d'ARN – afin d'insérer leur génome au sein de celui des bactéries qu'ils parasitent. Cette "mutation", en quelque sorte, est responsable de la fabrication de centaines de copies de l'ARN viral et de nouvelles enveloppes pour leur permettre de s'échapper. Lorsque la bactérie ainsi envahie a produit autant de virus qu'elle en était capable, elle meurt en libérant les copies du parasite. Pourquoi cette transcriptase inverse est-elle intéressante? Elle a semblé à certains chercheurs réfuter l'hypothèse centrale définie par Francis Crick, selon lequel aucune information génétique ne peut passer du phénotype (le corps des individus) vers le génotype (ensemble des informations génétiques). En effet, une telle "remontée" de l'information aurait rendu possible l'hérédité des caractères acquis, ancienne hypothèse évolutionniste réfutée à plusieurs reprises. Dès 1883, l'Allemand August Weismann l'avait en effet rejeté en coupant la queue à 22 générations successives de souris blanches sans qu'aucune modification héréditaire ne soit constatée. Les mutations génétiques restent aléatoires, et ne peuvent être directement influencées par l'environnement. Mais plusieurs évolutionnistes, et non des moindres, continuaient de défendre la possibilité d'une telle hérédité de l'acquis, essentiellement à cause de leur hostilité idéologique à l'encontre du darwinisme<sup>3</sup>.

Les coups de tonnerre médiatiques ne sont pourtant pas tous justifiés, comme l'illustre le cas de la transcriptase inverse, car si celle-ci permet à une information génétique d'aller à contre-courant, de l'ARN vers l'ADN, aucune information ne peut passer des protéines du corps (le phénotype) vers l'ARN. Aussi la découverte de Temin ne permet-elle pas de ressusciter une quelconque hérédité de l'acquis, et n'infirme aucunement les bases du darwinisme. Nombre d'auteurs – notamment français – ont cependant soutenu que des découvertes futures pourraient invalider l'hypothèse centrale des généticiens. Mais un tel événement, prévu et annoncé,

<sup>3</sup> Cf. Cédric Grimoult, *Histoire de l'évolutionnisme contemporain en France (1945–1995)*, Genève-Paris, DROZ, 2000.

serait tout simplement incompatible avec l'ensemble des données accumulées par un siècle d'étude du patrimoine héréditaire des êtres vivants. Ainsi, l'histoire des techniques ne s'avère donc ni plus ni moins déterministe que l'histoire générale, laquelle intègre une dose de hasard et une part de nécessité. Sa nature probabiliste la rapproche donc de l'évolutionnisme biologique, dont les mécanismes essentiels reposent sur la sélection des mutations génétiques, deux phénomènes eux-mêmes probabilistes.

#### LE MODÈLE ÉVOLUTIONNISTE EST PROBABILISTE

L'un des intérêts du modèle évolutionniste réside justement dans sa nature probabiliste, c'est-à-dire qu'il n'est ni purement déterministe, ni simplement aléatoire. De plus, le modèle évolutionniste actuel s'est considérablement enrichi par rapport à celui des années cinquante, quand les biologistes attribuaient encore presque exclusivement le rôle du hasard aux mutations génétiques et celui de la nécessité à la sélection naturelle. De nos jours, les évolutionnistes admettent que la contingence intervient aussi dans les facteurs sélectifs, l'environnement étant lui-même à l'origine de phénomènes aléatoires. Réciproquement, un certain déterminisme pèse aussi à tous les niveaux d'étude, y compris sur les mutations génétiques, qui doivent se produire dans certaines limites. Denis Buican, le fondateur de la théorie synergique de l'évolution, exprime ainsi cette idée essentielle: «[...] on ne peut parler de hasard comme "liberté absolue" qu'en tant qu'éventuelle hypothèse car, pour qu'un "hasard", absolu ou non, puisse jouer, il faut supposer qu'il y a les jouets, c'est-à-dire les matériaux initiaux indispensables au processus évolutif qui, par leur nature spécifique, ne peuvent pas ne pas canaliser le processus de l'évolution. En d'autres termes, pour qu'une "roulette", jeu typique de "hasard", puisse fonctionner, il faut supposer l'existence d'éléments constitutifs adéquats pour sa construction, et bien sûr, des mécanismes qui en soient adaptés. Or, le matériel initial peut permettre une grande liberté de choix, avec du marbre on peut produire un amas de pierres ou le Parthénon, mais guère une liberté absolue: avec du sable à l'état naturel, on ne peut point édifier des gratte-ciel...»<sup>4</sup>.

Pour exprimer une idée analogue, Stephen Jay Gould – parmi d'autres auteurs – utilise le terme de «contraintes», qui connaît actuellement une grande diffusion. Ce mot, également très employé par les historiens et les géographes, sert aux évolutionnistes contemporains pour désigner certaines limites de l'innovation biologique. Gould considère ainsi qu'il n'existe pas d'équivalent à la roue chez les êtres vivants, car leur physiologie ne leur permettrait pas la mise au point de tels mécanismes. Ces contraintes canaliserait ainsi *a priori* l'évolution, alors que des processus sélectifs indépendants favorisent ou éliminent certains dispositifs *a*

<sup>4</sup> D. Buican, *La Révolution de l'évolution*, Paris, PUF, 1989, pp. 310–311.

*posteriori*. Mais le terme ambigu de «contrainte» implique une conception déterministe extrêmement discutable, surtout lorsqu'il est employé au sujet de mystérieuses «contraintes internes» (sous-entendu physiologiques) ou «environnementales». Les évolutionnistes ont d'autant plus tendance à substituer ces contraintes à la sélection naturelle qu'ils refusent encore implicitement de prendre en considération le fait que celle-ci intervient – selon des modalités particulières – à chaque niveau d'intégration du vivant: gène, cellule, individu, groupe, espèce, etc.

En effet, contrairement à ce que l'on a longtemps cru, la sélection naturelle au sens classique – darwinien – du terme, qui repose sur la lutte des individus pour la survie et la reproduction, n'est pas le seul mécanisme sélectif. Certains cas, aujourd'hui très bien documentés, de conflits sélectifs, montrent clairement qu'il existe aussi notamment une sélection génotypique. Celle-ci élimine *a priori* certaines mutations défavorables pour la vie, indépendamment de l'adaptation éventuelle des individus à leur environnement<sup>5</sup>. Réciproquement, les généticiens ont observé l'abondance de certaines séquences d'ADN, répétées un très grand nombre de fois dans le patrimoine héréditaire, sans lien avec une quelconque utilité pour l'individu. C'est que les gènes n'ont pas besoin d'être utiles à l'organisme pour se «reproduire»<sup>6</sup>. Il doit cependant exister une limite au-delà de laquelle une telle multiplication met en péril la survie de l'individu qui porte cet «ADN égoïste». Cela est attesté par les plantes polyploïdes, lesquelles possèdent 3, 4, 5, 6, voire même 7 chromosomes de chaque type (au lieu des deux habituels<sup>7</sup>), mais dont le nombre de chromosomes ne peut augmenter indéfiniment, «probablement à cause d'un déséquilibre d'ordre génotypique ou cellulaire»<sup>8</sup>. Notons, par exemple, que la possession d'un chromosome surnuméraire – ou l'absence d'un chromosome – provoque des malformations graves chez l'homme, comme le mongolisme pour les individus affectés d'une trisomie 21<sup>9</sup>. Quoi qu'il en soit, une telle sélection génotypique est aujourd'hui attestée au plan scientifique, et permet d'expliquer une certaine canalisation du hasard génétique qui restait incompréhensible dans le cas de la sélection naturelle classique. Mais ce nouveau concept, intégré dans l'idée de «sélection multipolaire» (car la sélection intervient en fait à tous les niveaux

<sup>5</sup> *Id.*

<sup>6</sup> Pierre-Henri Gouyon, *Les harmonies de la nature à l'épreuve de la biologie. Évolution et biodiversité*, INRA Editions, 2001, p. 71.

<sup>7</sup> L'espèce humaine possède 23 paires de chromosomes, soit 46 chromosomes. Le blé tendre commun possède quant à lui 7 types chromosomiques, chacun étant présent en 6 exemplaires, ce qui donne un total de 42 chromosomes. Le blé dur ou le blé d'Égypte possède 7 types chromosomiques analogues à ceux du blé tendre, mais ils sont présents en 4 exemplaires, ce qui fait un total de 28. Certaines espèces animales sont aussi polyploïdes.

<sup>8</sup> D. Buican, *op. cit.*, p. 303.

<sup>9</sup> C'est-à-dire dont le patrimoine héréditaire porte les 46 chromosomes caractéristiques de l'espèce, plus un chromosome de la 21<sup>e</sup> paire en supplément.

d'intégration du vivant selon des modalités variées), permet de se passer des hypothétiques «contraintes», mal définies et trop déterministes.

L'histoire des techniques peut donc bénéficier d'un guide épistémologique solide avec le modèle évolutionniste, dans la mesure où ce dernier peut intégrer les innovations des objets ou des savoir-faire, qu'elles soient mineures ou révolutionnaires, et surtout, sans achopper sur la question du hasard et de la nécessité. Ces découvertes peuvent être indigènes ou importées, issues d'un travail individuel ou collectif, empiriques ou inspirées d'un autre domaine culturel, elles entrent toutes dans une grille d'analyse souple, mais commune, qui prend en considération leur dimension à la fois aléatoire et déterministe – puisque l'on considère *a priori* leur apparition comme issue d'un mécanisme probabiliste. Mais cela ne constitue nullement le principal atout de ce nouveau modèle – ou néotype – épistémologique. Sa supériorité réside surtout dans le fait qu'il permet une intégration des différents niveaux d'étude, affectés par des pressions sélectives spécifiques.

## 2. SÉLECTION CULTURELLE MULTIPOLAIRE

La sélection des techniques doit être considérée spécialement à chaque niveau de la complexité sociale et culturelle dans laquelle les innovations s'insèrent. Nous isolerons successivement trois niveaux d'intégration différents, avant de montrer comment ils s'emboîtent et s'articulent les uns aux autres.

### PALIER SÉLECTIFS DANS L'HISTOIRE DES BIOTECHNOLOGIES

Il apparaît déjà, en considérant ce qui précède, qu'un premier niveau sélectif se trouve localisé dans le cadre de la réflexion individuelle elle-même. Sans doute le cerveau humain constitue-t-il un appareil de «simulation» sans équivalent dans la biosphère. La pensée permet en effet d'anticiper et de prévoir, en faisant l'économie de l'expérience directe. De plus, comme les gènes sont recombinaisonnés à chaque génération au cours de la reproduction, chaque chercheur adopte son propre arrangement théorique. L'esprit du chercheur arrange les éléments préexistants de façon consciente. Notons déjà que cela ne nie pas la possibilité de résultats pluriels, ni d'erreurs, qui passeraient ensuite au crible de la sélection des idées. De ce point de vue, le cerveau humain peut être considéré non seulement comme un grand simulateur, réalisant d'innombrables expériences de pensée, sur le mode sélectif, mais aussi comme un agitateur, confrontant sans arrêt les différentes combinaisons d'éléments, pour la plupart préexistants, aux faits, méthodes, préjugés et autres points de vue, afin d'y trouver un ensemble cohérent, permettant l'élaboration d'une nouvelle technique. Cela explique le rôle important de «l'influence», souvent difficile à définir, que les travaux des chercheurs exercent sur ceux des autres, de la même spécialité ou de domaines différents.

Réciproquement, lorsqu'un chercheur se montre «très en avance sur son temps», c'est-à-dire dont les idées demeurent isolées, il n'est généralement pas cru ou, plus simplement, ses découvertes ne génèrent aucune dynamique. On retrouve ici l'enchaînement des sciences et des techniques, distinctes mais interdépendantes. L'histoire des biotechnologies illustre clairement ce point de vue dans le cas du moine botaniste Gregor Mendel, découvreur des lois fondamentales de la génétique à partir de ses croisements de petits pois, mais qui ne suscitèrent, à l'origine, aucun intérêt de la part de la communauté scientifique. Contrairement aux assertions d'une légende tenace, un tel manque de considération n'est pas dû au statut social de Mendel, ni même au fait qu'il n'ait pas été lu<sup>10</sup>. Mais comme elles sont de nature statistique, et qu'elles émergent dans une époque où la science reste empreinte de déterminisme, leur publication attire peu l'attention de la communauté scientifique<sup>11</sup>. D'où venait donc l'inspiration de Mendel? Erwin Heberle-Bors répond ainsi à cette question: «La pensée de Mendel a été marquée, toute sa vie durant, par la physique mathématique qu'il avait apprise à Vienne auprès de Doppler. Celui-ci avait consacré un chapitre de son manuel de mathématique à la théorie des combinaisons et aux principes de base du calcul des probabilités»<sup>12</sup>. Observons que cette citation montre bien les liens qui existent entre des domaines différents, les mathématiques, en l'occurrence, fournissant au botaniste un modèle pertinent pour l'étude de l'hérédité.

Le cas Mendel démontre aussi l'existence d'un deuxième palier sélectif dans l'histoire des sciences et des techniques : celui de la communauté des chercheurs. En fait, dans l'histoire stricte des techniques, cet échelon correspond à la compétition entre entreprises utilisant l'innovation en question. Dans la situation de Mendel, c'est la communauté des chercheurs qui, par son manque d'intérêt, élimine ses découvertes du champ des domaines intéressants: «Compter et mesurer étaient l'alpha et l'oméga de la physique de ce temps-là, alors qu'en botanique et en zoologie, on considérait encore que seule, l'observation permettait d'acquérir de nouvelles connaissances»<sup>13</sup>. Au contraire, lorsqu'elles sont redécouvertes en 1900, ces lois de la génétique sont facilement intégrées aux connaissances de l'époque, beaucoup plus ouverte aux phénomènes stochastiques, tant ils dominent les sciences physiques. Pour ce qui concerne plus directement les techniques, on aurait tort de croire que cet échelon sélectif n'est pas analogue à celui qui vient d'être présenté dans le cas de Mendel. Car l'ingénieur doit aussi convaincre les industriels d'utiliser son invention, et les critères rationnels n'entrent pas seuls en ligne de compte. Certaines incompatibilités de personnes, voire, surtout, une autre pesanteur du système, peuvent jouer ici un rôle déterminant. Si les scientifiques peuvent

<sup>10</sup> D. Buican, *Histoire de la génétique et de l'évolutionnisme en France*, Paris, PUF, 1984, pp. 78–79 et E. Heberle-Bors, *Génie génétique. Une Histoire, un défi*, Paris, INRA Editions, 2001 (1996), p. 37.

<sup>11</sup> C. Grimoult, communication au Congrès international d'histoire des sciences de Mexico.

<sup>12</sup> P. 36.

<sup>13</sup> P. 37.

rester sceptiques devant une découverte peu cohérente avec le reste des connaissances d'une époque, il arrive souvent que les industriels se montrent prudents à l'égard de techniques encore expérimentales ou qui mériteraient d'être développées avant de se montrer rentables. De plus, le renouvellement de l'équipement induit un coût, parfois dissuasif, pour l'entrepreneur. Les industriels préfèrent d'ailleurs souvent conserver une routine qui a fait ses preuves, plutôt que de risquer une baisse de productivité, même si celle-ci est compensée par un gain à moyen et long terme. La stratégie de l'entreprise résulte ainsi d'un compromis entre les deux niveaux sélectifs déjà identifiés: l'intérêt de l'invention et la nécessité du profit.

Cependant, celle-ci n'est pas encore totalement déterminante, car elle reste subordonnée à un troisième niveau, lequel prend en compte tous les facteurs sociaux, politiques, idéologiques – culturels – pouvant influencer la décision de l'utilisation – ou de l'élimination – de la nouvelle technique. L'historien peut présenter ici de nombreux cas où le développement des techniques se trouve bloqué, à différents stades, à cause de pressions sociales diverses. Nous en verrons deux successivement, parmi les plus célèbres dans toute l'histoire des biotechnologies. Le premier cas est celui de l'affaire Lyssenko, tristement célèbre. Elle porte le nom de l'agronome favori de Staline, lequel obligea les sciences biologiques de l'Union Soviétique à se plier au dogme marxiste-léniniste<sup>14</sup>. Ainsi, parce que le marxisme prône l'entraide des individus, Lyssenko recommandait le semis des végétaux «en nids» dans les régions arides, et notamment «100 à 200 graines de *Kok-saghyz* dans un nid de 5 à 10 cm<sup>2</sup> pour que les plantes se “prêtent mutuellement leur ombre”...»<sup>15</sup> alors que la compétition pour l'eau devait décimer ses plantes... Il prônait aussi les plantations des glands en nid, afin que les chênes s'entraident.

Lyssenko voulait aussi développer sur des vastes surfaces la technique dite de «vernalisation», consistant à semer au printemps des graines de céréales d'hiver – notamment de blé d'hiver – déjà germées afin de permettre le développement des

<sup>14</sup> Un important débat a eu lieu à ce sujet. Dominique Lecourt a d'abord soutenu l'idée d'une émergence du lyssenkisme à partir d'un succès agricole réel, au contraire de D. Buican, qui a montré la primauté des questions idéologiques. Grâce aux travaux de nombreux auteurs, venus confirmer la thèse de D. Buican (revue historiographique par Aurélien Chevalme, «La réception du “darwinisme créateur soviétique” (lyssenkisme) en France, 1948–1998», DEA d'histoire du monde contemporain, Paris X-Nanterre, 2001), D. Lecourt est revenu sur ses premières affirmations et rejoint – sans le dire explicitement – le point de vue de D. Buican, en écrivant notamment: «Avec Lyssenko, Staline et le Parti avaient cru trouver dès le début des années 1930 une solution unique – de caractère technique – à deux des problèmes majeurs sur lesquels butait leur “construction du socialisme”: la résistance des paysans, qui, soumis à la collectivisation forcée, firent chuter la production agricole; celle des intellectuels, qui refusèrent l'embrigadement dans un Parti de plus en plus dogmatique. [...] Malgré les trucages statistiques, les résultats déplorables de la plupart des techniques qu'on avait imposées en son nom avaient fait l'objet de dénonciations publiques en 1947–1948» (*L'Amérique entre la Bible et Darwin*, 1999, p. 600).

<sup>15</sup> D. Buican, *La Révolution de l'évolution*, Paris, PUF, 1989, p. 213.



épis. Or cette technique était coûteuse et inefficace, car, dans les semoirs mécaniques, les radicules et les brins enchevêtrés étaient déchirés. De surcroît, Lyssenko considérait, à tort, que cette méthode physiologique causait une transformation génétique des espèces grâce à l'hérédité de l'acquis et à la «loi du bond dialectique». Ainsi, le blé d'hiver, qui possède 42 chromosomes, se transformerait en blé de printemps, dont la garniture chromosomique est de 28 chromosomes... Ces considérations constituèrent la base de la fausse théorie de la spéciation de Lyssenko, selon lequel les espèces – notamment végétales – peuvent se métamorphoser les unes dans les autres: le blé en seigle (et vice versa), l'avoine en folle avoine, etc.

L'aberration lyssenkiste reposait sur des trucages statistiques concernant aussi d'autres fausses réalisations, comme les hybrides de greffe. L'agronome soviétique défendait en effet l'idée selon laquelle l'hérédité n'était pas transmise par voie sexuelle (en l'occurrence, les fleurs), mais par la sève des plantes, car il avait observé la formation d'hybrides entre le greffon et le porte-greffe. Cela est dû au fait que, lorsqu'elle était possible, l'on n'avait pas empêché une fécondation croisée entre les branches génétiquement différentes, ou que l'on avait réalisé – intentionnellement – une fécondation forcée. L'intérêt de la greffe réside dans le fait que le porte-greffe ne doit fournir que les substances nutritives. Il faut donc veiller très soigneusement à polliniser le greffon avec ses propres fleurs (ou du pollen provenant de la même variété), et empêcher que le pollen du porte-greffe ne vienne féconder les fleurs du greffon... Au total, l'affaire Lyssenko montre que le contexte politique peut s'avérer inadéquat pour le développement de techniques pertinentes au regard des seuls critères factuels et de rentabilité économique.

Un autre exemple peut servir à démontrer l'influence d'une sélection extérieure au milieu technique proprement dit, mais exerçant un rôle important sur sa dynamique propre. Il s'agit de l'essor du développement génétique contrarié par les préoccupations de sécurité, puis d'éthique. Dès les débuts de la technologie de l'ADN recombinant, s'est posé la question du risque de dissémination des gènes hors des sphères de contrôle, qui sont toujours au cœur de la controverse actuelle concernant l'utilisation des semences génétiquement modifiées dans l'agriculture, notamment en Europe. Paul Berg, dont il a été question précédemment, n'osa pas réaliser lui-même l'expérience de transgénèse menée par Herbert Boyer et Stanley Cohen, car il travaillait sur des virus dangereux pour la santé humaine. Le lendemain de l'annonce de la maîtrise des technologies concernant le génome, les généticiens réunis envisagèrent les limites qu'il convenait de fixer à ce genre de travaux eu égard aux risques encourus: «Il fut décidé, par vote, d'adresser un même courrier à la revue *Science*, au Président de l'Académie Nationale des Sciences des Etats-Unis et au Président du NIH (*National Institute of Health*, Institut National de la Santé) et de faire un communiqué de presse contenant les mêmes éléments. La lettre présentait brièvement la nouvelle technologie, indiquait les perspectives

offertes et les risques éventuels, et demandait à l'Académie de mettre sur pied une Commission d'étude qui se chargerait du problème et élaborerait, si nécessaire, des directives concernant la sécurité des expériences»<sup>16</sup>. Cet épisode mérite d'être signalé, car il se trouve à l'origine directe de la conférence d'Asilomar, en Californie, qui se réunit dès 1975.

Les conséquences de cette conférence demeurent importantes, mais aussi controversées. Conformément à notre modèle sélectif, E. Heberle-Bors observe que les découvreurs du génie génétique durent lutter pour faire accepter leur découverte, notamment parce que «dans le cas présent, le nouveau paradigme du génie génétique doit être mis au défi dans sa globalité devant la société. Tous les détails des effets sur l'environnement et sur la société doivent être présentés et évalués»<sup>17</sup>. Face aux risques encourus, et aux coûts qu'ils allaient générer, les spécialistes édictèrent les Directives NIH qui formèrent la base de la réglementation dans un grand nombre de pays. Pour Denis Buican, cette «camisole de force des règlements bureaucratiques»<sup>18</sup> fut souvent jugée trop contraignante. Pour Erwin Heberle-Bors, elle traduisait cependant un sentiment de responsabilité des scientifiques à l'égard de la société qui la finançait. Quoi qu'il en soit, ces directives tombèrent progressivement en désuétude, car les risques avaient été surestimés pour ce qui concerne le transfert des gènes quand on ne manipule pas d'organismes pathogènes, comme les virus. Surtout, quelques années plus tard, une nouvelle méthode – la PCR, polymérase chain reaction – permit la multiplication de l'ADN sans avoir besoin de l'insérer dans un génome bactérien, puis de le cloner et de soumettre les cellules à la sélection. La molécule nommée ADN polymérase recopie des séquences d'ADN au cœur des cellules, et peut être utilisée en laboratoire pour produire rapidement de grandes quantités de l'ADN désiré, avec un appareillage assez simple. La compétition entre méthodes était alors très nettement à l'avantage de la PCR, ce qui fait écrire à E. Heberle-Bors, lequel confirme alors le diagnostic de D. Buican: «Un bel exemple montrant comment le progrès technique résout des problèmes qui ne sont pas uniquement de nature technique»<sup>19</sup>.

Mais la discussion s'est alors déplacée des milieux scientifiques vers le reste de la société, qui continue d'identifier les organismes génétiquement modifiés à des menaces pour leur santé et pour l'environnement. Une telle méfiance se trouve à l'origine du moratoire fixé de l'Union Européenne concernant les cultures transgéniques, moratoire que la Commission de Bruxelles souhaiterait aujourd'hui lever, notamment du fait des percées majeures réalisées par les Etats-Unis dans un domaine où les Européens ont accumulé beaucoup de retard. Mais les intérêts

<sup>16</sup> E. Heberle-Bors, *op. cit.*, p. 60.

<sup>17</sup> P. 61.

<sup>18</sup> *La génétique et l'évolution*, Paris, PUF, 1986, p. 88.

<sup>19</sup> P. 63.

économiques ne sont pas seuls en jeu et les pressions de l'opinion publique restent fortes. Ainsi, la sélection des idées se concentre, grâce à des modalités diverses, sur plusieurs niveaux complémentaires, de l'élaboration individuelle à la sphère culturelle planétaire, en passant par les communautés scientifiques locales et les écosystèmes nationaux de pensée.

#### LE MODÈLE ÉVOLUTIONNISTE EST PUREMENT SÉLECTIF

La sélection culturelle constituait jusqu'à récemment un concept à la fois intéressant et embarrassant, car il paraissait en même temps évident et insuffisant. Evident parce que de nombreux auteurs, notamment l'épistémologue Karl Popper, ont insisté sur la compétition existant entre les idées<sup>20</sup>. Celles-ci seraient échangées sur un marché, où les hypothèses non-conformes à la réalité expérimentale sont éliminées, tandis que les théories les plus adéquates sont admises et engendrent une nouvelle génération d'idées plus précises. Pour les techniques, cela signifie que ne survivent que les procédés les plus fonctionnels. L'analogie avec la théorie darwiniste de la sélection naturelle posait cependant divers problèmes, principalement parce que l'évolution biologique interdit un mode de changements que l'on rencontre fréquemment dans l'histoire des techniques: les innovations dirigées. Ainsi, alors que les mutations génétiques sont aléatoires, parce que le milieu ne peut informer l'organisme du sens que devrait prendre la modification nécessaire à une meilleure adaptation, l'innovation technologique résulte d'un processus dirigé et conscient. Plusieurs historiens des techniques, collaborant au recueil d'articles intitulé *Technological Innovation as an Evolutionary Process*, proposent de recourir au modèle lamarckiste. Celui-ci est issu d'une théorie biologique aujourd'hui réfutée, qui considérait les transformations héréditaires comme étant dirigées par l'environnement. Mais, dans ces conditions, l'on ne comprend pas pourquoi certaines innovations pourraient apparaître révolutionnaires. Devant naître des anciennes, les nouvelles techniques devraient s'enchaîner aux précédentes, de façon graduelle. La plupart des auteurs de ce livre préfèrent donc conclure que l'innovation technologique n'est ni lamarckiste ni darwiniste. Mais une solution nouvelle s'offre aujourd'hui aux historiens.

Grâce à la sélection multipolaire, dont il a été fait mention précédemment, la théorie synergique de l'évolution permet de comprendre la canalisation de certaines mutations sans recourir à l'hypothèse fautive des variations dirigées. De manière analogue, il est possible de considérer que les hypothèses scientifiques et techniques sont d'abord l'objet d'une présélection opérée dans l'esprit du chercheur. Les spécialistes du fonctionnement du cerveau tendent en effet à montrer que l'appareil conceptuel humain serait analogue à un vaste «simulateur», capable de tester virtuellement les modèles que nous lui soumettons au sujet de nos

<sup>20</sup> Karl Popper, *La connaissance objective*, Paris, Aubier, 1991, p. 372.

comportements ou de nos idées. Il se pourrait ainsi que les «mêmes» culturels – terme forgé par le généticien Richard Dawkins pour qualifier les idées culturelles – soient analogues aux gènes tout en semblant préadaptés aux situations réelles du fait de cette présélection plus ou moins consciente.

Une innovation culturelle passe ainsi au crible d'une série hiérarchique de tamis emboîtés, lesquels peuvent l'éliminer ou la conserver pour la multiplier. Si elle franchit le barrage de la conviction de l'esprit du chercheur, l'idée nouvelle se voit offrir des opportunités de diffusion dans l'échange entre scientifiques ou l'application concrète. Ce nouveau barrage décidera de son avenir futur: publication dans les revues spécialisées, multiplication des applications, par exemple, jusqu'à conquérir un empire planétaire. Mais elle peut aussi se heurter à des incompatibilités d'ordres divers. Le nouveau «même» peut ainsi s'avérer discordant avec la théorie dominante, incompatible avec les convictions ou les valeurs de la société, défaite par un mécanisme plus rentable, etc. Ce modèle ainsi brièvement présenté offre un autre intérêt, en étant concordant avec une grande diversité de modes évolutifs, concernant les vitesses et les rythmes – réguliers ou révolutionnaires – du changement technique.

### 3. VARIÉTÉ DES RYTHMES ET MODES DE L'ÉVOLUTION CULTURELLE

L'histoire des techniques – comme l'histoire des sciences et l'histoire culturelle en général – ne présente pas d'uniformité en ce qui concerne ses modes. Cela apparaît clairement lorsque l'on observe les débats entre spécialistes à propos de l'aspect globalement graduel, ou alors radicalement révolutionnaire, des innovations technologiques. Intégrant à la fois l'idée de micro- et de macro-mutations techniques – voire même certaines mégamutations créant de véritables tournants dans l'histoire humaine – le modèle sélectif présente une souplesse inconnue dans les autres paradigmes, dont la théorie lamarckiste de l'évolution culturelle.

#### LES «GRAPPES D'INNOVATIONS» DE SCHUMPETER ET LE MODÈLE ÉVOLUTIONNISTE

L'économiste autrichien Joseph Schumpeter (1883–1950) a placé l'innovation technologique au cœur de sa réflexion, parce qu'il considérait qu'elle était «l'impulsion fondamentale» responsable du progrès capitaliste. Sa thèse de la «destruction créatrice» n'est pas sans rappeler l'évolution biologique, en équilibre dynamique du fait de l'élimination continue des individus et des espèces, alors que de nouveaux types ne cessent de surgir. Schumpeter utilise d'ailleurs explicitement le modèle évolutionniste dans le titre de son livre *Théorie de l'évolution économique* (1912) ou lorsqu'il évoque l'organisation du travail manufacturier, comme étant, après l'innovation matérielle, un autre exemple «du

même processus de mutation industrielle – si l'on me passe cette expression biologique – qui révolutionne incessamment *de l'intérieur* la structure économique, en détruisant continuellement des éléments vieillis et en créant continuellement des éléments neufs<sup>21</sup>. Schumpeter apporte ainsi cet argument de poids contre tout lamarckisme historique dans le domaine des techniques: «les nouvelles combinaisons ne sortent pas le plus souvent des anciennes, ne prennent pas leur place immédiatement, mais se dressent à côté d'elles et leur font concurrence»<sup>22</sup>. Surtout, Schumpeter observe des vagues (ou «grappes») d'innovations successives, à l'instar des «radiations évolutives» qui voient l'apparition rapide – au regard des temps géologiques – et simultanée, de nombreuses espèces nouvelles.

Les paléontologues expliquent ce phénomène par la conquête de nouvelles «niches» écologiques, des places vacantes dans l'environnement. Celles-ci peuvent apparaître à l'issue d'un cataclysme, comme celui qui a vu la disparition des dinosaures, parmi de nombreuses autres espèces voici 65 millions d'années. Dans ce cas, les mammifères survivants ont profité de la disparition de leurs anciens concurrents et prédateurs pour prendre leur place. Mais de nouvelles niches peuvent aussi être exploitées grâce à un nouveau dispositif anatomique. Ainsi, la conquête du milieu aquatique par les animaux possédant des squelettes minéralisés externes est qualifiée d'«explosive»<sup>23</sup>, parce que de multiples plans d'organisation se mettent en place, avant de disparaître pendant une autre grande crise de l'histoire de la biosphère.

De façon analogue, l'histoire des techniques, et plus particulièrement celle des biotechnologies, révèle un tel phénomène de vagues associées à la découverte de «niches» disponibles, surtout en rapport avec l'irruption d'une innovation majeure. Lorsqu'un nouveau «système technique» – pour reprendre l'expression de l'historien Bertrand Gille – est découvert, les idées neuves se multiplient, explorant (en quelque sorte) le champ ouvert<sup>24</sup>. La révolution permise par le génie génétique apparaît typique de ce point de vue. Schumpeter estime justement que ce phénomène «d'essaims» d'innovations correspond à la levée des obstacles par une poignée d'entrepreneurs innovants, ce qui concorde avec la présentation actuelle de l'histoire des sciences, héritée des travaux pionniers de Thomas Kuhn<sup>25</sup>.

<sup>21</sup> *Capitalisme, socialisme et démocratie*, Payot, 1951 (1942–1946).

<sup>22</sup> *Théorie de l'évolution économique*, Paris, Payot, 1935 (1912).

<sup>23</sup> Jean-Jacques Jaeger, *Les mondes fossiles*, Paris, Odile Jacob, 1996, p. 24.

<sup>24</sup> Cela est connu depuis longtemps, mais seulement implicitement. En voici pour preuve ces lignes d'un récent manuel d'histoire économique: «L'invention [du convertisseur] qu'il [Bessemmer] dénomma “la fabrication du fer sans combustible” stimula les recherches en ouvrant des perspectives radicalement nouvelles. Un nouveau procédé vit le jour en deux étapes successives [...] Une réorganisation complète de cette industrie résulta de l'adoption de ces procédés. Les installations devinrent beaucoup plus importantes et les investissements, tout particulièrement pour les convertisseurs Bessemmer, furent considérables.» (Eric Bussière, Pascal Griset, Christophe Bouneau et Jean-Pierre Williot, *Industrialisation et sociétés en Europe occidentale 1880–1970*, Paris, A. Colin, 1998, p. 15).

<sup>25</sup> Voir C. Grimoult, *L'évolution biologique en France: Une révolution scientifique, politique et culturelle*, Genève-Paris, DROZ, 2001; Denis Buican, *Biognoséologie*, Paris, Kimé, 1993 et Thomas S. Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983 (1962).

Au contraire, les modifications des outils – moléculaires en l’occurrence – et procédés déjà existants apparaissent beaucoup moins rapidement et fréquemment, au fur et à mesure des progrès. De plus, les unités les plus performantes éliminent progressivement les autres, et imposent leurs normes, conformément au modèle sélectif. Dans ces conditions, l’avantage n’est d’ailleurs pas toujours aux découvertes récentes, même si elles sont plus performantes dans l’absolu. Car le nouveau produit ou procédé nécessite souvent un investissement supplémentaire, ainsi qu’une formation du personnel pour être rentable. Un industriel peut dès lors choisir, de manière tout à fait rationnelle, de ne pas renouveler les conditions de production systématiquement au moment où des nouveautés surviennent, à cause du coût d’une telle mutation, surtout dans les domaines qui changent très rapidement. D’un autre côté, il reste important pour les entreprises de ne pas se faire distancer par la concurrence, ou de manquer une révolution technique qui pourrait conduire à la faillite à court terme. On rejoint ici le problème des conflits sélectifs entre niveaux d’intégration. Par exemple, de nombreuses espèces animales “choisissent” d’être moins prolifiques mais de s’occuper des petits afin d’augmenter leur chance d’arriver à l’âge adulte, les entreprises peuvent adopter différentes stratégies favorisant plutôt l’innovation au détriment de la rentabilité à court terme. Mais cela peut avoir des conséquences considérables, en orientant la recherche dans des voies cloisonnées. Ainsi, parce qu’il utilisait des virus dangereux, Paul Berg a inauguré le génie génétique dans un contexte de menace et de danger qui a pesé lourd dans l’histoire de la discipline, et continue à influencer ses développements actuels.

La compétition s’applique ainsi non seulement au niveau du laboratoire ou de l’unité de production, mais aussi entre firmes industrielles voire entre les groupes d’entreprises (holdings américains, Konzerne allemands, zaibatsus japonais, etc.). Le modèle évolutionniste est d’ailleurs de plus en plus utilisé par les économistes contemporains, dans le droit fil des idées de Schumpeter<sup>26</sup>.

#### LE FLEUVE DES IDÉES

L’histoire des techniques se présente désormais sous une nouvelle apparence. Il est désormais possible de se représenter la dynamique culturelle sous la forme d’une rivière, où chaque innovation serait représentée sous la forme d’une goutte d’eau, tandis que les accidents du relief incarneraient la résultante des multiples pressions sélectives canalisant leur cours. Une telle représentation s’inspire directement des travaux du mathématicien Sewall Wright, qui imaginait déjà dans les années 1930 un espace théorique pour l’évolution des populations génétiques.

<sup>26</sup> Rodolphe Durand, *L’entreprise, moteur de l’évolution économique*, Sciences humaines, août–septembre 2001, n° 119, pp. 34–36.

La diversité des techniques offre d'abord l'image de voies ramifiées et des carrefours pluriels, avec des échanges «en mosaïque». De tels chenaux anastomosés, pour utiliser l'expression des géographes spécialistes du tracé des cours d'eau, n'empêchent pas que la rivière suit globalement le sens de la pente, qui représente surtout l'efficacité des techniques et leur rentabilité concrète. Si la pente est forte, le cours d'eau restera globalement uni, car le plus court chemin s'impose facilement. Mais dans les plaines où la pente est trop faible – parce qu'il y a trop peu de découvertes –, la rivière se divise en bras qui peuvent être nombreux. A tout moment d'ailleurs, certaines inflexions du terrain – c'est-à-dire du contexte méthodologique et théorique – peuvent conduire à des divergences. De plus, certains barrages artificiels – comme des blocages extrascientifiques de type économiques, politiques ou idéologiques – peuvent réorienter le cours global vers d'autres domaines. Le lyssenkisme serait ainsi figuré par un barrage retenant les eaux stagnantes d'une génétique faussée, retenues par de puissantes barrières politiques et sociales. Car ce qui retient le courant des techniques s'apparente à des pressions de nature sélective, plutôt qu'à des contraintes déterministes et intangibles. Dans certains cas – de violents séismes par exemple –, il arrive que même les plus solides barrages soient rompus...

Une autre caractéristique du cours d'une rivière apparaît avec la coalescence des cours d'eau et le grossissement de ce qui devient un fleuve, dont la puissance creuse profondément le lit et modifie finalement le milieu. Cet aspect reste-t-il concordant avec l'évolution biologique et celle des techniques? Contrairement aux apparences, c'est possible, à condition de comprendre la rivière comme une espèce et les gouttes d'eau non comme des individus, mais comme des gènes, qui seraient dispersés à travers les individus vivant dans des régions distinctes. Ces gènes peuvent se combiner si des individus venant de différentes régions se croisent. C'est ainsi que l'image généalogique fait d'abord apparaître un arbre inversé, avec de multiples branches projetées dans le passé. Le tronc commun émerge seulement lorsque l'on remonte à l'origine des espèces elles-mêmes, comme toute l'eau des rivières du monde provient des nuages. Le grossissement du fleuve pourrait alors traduire l'accumulation des idées, qui se renforcent les unes les autres lorsqu'elles se rejoignent, pour former un ensemble cohérent plus puissant. Une telle image permet de saisir en partie ce qu'ont en commun l'évolution des techniques et l'histoire biologique des espèces.

## CONCLUSION

L'histoire a la fâcheuse tendance de bégayer! L'historien des sciences de l'évolution observe ainsi, avec regret, que les historiens actuels tombent dans le même piège que nombre de naturalistes du XIX<sup>e</sup> siècle, lorsqu'ils avaient confondu

le processus générale de l'hérédité avec l'hérédité de l'acquis. Rodolphe Durand écrit ainsi: «L'économie évolutionniste, et plus particulièrement le courant des ressources a intégré les idées lamarckiennes de modification des ressources et des aptitudes en fonction de l'environnement; le mécanisme de la transmission et de la préservation des caractères acquis est essentiel. En entreprise, la transmission des compétences, des routines, s'effectue de façon lamarckienne, sous la forme de l'apprentissage organisationnel»<sup>27</sup>. Or, le lamarckisme ne se réduit pas à une simple transmission héréditaire, mais sa doctrine exige l'apparition de variations dirigées, c'est-à-dire d'emblée adaptées, et non pas indéfinies, c'est-à-dire aléatoires. Certes, les innovations techniques ne sont pas aléatoires, mais cela est dû au tamis présélectif humain. Alors que les épistémologues répudient l'empirisme (l'esprit humain n'est pas une cire molle, mais part de ses préjugés – eux-mêmes sans doute ancrés sur des formes cognitives *a priori*<sup>28</sup>) et que les psychologues montrent que les enfants (comme les adultes d'ailleurs) apprennent par essais et élimination des erreurs, pourquoi voudrait-on, par quelque nouvel empirisme peu conforme aux connaissances actuelles, que les hommes tirent spontanément leurs innovations de leur environnement? Admettons plutôt que l'apparent lamarckisme s'explique par une sélection multipolaire, laquelle se trouve d'ailleurs être plus concordante avec l'ensemble des sciences biologiques et des sciences humaines contemporaines. La théorie synergique permet de résoudre un grand nombre de questions qui restent inaccessibles sans ce modèle évolutionniste et la sélection multipolaire qu'il implique, et qui pourraient contribuer à l'élaboration d'un grand paradigme unificateur capable, sans doute, de développer la connaissance générale du monde.

#### BIBLIOGRAPHIE

- Denis Buican, *L'affaire Lyssenko enterrée et ressuscitée*, La Pensée et les hommes, 1977a, pp. 12–16.  
 D. Buican, *Mutation et sélection dans le développement de la Science*, xvth International Congress of the History of Science, Edimburg, 10–19 August 1977b.  
 D. Buican, *L'éternel retour de Lyssenko*, Copernic, 1978.  
 D. Buican, *Histoire de la génétique et de l'évolutionnisme en France*, Paris, PUF, 1984.  
 D. Buican, *La Révolution de l'évolution*, Paris, PUF, 1989.  
 D. Buican, *L'explosion biologique. Du néant au Sur-être?*, La Garenne-Colombes, Editions de l'Espace européen, 1991.  
 D. Buican, *Biognoséologie*, Paris, Kimé, 1993.  
 D. Buican, *L'évolution et les théories évolutionnistes*, Paris, Masson, 1997.  
 D. Buican, *L'évolution de l'évolutionnisme: la théorie synergique*, Proceedings of the xxth international Congress of History of Science (Liège, 1997), Turnhout (Belgique), Brepols, 2002, pp. 333–338.  
 Richard Dawkins, *Le gène égoïste*, Paris, Odile Jacob, 1996 (1976).  
 Pierre-Henri Gouyon, *Les harmonies de la nature à l'épreuve de la biologie. Evolution et biodiversité*, INRA Editions, 2001.

<sup>27</sup> *Op. cit.*, p. 36.

<sup>28</sup> Denis Buican, *Biognoséologie*, Paris, Kimé, 1993.



- Cédric Grimoult, *Histoire de l'évolutionnisme contemporain en France (1945–1995)*, Genève-Paris, DROZ, 2000.
- C. Grimoult, *L'évolution biologique en France: Une révolution scientifique, politique et culturelle*, Genève-Paris, DROZ, 2001a.
- C. Grimoult, *Les marxistes contemporains et l'évolutionnisme biologique*, *Communisme*, n° 67–68, 2001b, pp. 139–156.
- C. Grimoult *Histoire de l'histoire des sciences. Historiographie de l'évolutionnisme dans le monde francophone*, Genève-Paris, DROZ, 2002.
- Erwin Herbele-Bors, *Génie génétique. Une histoire, un défi*, Paris, INRA Editions, 2001 (1996).
- Thomas S. Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983 (1962).
- Jacques Monod, *Le hasard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Paris, Seuil, 1970.
- Karl Popper, *La logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot, 1973.
- Karl Popper, *La connaissance objective*, Paris, Aubier, 1991.
- Joseph Aloïs Schumpeter, *Théorie de l'évolution économique*, Paris, Payot, 1935 (1912).
- J.A. Schumpeter, *Capitalisme, socialisme et démocratie*, Payot, 1951 (1942–1946).
- John Ziman (éd.), *Technological Innovation as an Evolutionary Process*, Cambridge University Press, 2000.