

La technique en crise

Gerhard Mensch

« Ce qui est maintenant prouvé n'a d'abord été que le fruit de l'imagination. » (Blake, *Proverbes de l'enfer*.)

STAGNATION signifie retard, ou même croissance négative. A rester immobile, on perd parfois du terrain. La croissance zéro comme les ajustements nécessaires pour passer d'une croissance quantitative à une croissance qualitative posent des problèmes d'organisation, et, faute de pouvoir résoudre ces derniers, le développement économique, prisonnier des limites de sa structure actuelle, sera entravé.

I. LE FLUX ET LE REFLUX DES INNOVATIONS FONDAMENTALES

Dans un article récent consacré à la théorie de la croissance économique, Schlüter interroge ainsi ses confrères : « Notre théorie de la croissance est-elle applicable à l'élaboration des politiques économiques ? » Il répond pour sa part « non » ou « peut-être un peu ». Cette dernière éventualité dépend quant à elle d'une condition très particulière, et rarement satisfaite, à savoir que « l'apparition des progrès techniques [se fasse] de façon de plus en plus continue et [que] le décalage entre invention et innovation se [réduise] ». Nous allons montrer qu'en fait cela n'est pas vrai dans le cas des innovations fondamentales. Le processus d'innovation, ce « tigre du progrès technique » comme l'appelle Paul A. Samuelson, a le mouvement régulier en

horreur. Des périodes riches en innovations fondamentales alternent avec des phases stériles ; ce processus suit un mouvement alternatif et qui s'inverse quand il rencontre une impasse technologique. La figure 1 illustre de telles fluctuations.

Nous montrerons ensuite qu'inventions et innovations ne se suivent pas de façon rapprochée. Il y a des vagues au cours desquelles les innovations émergent en formation serrée. Elles sont pourtant séparées par de longues plages étales où presque rien ne vient animer le processus d'innovation fondamentale. Très peu d'innovations fondamentales ou de changements techniques décisifs sont apparus pendant les vingt années qui séparent 1953 de 1973 ; ce sont les innovations d'amélioration, intervenues dans des marchés déjà bien établis, qui ont prédominé. D'un autre côté, 1935 et les années voisines ont connu une abondante moisson d'innovations fondamentales ; dans les années 30 et 40 se sont ouverts beaucoup de nouveaux secteurs industriels, qui font aujourd'hui vivre des millions d'hommes : notamment les secteurs des synthétiques modernes, de la télévision, des avions à réaction et des ordinateurs. Il n'y a donc aucune illusion à nourrir quant à la prétendue continuité du processus de développement technique.

C'est en réalité le contraire, à savoir la discontinuité, qui se produit. On ne remarque pas, au cours des deux derniers siècles, que le rythme d'émergence d'innovations fondamentales soit devenu plus régulier ou plus continu ; ses fluctuations se sont même accentuées. Le flot chronologique d'innovations fondamentales présente des discontinuités, un flux et un reflux, en quelque sorte. Nous allons maintenant illustrer ces discontinuités à l'aide d'exemples précis, puis nous discuterons la fiabilité du modèle.

Le processus d'innovation fondamentale

Il convient tout d'abord de définir le terme « processus d'innovation » : il désigne l'ensemble des innovations sociales et techniques adoptées par une société donnée. Selon une acception plus restreinte, ce processus est défini qualitativement et quantitativement par la nature et le nombre d'innovations techniques apparues dans une société à des intervalles successifs. Le concept de processus d'innovation est reconnu à la fois par la théorie et par la pratique. Les économistes néoclassiques l'appellent « progrès technique », terme qui recouvre également pour eux l'élargissement des connaissances techniques disponibles et la concrétisation de ce nouveau savoir sous forme de nouveaux produits, matériels productifs et techniques de production mis en œuvre dans le cadre des activités économiques.

Le terme « processus d'innovation » est préférable à celui de « progrès », car il n'est pas toujours justifié de qualifier de « progrès » le changement technique et l'apparition de nouvelles techniques. On appelle par ailleurs « processus de découverte et d'invention scientifiques » (ou « processus d'invention ») l'élargissement du savoir technique de la société, ce concept englobant à la fois la perception des idées et la constitution de nouvelles formes de savoir. Nous appellerons « transfert de connaissances » le couplage processus d'invention-processus d'innovation. La distinction entre processus d'invention, processus d'innovation et transfert de connaissances est importante, car il s'écoule souvent entre l'invention fondamentale et l'innovation fondamentale une période plus longue que la vie de l'inventeur.

Le développement industriel s'est historiquement déroulé comme suit en Occident : découvertes scientifiques applicables et inventions pratiques constituent une réserve de nouvelles possibilités d'investissement qui permettent, à la longue, à l'économie de se dégager d'impasses techniques successives, comme ce fut le cas autour de 1825, 1875 et 1925. Avant chacune de ces

périodes, le processus d'invention avait proposé des solutions techniques nouvelles et plus efficaces dans le domaine des transports et de la métallurgie notamment, solutions dont la mise en œuvre pourrait résoudre les difficultés de l'économie mondiale. C'est aujourd'hui la tâche des spécialistes de l'innovation et des planificateurs que de comprendre ces processus et de les utiliser à bon escient.

On comprendra que des divergences puissent surgir quant à la manière correcte d'aborder l'innovation. Il n'y a même pas d'unanimité en ce qui concerne la définition des vrais problèmes. A-t-on le droit de recourir aux techniques nouvelles comme l'énergie nucléaire, les biotechnologies, etc., afin de créer des emplois nouveaux, ou faut-il – pour des raisons de sécurité, ou pour préserver notre style de vie – restreindre davantage l'innovation industrielle ? Quels sont les risques encourus ? Quels sont les à-côtés ? La promotion d'une innovation industrielle utile n'a-t-elle pas toujours connu pour alternative l'accroissement des investissements publics dans les secteurs de l'armement et de la guerre ?

L'un des handicaps qui affectent la recherche dans le domaine de l'innovation est la difficulté de décrire des concepts nouveaux et peu familiers. Les chercheurs se comparent volontiers, par manière de plaisanterie, aux sept Indiens aveugles qui essayent de décrire chacun un éléphant au repos. L'aveugle qui se tient près de la trompe affirme que l'animal est une sorte de serpent ; celui qui est près de la patte trouve qu'il ressemble plutôt à un arbre ; et celui qui touche l'oreille soutient qu'il s'agit en fait d'un croisement aigle/chauve-souris. L'animal inconnu suscite bien des discussions inutiles : *tot homines, quot sententiae*.

Autre défaut des discussions courantes sur les techniques nouvelles : les chercheurs d'aujourd'hui ne savent pas toujours distinguer entre différentes formes d'innovation, ce qui conduit à d'absurdes malentendus. Seules des définitions plus rigoureuses permettraient de mieux caractériser le processus d'innovation dans les domaines public et privé de la société. Même la différence entre innovation fondamentale et innovation d'amélioration ici exposée, bien que valide, est approximative.

Le présent chapitre n'examinera qu'un aspect du champ total de l'innovation. Il convient, à cette étape, de se limiter à l'apparition des innovations techniques fondamentales, plutôt que d'essayer d'y inclure les innovations dans le domaine social. Par conséquent, nous éliminerons également de la discussion la vaste catégorie des innovations d'amélioration, qui ont pour fonction de rationaliser, rénover ou moderniser les techniques productives existantes. Nous nous occuperons ici de l'instauration de nouvelles formes de technique, et non pas des améliorations accessoires de la qualité de la production, ni de la productivité des inputs en vigueur dans certaines techniques. Nous écarterons aussi les innovations institutionnelles mais non techniques, qui ne forment pas le noyau scientifique de l'activité innovatrice même si, bien sûr, elles accompagnent nécessairement les innovations techniques. Très souvent, les techniques nouvelles ne peuvent être mises en œuvre sans repenser le changement organisationnel, ou sans amender un statut existant. Nous postulons donc que les plus grands progrès scientifiques accomplis dans l'histoire des techniques résident dans un petit nombre d'innovations techniques fondamentales.

Ces événements scientifiques majeurs ont heureusement été abondamment étudiés, de sorte que nous disposons de beaucoup de documents sur lesquels travailler. Si la théorie économique du progrès technique s'est jusqu'à présent révélée sans grand fondement empirique, comme l'affirme J. Kornai dans *Antiequilibrium*³, ce n'est pas faute de données disponibles, mais

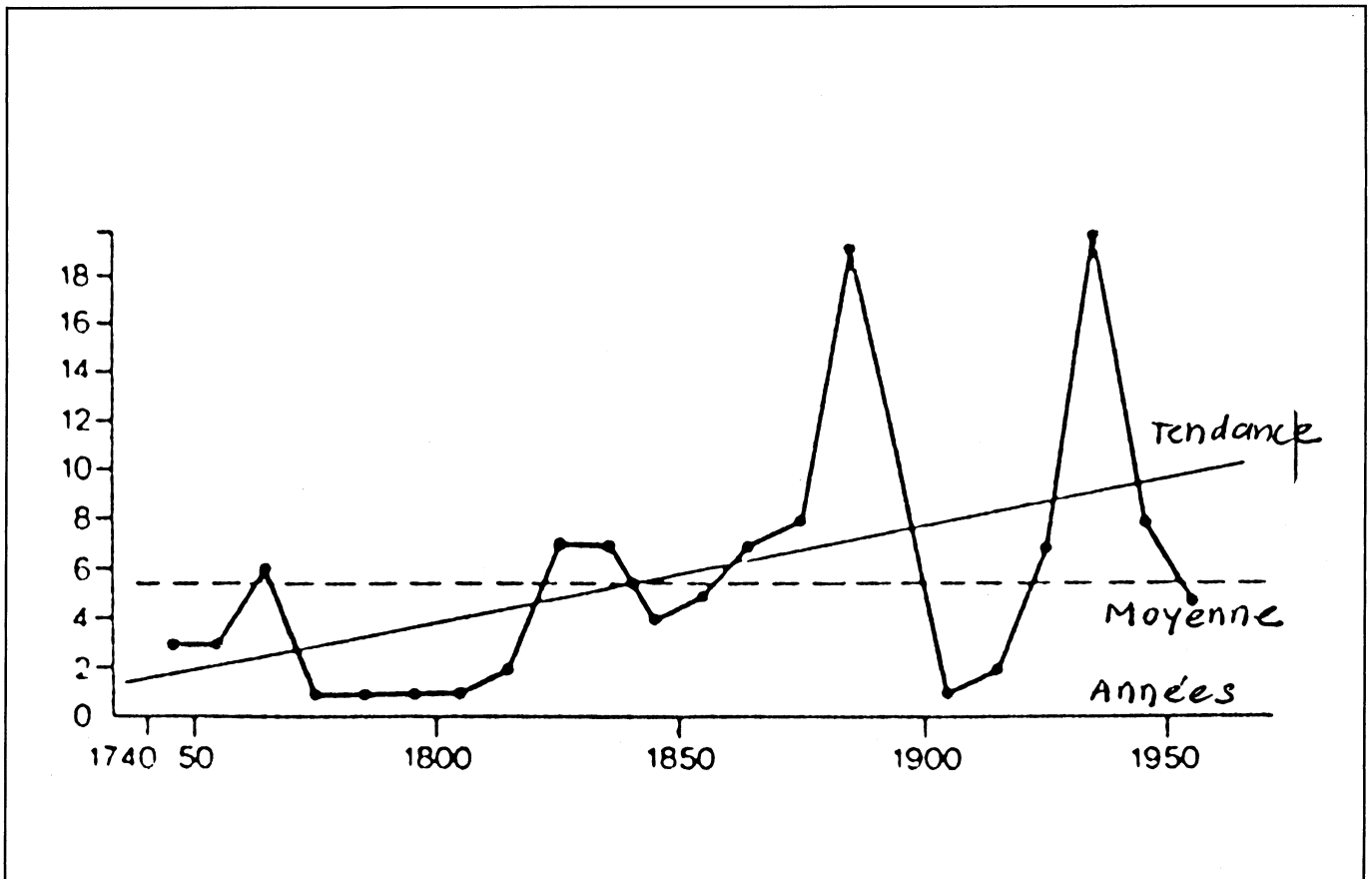


Fig. 1. Les vagues d'innovations fondamentales.

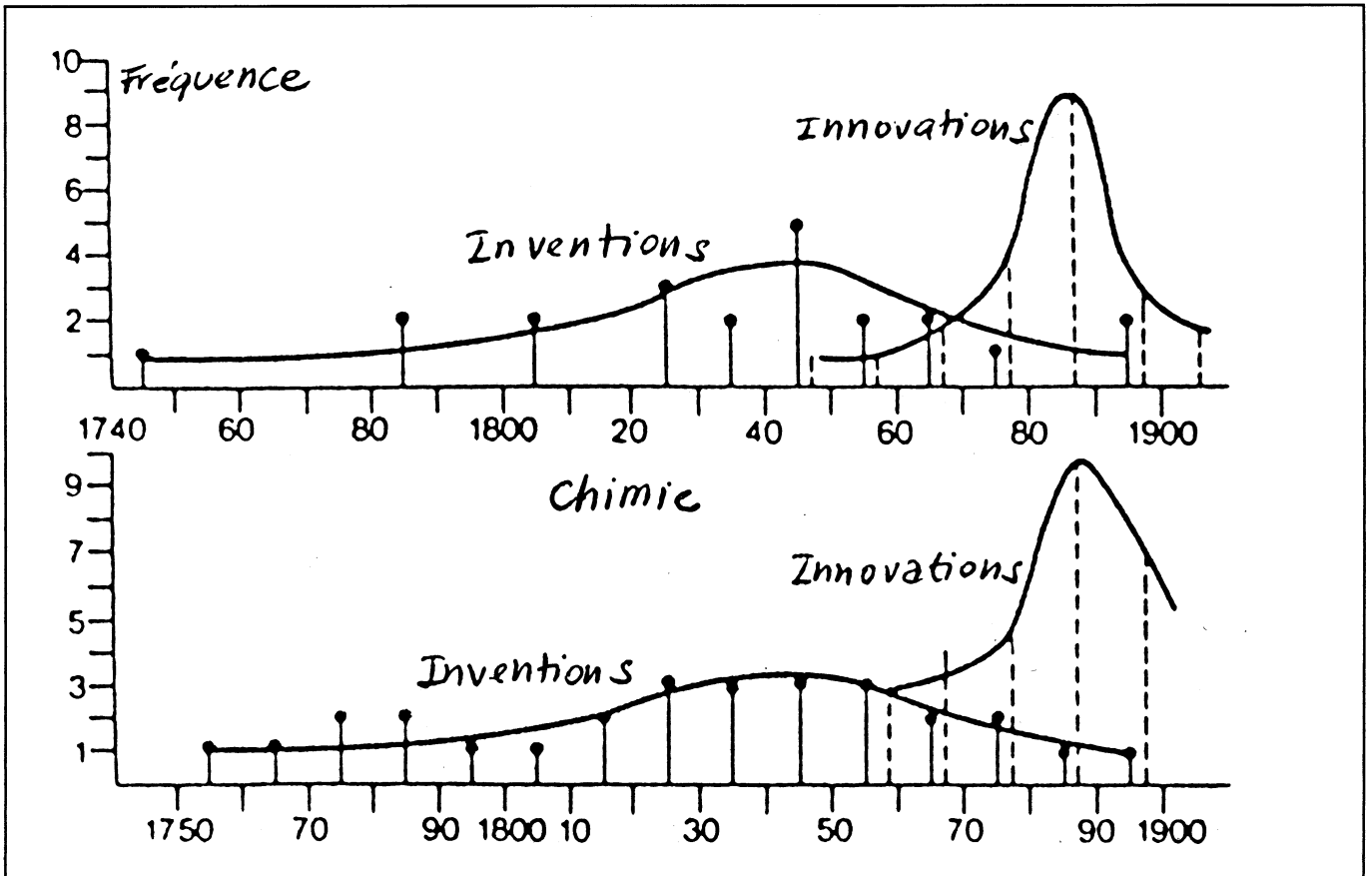


Fig. 2. Fréquence des inventions et innovations fondamentales dans les domaines de la chimie et de l'électrotechnique avant 1900.

parce que *le changement économique représente toujours une terra incognita pour la science économique moderne* (Jacob Schmookler).

L'émergence d'innovations fondamentales

Les innovations fondamentales surgissent de l'arbre de la connaissance propre à notre culture. Ces innovations fondamentales donnent à leur tour naissance à de nouveaux produits et services, qui créeront ensuite de nouveaux marchés, et de nouveaux secteurs industriels capables de les alimenter.

Le passage de la théorie à la pratique consiste, pour le savoir scientifique et technique, à explorer de nouveaux domaines d'activités jusque-là peu connus. Entreprise qui coûte du temps et de l'argent dans la mesure où chaque expérience, qu'elle se solde ou non par un succès, repose sur ces deux investissements. En fait, les efforts des chercheurs n'aboutissent souvent à rien. De toutes les idées engendrées par les nouveaux domaines de la connaissance, bien peu atteignent le stade de faisabilité technique ; et parmi celles qui l'atteignent, plus rares encore sont celles qui trouveront un entrepreneur prêt à les concrétiser économiquement, et surtout un entrepreneur disposé à investir dans l'affaire. En fin de compte, seul un faible pourcentage des projets étudiés et développés aboutit à une réalisation commerciale. Le transfert de connaissances depuis l'invention jusqu'à l'innovation est un processus de sélection, réalisé par des spécialistes, et pendant lequel le flux d'inventions passe à travers des filtres successifs.

Ce processus de sélection à plusieurs niveaux teste l'idée nouvelle en fonction de critères de faisabilité et de hiérarchies de valeurs de plus en plus élevées. Il faut souvent passer par de coûteuses phases de mise au point, parfois menées dans des directions erronées, avant qu'une idée puisse triompher du test suivant, encore plus difficile que le précédent.

Les projets ainsi sélectionnés représentent des innovations potentielles. Nous montrerons que leur apparition dans le temps connaît des fluctuations considérables ; il faudra alors chercher les raisons de ce flux et de ce reflux. Nous exposerons dans cette première partie les origines de nombre d'innovations fondamentales, qui sont pour la plupart apparues par vagues durant des périodes de dépression économique. Nous chercherons dans la deuxième partie à expliquer le relâchement qui suit des époques de forte créativité. Cette étude empirique du processus d'innovation offre quelques enseignements d'importance. Toutefois, les conclusions tirées d'observations expérimentales ne sont valables que dans la mesure où les méthodes de recueil des données l'ont été.

Nous avons, en dernière analyse, rencontré les mêmes problèmes que les auteurs de traces⁴ quand ils se sont demandé « comment sélectionner des formes d'innovation qui soient des exemples représentatifs d'axes de développement historique », ou « comment dater les points de départ et d'arrivée de ces axes historiques ».

Notre équipe a essentiellement adopté la conception des chercheurs de traces : c'est-à-dire que nous avons considéré qu'il fallait, pour répondre à ces questions, émettre un jugement de valeur, ce qui présupposait de connaître les domaines scientifiques et techniques en question. Porter de tels jugements relevait donc de la compétence de scientifiques expérimentés et de spécialistes de ces disciplines.

On peut ainsi énoncer le critère que nous avons adopté pour sélectionner, parmi la multiplicité des événements techniques recensés, ceux qui constituaient des innovations fondamentales : *un événement technique constitue une innovation fon-*

damentale lorsque le matériau qu'on vient de découvrir ou la technique qu'on vient de mettre au point entrent pour la première fois dans le domaine d'une production régulière, ou encore lorsqu'un marché organisé se crée pour un produit nouveau. A titre d'exemple, l'installation en 1860, par F. Bayer, de la première usine de teinture à la fuchsine représente l'innovation fondamentale pour l'industrie de la teinture à l'aniline ; et ce n'est qu'avec l'invention par Héroult du four à cathode, en 1887, que l'électrolyse, opération pourtant déjà bien connue en laboratoire, trouva son application pratique dans l'extraction commerciale de l'aluminium. L'histoire du téléphone illustre, elle aussi, comment ces critères agissent. L'innovation fondamentale n'apparut pas avec l'invention par Bell de l'appareil, mais avec l'ouverture, en 1881 à Berlin, du premier central téléphonique permettant d'établir des connexions à l'intérieur d'un réseau d'abonnés. Ces innovations sont recensées dans les tableaux 1 à 7.

Les vagues d'innovations

On peut maintenant illustrer cette hypothèse de discontinuité à l'aide des données des tableaux 1 à 5, où figure un échantillonnage assez représentatif des innovations fondamentales que l'économie occidentale a connues au cours des deux derniers siècles. Nous avons présenté ces données sous la forme d'une chronologie organisée en périodes successives. Les séries chronologiques du nombre d'innovations fondamentales recensées pendant les vingt-deux décennies qui s'étendent entre 1740 et 1960 sont représentées dans la figure 1. On voit nettement que le nombre d'innovations fondamentales apparaissant à un moment donné fluctue considérablement. Le courant d'innovation est souvent capricieux, et ce flux et ce reflux s'opposent nettement à la théorie selon laquelle les innovations apparaîtraient régulièrement, de façon continue et en quantités uniformes au fil du temps.

Il serait intéressant de savoir comment ce flux variable d'apparition des innovations fondamentales s'inscrit dans le cadre du développement économique à long terme. Mais avant d'examiner cette question, nous voudrions nous prémunir contre d'éventuelles critiques concernant la représentativité de nos données, car les conclusions que nous en tirerons ne seront pas plus fiables que les données elles-mêmes.

Quelle est la fiabilité de nos données ? Nous répondrons à la question en tenant compte de l'exploitation qui est faite de ces données dans les tableaux 1 à 5. Nous cherchons en effet à illustrer notre thèse selon laquelle les innovations fondamentales n'ont jamais suscité qu'un intérêt limité au cours des phases de prospérité du cycle économique ; la tendance à innover est au contraire très marquée pendant les périodes critiques de marasme technique. Le nombre exact de ces innovations n'a qu'une importance secondaire ; il suffira à notre propos de pouvoir démontrer que les quantités d'innovation produites varient énormément au cours du temps.

Pour en revenir à la fiabilité de nos données, nous pourrions toujours tenir pour représentatives celles des tableaux 1 à 5 et continuer à les exploiter, même si d'autres chercheurs travaillant tout à fait indépendamment de nous en dénombraient — comme cela a été le cas — un peu plus ou un peu moins que nous : cf. les tableaux 6 et 7.

Il convient également de signaler ici que nous n'avons découvert le phénomène des vagues d'innovations fondamentales qu'après avoir fini de recueillir les données. Notre recherche était au départ orientée vers un tout autre but que l'étude des discontinuités du processus innovateur. En fait, ce phénomène de regroupement des innovations fondamentales nous a vraiment surpris. Autre surprise : nous avons remarqué qu'une comparaison de nos données avec celles d'autres sources confirmait la fia-

TABLEAU 1

Innovations fondamentales de la première moitié du XIX^e siècle

Nouveau concept	Innovation	Invention	Décalage en années	Rythme de changement
Génératrice à haute tension	1849	1820	29	3,44
Inducteur à impulsion électrique	1846	1831	15	6,66
Câble de grand fond	1866	1847	19	5,26
Production d'électricité	1800	1708	92	1,08
Câblage sous isolant	1820	1744	76	1,31
Lampe à arc	1844	1810	34	2,94
Vélocipède	1839	1818	21	4,76
Rail laminé	1835	1773	62	1,61
Tréfilage	1820	1773	47	2,12
Four à puddler	1824	1783	41	2,43
Haut fourneau à coke	1796	1713	83	1,20
Acier au creuset	1811	1740	71	1,40
Première ligne de chemin de fer en Allemagne	1834			
Locomotive	1824	1769	55	1,81
Télégraphe	1833	1793	40	2,50
Union douanière allemande	1834			
Procédé de la chambre de plomb	1819	1740	79	1,26
Production pharmaceutique	1827	1771	56	1,78
Production de la quinine	1820	1790	30	3,33
Caoutchouc vulcanisé	1852	1832	20	5,00
Ciment de Portland	1824	1756	68	1,47
Chlorate de potassium	1831	1777	54	1,85
Photographie	1838	1727	111	0,90

TABLEAU 2

Innovations électrotechniques fondamentales de la seconde moitié du XIX^e siècle

Nouveau concept	Innovation	Invention	Décalage en années	Rythme de changement
Jaugeage électrodynamique	1846	1745	101	0,99
Batterie en plomb	1859	1780	79	1,26
Dynamo à double induit	1867	1820	47	2,12
Commutateur	1869	1833	36	2,77
Moteur à armature en tambour	1872	1785	87	1,14
Lampe à arc	1873	1802	71	1,40
Ampoule à incandescence	1879	1800	79	1,26
Locomotive électrique	1879	1841	38	2,63
Chauffage électrique	1882	1859	23	4,34
Construction de câbles	1882	1820	62	1,61
Téléphone	1881	1854	27	3,70
Turbine à vapeur	1884	1842	42	2,38
Turbine à eau	1880	1824	56	1,78
Transformateur	1885	1831	54	1,85
Soudure par résistance	1886	1841	45	2,22
Soudure à l'arc	1898	1849	49	2,04
Fusion par induction	1891	1860	31	3,22
Compteurs	1888	1844	44	2,27
Chemin de fer électrique	1895	1879	16	6,25
Liaison téléphonique à grande distance	1910	1893	13	5,88
Isolation haute tension	1910	1897	13	7,69
Moteur à essence	1886	1860	26	3,84

bilité de nos conclusions. Les exemples recensés par d'autres chercheurs montrent tous qu'un nombre inhabituellement élevé d'innovations fondamentales a été enregistré aux alentours des années 1825, 1880 et 1935, tandis que les décennies intermédiaires en avaient connu beaucoup moins.

On trouvera dans les tableaux 6 et 7 une comparaison de nos données avec celles d'autres sources. Si l'on fait la synthèse de tous ces résultats, on établit que le processus d'innovation n'élargit pas continûment l'horizon industriel, mais qu'il ressemble en réalité à un flux et à un reflux de l'activité économique.

L'hypothèse de discontinuité

Reprenons maintenant la question : à savoir, comment les fluctuations de fréquence des innovations fondamentales s'inscrivent-elles dans la dynamique économique d'ensemble que nous pourrions établir à l'aide d'un modèle de métamorphose ? L'alternance entre stagnation et innovation nous autorise à dire que les vagues d'innovations se produisent pendant les périodes où la stagnation est la plus pesante, c'est-à-dire pendant les époques de dépression. Les innovations fondamentales mettent un terme au pessimisme des investisseurs et à leur attentisme. Le marasme technique, la lenteur des mécanismes d'adaptation économique sont balayés par une vague d'innovations qui ouvre de nouveaux horizons au relèvement de l'économie. De sorte que celle-ci peut effectivement se remettre de la crise.

Sur la base des événements clés qui ont marqué le développement des sociétés industrielles occidentales au cours des deux derniers siècles, nous devrions considérer le début d'une période de dépression et celui d'une phase de redressement comme des bornes entre lesquelles peuvent s'engouffrer les vagues d'innovations. Si les innovations fondamentales ont vraiment produit le changement de direction qui mène de la dépression au redressement, il devrait être possible de repérer à quelles périodes de l'histoire économique sont apparues ces vagues d'innovations. D'où

je propose, pour mettre ces dernières en évidence, de retenir les périodes suivantes :

1. Avant 1787
2. Après 1814 et avant 1828
3. Après 1870 et avant 1886
4. Après 1925 et avant 1939
5. Après 1983 et avant 1995

Les pics d'innovations de la figure 1 se trouvent-ils à l'intérieur des intervalles que nous venons de déterminer ? Oui, assurément. L'hypothèse de discontinuité est donc fondée ; la majorité des innovations fondamentales sont survenues quand le contexte socio-économique (à une époque de marasme technique) y invitait. L'apparition d'un nombre important d'innovations au cours des périodes définies est donc très plausible.

Une nette distinction existe cependant entre occurrences plausibles et faits scientifiquement établis ; il convient donc de procéder avec prudence. L'hypothèse de discontinuité entraîne de vastes conséquences, dont nous ne pourrions cependant discuter que si l'hypothèse elle-même résiste aux réfutations. Il faut donc aller plus loin que l'affirmation de simple plausibilité et tester la validité de l'hypothèse.

Les innovations fondamentales apparaissent-elles de façon aléatoire ?

Réfutons un argument d'importance avancé contre l'hypothèse de discontinuité, avant de pouvoir nous fier à elle. On pourrait objecter à la soi-disant régularité de réapparition des vagues d'innovations en niant tout simplement qu'il existe la moindre explication au phénomène. Un tel contre-argument a souvent été utilisé dans la littérature économique, surtout dans celle qui se rapporte aux processus d'évolution et aux cycles à long terme. C'est ce même argument que Weinstock opposa au modèle des cycles de Kondratieff. Les réserves émises par Weinstock quant au concept de vagues à longue période se

basent sur son manque allégué de fondements théoriques : « On n'a pas encore trouvé d'explication plausible au retour uniforme et inévitable des vagues à longue période⁵. » Cependant, mon modèle de métamorphose produit la théorie de l'apparition groupée des innovations fondamentales (mais pas nécessairement en une vague uniforme). Le manque d'explication ne constitue donc pas un argument opposable à l'hypothèse de discontinuité.

Mais ce n'est là qu'une faible défense de notre hypothèse. La défense la plus solide consisterait à réfuter « l'hypothèse minimale ». David Hume enseignait jadis que « rien ne s'ensuit de ce que les choses se suivent », à moins qu'il n'y ait une théorie capable d'expliquer l'apparition de tous les éléments de la séquence. La logique de Hume implique donc que l'absence de théorie doit nous dissuader de tirer des conclusions à l'infini à partir des conséquences d'un événement : car s'il n'existe pas de théorie valide expliquant les récurrences cycliques, cela veut tout simplement dire qu'on peut, et même qu'on doit considérer le flux et le reflux des innovations comme le fruit du hasard. Voilà en quoi consiste précisément l'hypothèse minimale, que nous allons maintenant examiner et réfuter.

D'un autre côté, puisqu'on ne peut jamais – comme Karl Popper l'a montré – prouver une théorie, l'ombre d'un doute demeurerait toutefois, même en présence d'une explication théorique de la récurrence des vagues d'innovations.

L'argument opposé à l'hypothèse de discontinuité affirme que les vagues d'innovations observées ne sont dues qu'au hasard. On peut éprouver cette hypothèse nulle à l'aide de statistiques non paramétriques, c'est-à-dire à l'aide de tests de séquence. C'est ce que nous avons fait à partir des données relatives aux innovations fondamentales⁶.

Nous avons donc calculé combien de fois il faudrait appliquer un mécanisme aléatoire avant d'obtenir une courbe aussi inhabituelle que celle des variations du flux d'innovations. Par analogie, lorsque le mécanisme aléatoire ne produit cette courbe que deux ou trois fois au cours de cent essais, le risque d'erreur lié à l'hypothèse de discontinuité est alors de 2 à 3 %. Afin d'éviter toute erreur due au fait que la courbe de discontinuité pourrait dépendre des divisions temporelles choisies, nous avons également testé les séries chronologiques définies en rassemblant les données par périodes respectives d'une, deux, trois années ou plus. Le regroupement des données en période de dix années produit la courbe de discontinuité de la figure 1. Le tableau 8 indique les probabilités que la courbe particulière des séries chronologiques soit due au hasard (risque d'erreur).

Nous pouvons désormais évaluer les contre-assertions opposées à l'hypothèse de discontinuité sur la base de ces probabilités. Quel que soit le schéma de périodicité, la probabilité que les discontinuités observées soient dues au seul hasard est bien inférieure à 5 %, et fluctue plutôt autour de 2,5 %. Nous pouvons donc rejeter l'hypothèse minimale avec un risque d'erreur proche de 2,5 %, ce qui signifie que l'hypothèse de discontinuité a remarquablement bien subi le test du hasard.

On doit par conséquent considérer comme un fait empirique établie la courbe persistante de sommets et de creux du courant d'innovation. Le degré de signification (presque 97,5 %) est si élevé que la courbe de discontinuité ne perdrait pas sa forme, même si l'on retirait certaines innovations de la liste des données (tableaux 1 à 5), par exemple, ceci pour répondre à certaines critiques portant sur nos données. Le résultat empirique est donc solidement établi.

II. LA PÉNURIE D'INNOVATIONS FONDAMENTALES EST-ELLE DUE À L'INSUFFISANCE DE CRÉATIVITÉ SCIENTIFIQUE ?

Les innovations techniques fondamentales permettent de faire passer les acquis de la science dans la pratique économique. Qu'elles viennent à manquer, et l'économie tendra à stagner. Pourquoi ces innovations sont-elles si rares en période de prospérité ? Est-ce d'avoir été dédaignées par les investisseurs ? Ou bien les scientifiques n'auraient-ils rien inventé d'utilisable ? Formulons autrement la question : les responsables de l'économie peuvent-ils accuser la communauté scientifique de négliger les innovations fondamentales aux époques d'abondance ? Peuvent-ils notamment se disculper de n'avoir pas assez investi dans l'innovation, en arguant du manque d'idées novatrices produites par les scientifiques ? Ce grief, exposé par le directeur d'une société très orientée vers la recherche mais atteinte par la stagnation, est-il fondé ? « Nous ne recevons pas l'ombre d'une idée exploitable. » Y a-t-il vraiment pénurie d'idées neuves et de théories utilisables dans la pratique pendant les périodes de stagnation ?

Nous examinerons au cours de cette partie la question suivante : qui est responsable du manque d'innovations fondamentales ? Nous examinerons l'affirmation des dirigeants de l'économie selon laquelle la faute n'en revient pas à eux-mêmes mais à l'insuffisance passagère de créativité scientifique ; de sorte que l'économie n'a pas été continuellement approvisionnée en innovations exploitables. S'ils avaient raison, ce sont alors les chercheurs, les scientifiques, ainsi que le réseau institutionnel de leur communauté, qui porteraient la responsabilité du marasme technique et de l'engrenage des crises.

Les résultats empiriques présentés au chapitre précédent ont montré que, au cours des 220 années étudiées, les vagues d'innovations fondamentales sont apparues après que l'économie eut sombré dans la crise puis traversé des années de dépression. La représentation graphique de ces fluctuations de l'innovation montre que l'activité innovatrice s'accumule jusqu'au choc de la crise, après quoi elle va rompre tous les barrages. D'où cette conclusion, la seule possible : depuis la révolution industrielle, chaque fois que les secteurs clés de l'économie sont passés d'une croissance forte à une croissance faible, les mécanismes de marché n'ont pu réagir assez vite pour dégager capitaux et main-d'œuvre des secteurs d'investissement, où de nouveaux types de demandes et de techniques offraient des emplois nouveaux. De toute façon, cette réorientation des ressources n'a pas suffi à compenser la stagnation des secteurs traditionnels.

Nous avons vu qu'au contraire, tous les cinquante ans, quand la stagnation s'installait, l'économie réagissait aussitôt en restreignant les dépenses de recherche, développement et expérimentation. Les entreprises se défaisaient de capital et de main-d'œuvre, plutôt que de les réorienter. Au lieu d'investir davantage dans la recherche et le développement, elles économisaient sur les dépenses en matière d'innovation. Ce n'est que lorsque la crise avait atteint le marché des capitaux que les investisseurs reprenaient leurs esprits. Les vagues d'innovations fondamentales sont toujours apparues en même temps que les dépressions, mais après les crises économiques mondiales. De même, le mécanisme du marché des capitaux n'a mis fin au marasme qu'après avoir lui-même été ébranlé, et l'économie de marché n'a offert aux chômeurs des emplois nouveaux et différents qu'après l'intervention du gouvernement.

TABLEAU 3

Innovations fondamentales dans le domaine de la chimie
au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle

Nouveau concept	Innovation	Invention	Décalage en années	Rythme de changement
Acier Thomas	1878	1855	23	4,34
Allumettes de sûreté	1866	1805	61	1,63
Teinture à l'aniline	1860	1771	89	1,12
Matières grasses à usage alimentaire	1882	1811	71	1,26
Synthèse de l'indigo	1897	1880	17	5,88
Carbonate de sodium	1861	1791	70	1,42
Aluminium	1887	1827	60	1,66
Techniques du froid	1895	1873	22	4,54
Rayonne	1890	1857	33	3,03
Chauffage au gaz	1875	1780	95	1,05
Soudure oxyacétylénique	1892	1862	30	3,33
Dynamite	1867	1844	23	4,34
Engrais chimiques	1885	1840	45	2,22
Agents de conservation	1873	1839	44	2,27
Electrolyse	1887	1789	98	1,02
Antitoxine	1894	1877	17	5,88
Chloroforme	1884	1831	53	1,88
Iodoforme (antiseptique)	1880	1822	58	1,72
Véronal (barbiturique)	1882	1863	19	5,26
Aspirine	1898	1853	45	2,22
Phénazone (antalgique de synthèse)	1883	1828	55	1,81
Levure chimique	1856	1764	92	1,08
Moulage au plâtre	1852	1750	102	0,98
Production industrielle de l'acide sulfurique	1875	1819	56	1,78
Alcaloïde de synthèse (cocaïne)	1885	1844	41	2,43
Alcaloïde de synthèse (quinoléine)	1880	1834	46	2,17
Acier de haute teneur	1856	1771	85	1,17

Les innovations, techniques ou sociales, sont des conditions indispensables à la remise à niveau et au démarrage de l'économie. Ce dernier exige avant tout de nouvelles formes d'information, étant admis que main-d'œuvre et capital ne sont pas les facteurs les moins importants. En temps de marasme, l'information technique utile devient une denrée rare : non pas qu'elle manque, mais son marché n'existe pas, ou ne fonctionne pas. Le marché de l'information est imparfait et désordonné. L'ordre implique de l'organisation, et l'organisation un apport d'énergie. Il faut, pour faire progresser l'économie, éliminer ses goulets d'étranglement. C'est là tout le secret des soi-disant mécanismes économiques d'autorégulation. Si l'on n'investit pas dans l'innovation, les forces de stagnation conduisent à la croissance zéro, ou même à la croissance négative. Une économie qui n'est pas régulièrement approvisionnée en innovations s'enlise dans les crises. L'ennui, c'est que les mécanismes du marché des capitaux ne pallient pas toujours de façon satisfaisante l'absence de mécanismes du marché de l'information.

Je maintiens donc que ce n'est pas l'insuffisance, mais la non-circulation d'informations utiles qui freine avant tout la mise en œuvre d'innovations fondamentales. Ce qui fait défaut, c'est la capacité de traiter l'information afin d'améliorer le transfert de connaissances. Le marché de l'information a besoin d'établir ses propres mécanismes. Et si l'économie de marché est sujette aux crises à cause d'un marché de l'information insuffisamment structuré, on peut certainement y remédier par des systèmes correcteurs.

Rejeter le poids de la faute sur les mécanismes du marché des capitaux, voilà qui n'est ni très nouveau, ni très « gauchiste »

TABLEAU 4

Innovations fondamentales dans le domaine de la technologie moderne
au cours de la première moitié du XX^e siècle

Nouveau concept	Invention	Innovation	Décalage en années	Rythme de changement
Commande automatique	1904	1939	35	2,86
Embrayage hydraulique	1904	1937	33	3,03
Crayon à bille	1888	1938	50	2,00
Craquage catalytique du pétrole	1915	1935	20	5,00
Cellophane étanche	1900	1926	26	3,85
Cinérama	1937	1953	16	6,25
Coulée continue	1927	1948	21	4,76
Laminage continu à chaud	1892	1923	31	3,23
Batteur de coton (Campbell)	1920	1942	22	2,38
Batteur de coton (Rust)	1924	1941	17	2,63
Tissus infroissables	1906	1932	26	3,85
Locomotive Diesel	1895	1934	39	2,56
Eclairage fluorescent	1852	1934	82	1,22
Hélicoptère	1904	1936	32	3,13
Insuline	1889	1922	33	3,03
Moteur à réaction	1928	1941	13	7,69
Kodachrome	1910	1935	25	4,00
Enregistrement sur bande magnétique	1898	1937	39	2,56
Plexiglas	1877	1935	58	1,72
Néoprène	1906	1932	26	3,86
Nylon, perlon	1927	1938	11	9,09
Pénicilline	1922	1941	19	5,26
Polyéthylène	1933	1953	20	5,00
Servodirection	1900	1930	30	3,33
Radar	1887	1934	47	2,13
Radio	1887	1922	35	2,86
Fusées	1903	1935	32	3,13
Silicones	1904	1946	42	2,38
Streptomycine	1921	1944	23	4,35
Métier à tisser Sulzer	1928	1945	17	5,88
Détergents de synthèse	1886	1928	42	2,38
Gyrocompas	1827	1909	82	1,22
Polariseur de lumière synthétique	1857	1932	75	1,33
Télévision	1907	1936	29	3,45
Fibre de polyester « Térylène »	1941	1955	14	7,14
Essence antidétonante	1912	1935	23	4,35
Titane	1885	1937	52	1,92
Transistor	1940	1950	10	10,00
Carbure de tungstène	1900	1926	26	3,85
Xérographie	1934	1950	16	6,25
Fermeture à glissière	1891	1923	32	3,13

Sources : G. Mensch, « Zur Dynamik des technischen Fortschritts », *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 41/1971, pp. 295-314. Les données proviennent d'études menées par Jewkes, J. D. Sawers et R. Stillerman, *The Sources of Invention*, première édition, Londres, 1960.

non plus. Karl Marx n'est pas le premier à avoir expliqué la tendance aux crises qui affecte les économies orientées vers le profit par le conflit essentiel entre les rapports de production, solides mais figés, et les forces productives, freinées quoique très prometteuses ; en bref, par les pertes dues aux contradictions du système. La littérature libérale, elle non plus, n'ignore pas les imperfections de l'économie de marché. Dans son célèbre essai sur le bien-être économique et l'attribution de ressources à l'invention, Kenneth Arrow affirme que :

« — une économie de libre entreprise sous-investira (du moins si on la compare avec un système idéal) dans l'invention et la recherche, parce qu'il s'agit de secteurs hasardeux dans la mesure où l'on ne peut vraiment s'en approprier le produit. Ce sous-investissement sera plus prononcé pour la recherche fonda-

mentale que pour la recherche appliquée ;

« — l'aide accordée à l'invention est moindre dans un environnement de monopole que dans un environnement compétitif, mais même dans le second cas elle sera inférieure à ce qui serait souhaitable pour la société ; et l'on se désintéresse des grandes inventions⁷ ».

Le seul problème n'est cependant pas le sous-investissement dont souffrent la recherche, le développement et l'innovation. Il y a près de deux siècles, le philosophe utilitariste Jeremy Bentham soulignait que la recherche du profit détermine de mauvais choix d'investissement dans l'innovation, ce qui peut alors conduire à une crise grave. Dans sa célèbre lettre à Adam Smith « sur les obstacles au progrès de l'activité inventive » (mars 1787), Bentham critique la tendance du marché à « distinguer les projets rentables de ceux qui ne le sont pas, et à favoriser les premiers au détriment des seconds ». Les économistes savent depuis lors que la recherche du profit dans le domaine de l'innovation conduit parfois à des mesures à court terme, imprévoyantes, voire contraires aux besoins à long terme, tandis que les stratégies et décisions prévoyantes sont souvent négligées par les entreprises, au point d'être parfois totalement éliminées. Même les auteurs de droite déplorent cette confusion entre méfiance et prudence que trahissent bien des décisions appliquées sur le marché des capitaux.

Cette contradiction propre au système d'économie de marché n'est pas un secret. Mais, en tant que faiblesse inhérente, elle doit être résolue à la fois parce qu'elle comporte une menace récurrente de crise, et parce qu'il serait insensé d'assister sans réagir à l'effondrement du système.

Une économie en pleine stagnation doit-elle inévitablement passer par une crise structurelle avant de pouvoir produire des innovations fondamentales ? Certes non. On peut concevoir l'irruption de nouvelles formes d'activité dans le champ économique sans l'effondrement périodique des activités anciennes. Ce qui voudrait dire, comme l'implique l'effet Pigou, que les crises n'ont représenté que l'exagération, aussi tragique qu'inutile, des mesures d'adaptation exigées par la situation.

Le laisser-aller mène l'économie à la crise. Une indulgente négligence permet au désordre de s'étendre ; le désordre provient du manque d'organisation et la désorganisation libère les énergies. La débâcle se nourrit d'elle-même, sans besoin d'aide extérieure, comme le veut la loi d'entropie économique. Négliger les innovations fondamentales suffit à conduire au désordre et à la crise. Il est par conséquent très probable que les grandes crises que l'histoire a connues aient été dues à la négligence des responsables économiques, qui ont trop tardé à opposer l'innovation aux forces de stagnation.

Si l'on accuse un groupe donné de négligence, il tentera de rejeter la faute sur un autre groupe. On peut certes concevoir que tous les problèmes économiques viennent de ce qu'on ne disposait pas, au moment critique, de suffisamment de possibilités d'innovation ; et cela parce que les chercheurs n'avaient pas produit suffisamment de projets au moment opportun (*effet d'écho*). Nous examinerons maintenant cette éventualité, afin de déterminer si les années pauvres en innovations fondamentales sont simplement l'écho d'années pauvres en progrès scientifique qui les ont précédées. Ce qui requiert d'établir une corrélation directe entre innovation et invention, corrélation que l'on peut exprimer comme un modèle linéaire de transfert de connaissances.

Existe-t-il un effet d'écho dans le transfert de connaissances ?

Étudions maintenant l'hypothèse de l'effet d'écho. D'un

côté, les avancées du savoir scientifique connaissent-elles vraiment des reflux qui mèneront plus tard — parfois même des décennies plus tard — à des pénuries aiguës de projets d'innovation pendant les époques de marasme technique ? Et de l'autre côté, les vagues de créativité scientifique qui feront suite entraînent-elles beaucoup d'innovations dans leur sillage ?

Ce modèle de transfert de connaissances est linéaire. Il pose en prémisses que les mouvements qui affectent le courant du savoir se retrouvent dans le courant des innovations après un temps de latence relativement constant. Une telle simplicité n'est pas de la naïveté : car s'il rend bien compte de la réalité, un modèle — aussi simple soit-il — permet de tirer les conclusions les plus solides.

Si l'on établit qu'il existe un effet d'écho dans le transfert de connaissances, on ne pourra plus reprocher aux responsables de l'économie de n'avoir pas su prendre les mesures propres à prévenir la crise. En outre, une théorie très répandue dans la littérature économique et politique consacrée aux changements économiques et sociaux se verrait également privée de tout fondement. Cette théorie affirme que les élites au pouvoir rejettent les propositions innovatrices contraires à leurs intérêts, afin de préserver le *statu quo* contre les incursions du changement, ce qui entraîne des déséquilibres entre forces économiques et sociales⁸. De tels déséquilibres s'accumulent jusqu'à l'explosion d'une crise, tout comme un tremblement de terre donne libre cours aux pressions tectoniques ; la violence de l'éruption sociétale ou économique est proportionnelle au degré de congestion, et inversement proportionnelle à la rapidité d'adaptation.

Ainsi, si l'on peut vérifier l'existence d'un effet d'écho à l'aide des données historiques relatives aux inventions et innovations fondamentales (voir la partie ci-dessus), c'est le monde scientifique — à savoir les savants et « les doyens des collèges invisibles » — qui porterait la responsabilité des crises.

En utilisant un modèle linéaire de transfert des connaissances ainsi que les données exposées plus haut, puis en prouvant ou réfutant l'existence d'un effet d'écho, on pourra déterminer quelle fraction de l'élite *ne saurait porter* la responsabilité des crises.

Les vagues d'avancées scientifiques

Existe-t-il un effet d'écho dans le transfert des connaissances ? Peut-on tout simplement relier périodes étales et vagues d'innovations à des périodes étales et à des vagues d'avancées scientifiques qui les auraient précédées ? Il faudra toutefois répondre d'abord à une question fondamentale : le savoir procède-t-il vraiment par vagues ?

On usera avec profit, si l'on veut aborder ces questions de façon opérationnelle, de la conception dualiste du corps et de l'âme. On peut comprendre le transfert de connaissances comme le passage de la théorie à la pratique qui s'effectue à l'intérieur de cet univers à deux faces. L'acquisition du savoir scientifique représenterait donc le processus d'invention dans le royaume de la science et de la recherche fondamentale, alors que le processus d'innovation consisterait à appliquer ce savoir théorique à l'activité économique. « Les biens produits par l'homme sont les fruits de sa culture, l'expression de techniques acquises et de savoir⁹. »

Il convient, pour tester la validité de l'effet d'écho, de décrire en termes quantitatifs le processus de constitution du savoir scientifique. C'est-à-dire, de compter ou d'évaluer certaines réalisations de la société. Là encore, s'il faut mesurer par la méthode de comptage, il paraît raisonnable de s'en tenir aux seules réalisations scientifiques, dans la mesure où c'est sur elles que l'on dispose de plus d'informations. Une telle limitation ne veut

TABLEAU 5

Innovations fondamentales (dans le domaine de l'organisation et de la technique) au cours de l'industrialisation de Brünn, 1740-1800

Nouveau concept	Innovation	Invention	Décalage en années	Rythme de changement
Institutionnalisation du concept mercantiliste de politique de développement	1743	1653	90'	1,11
Etablissement d'une banque de développement	1751	1686	65	1,54
Investissements d'Etat dans l'industrie textile	1762	1701	61	1,63
Mise en place d'installations textiles durables	1764	1715	49	2,04
Concentration dirigée de la main-d'œuvre dans l'industrie textile	1762	1694	68	1,47
Formation technique des ouvriers du textile	1765	1701	64	1,57
Restriction du contrôle des corporations sur l'industrie	1754	1672	82	1,21
Raccordement de Brünn aux grandes routes	1740	1704	36	2,72
Etablissement d'une administration centrale du commerce	1746	1666	80	1,25
Recueil et diffusion de l'informatique économique	1754	1666	88	1,13
Introduction d'un tarif général de protection	1775	1737	38	2,63
Abolition des privilèges de monopole pour les usines textiles	1763	1672	91	1,08
Abandon du dirigisme économique	1785	1747	38	2,63
Etablissement d'un marché pour la production textile locale	1769	1727	42	2,38

Source : H. Freudenberger et G. Mensch, *Von der Provinzstadt zur Industrieregion (Brünnstudie) ; Ein Beitrag zur Politökonomie der Sozialinnovation, dargestellt am Innovationsschub der industriellen Revolution im Raume Brünn*, Göttingen, 1975.

TABLEAU 6

L'augmentation du nombre d'innovations fondamentales vers 1885 selon des sources différentes

Période	Fréquence d'innovations fondamentales			
	par périodes de 5 ans		par périodes de 10 ans	
	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2
1865-1869	4	6	4	6
1870-1874	3	5	8	10
1875-1879	5	5		
1880-1884	11	14	19	18
1885-1889	8	4		
1890-1894	4	9		
1895-1899	6	3	10	12
1900-1904	0	1		
1905-1909	1	0	1	1
1910-1914	2	3	2	3

Source 1 : tableaux 2 et 3 *supra*.

Source 2 : tous les progrès significatifs survenus dans l'histoire des techniques que Schumpeter a mentionnés dans *Konjunkturzyklen I und II*, Göttingen, 1961.

TABLEAU 7

L'augmentation du nombre d'innovations fondamentales vers 1935 selon des sources différentes

Période	Fréquence d'innovations fondamentales		
	Source 1	Source 2	Source 3
1900-1904	0	18	—
1905-1909	0	16	—
1910-1914	0	29	—
1915-1919	0	34	2
1920-1924	4	29	
1925-1929	3	34	4
1930-1934	7	43	
1935-1939	13	48	8
1940-1944	5	38	
1945-1949	3	23	3
1950-1954	4	20	
1955-1959	1	0	3

Sources : tableau 4. Diverses données (comprenant à la fois des innovations fondamentales et des innovations d'amélioration) ont été empruntées à J. Schmookler, *Invention and Economic Growth*, Cambridge, 1966, pp. 220-222 ; la présentation qu'en fait Schmookler ne permet pas de trier les innovations fondamentales. On a retenu toutes les innovations radicales nécessitant une période de développement de quinze ans ou plus, telles qu'elles figurent dans le recueil d'E. Ulrich et M. Lahner, *Analyse von Entwicklungsphasen technischer Neuerungen, Mitteilungen des Instituts für Arbeitsmarkt und Berufsforschung*, Erlangen, février 1969.

TABLEAU 8

Test du caractère aléatoire de la courbe de discontinuité observée pour les séries chronologiques d'innovations fondamentales entre 1740 et 1960 : résultats

Différents schémas de périodicité		Probabilité que la courbe de discontinuité des séries chronologiques soit due au hasard
Durée des séries chronologiques	Nombre des périodes	
1 an	220	0,0179
2 ans	110	0,0351
3 ans	73	0,0091
4 ans	55	0,0294
5 ans	44	0,0344
6 ans	36	0,025 (-)
7 ans	31	0,025 (+)
8 ans	27	0,025 (-)
9 ans	24	0,025 (-)
10 ans	22	0,024 (+)

Les séries chronologiques comportant plus de 40 périodes sont dites « séries longues », et l'on peut calculer avec précision leur probabilité. Il existe des tables de calcul pour les « séries courtes », permettant de déterminer si leur « degré de signification » est inférieur à 0,025 (-), ou s'il est supérieur à 0,025 (+) mais inférieur à 0,05.

Source : S. Siegel, *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*, New York, 1956, p. 252.

pas dire qu'on se désintéresse des lettres ni des arts ni, par exemple, des réalisations sociologiques. Mais le volume de ces dernières semble fluctuer parallèlement à celui des réalisations scientifiques, puisque ces deux types de phénomènes se développent selon l'intensité de l'activité culturelle de chaque époque. Nous n'envisagerons pas directement non plus les événements qui se déroulent sur le « plan archéologique du savoir », défini par Michel Foucault comme « un plan situé au-delà de la conscience du savant mais qui forme toutefois un aspect également important de sa pratique scientifique¹⁰ ». Les activités qui se déroulent aux différents niveaux culturels d'une période donnée sont liées entre elles et, tandis que le processus de constitution du savoir scientifique passe du plan archéologique vers le plan épistémologique, il trouve son expression dans certains postulats fondamentaux et dans une certaine terminologie scientifique. Comme l'a écrit Emerson dans son essai sur l'indépendance, « les arts et les inventions ne sont que le vêtement de leur époque ».

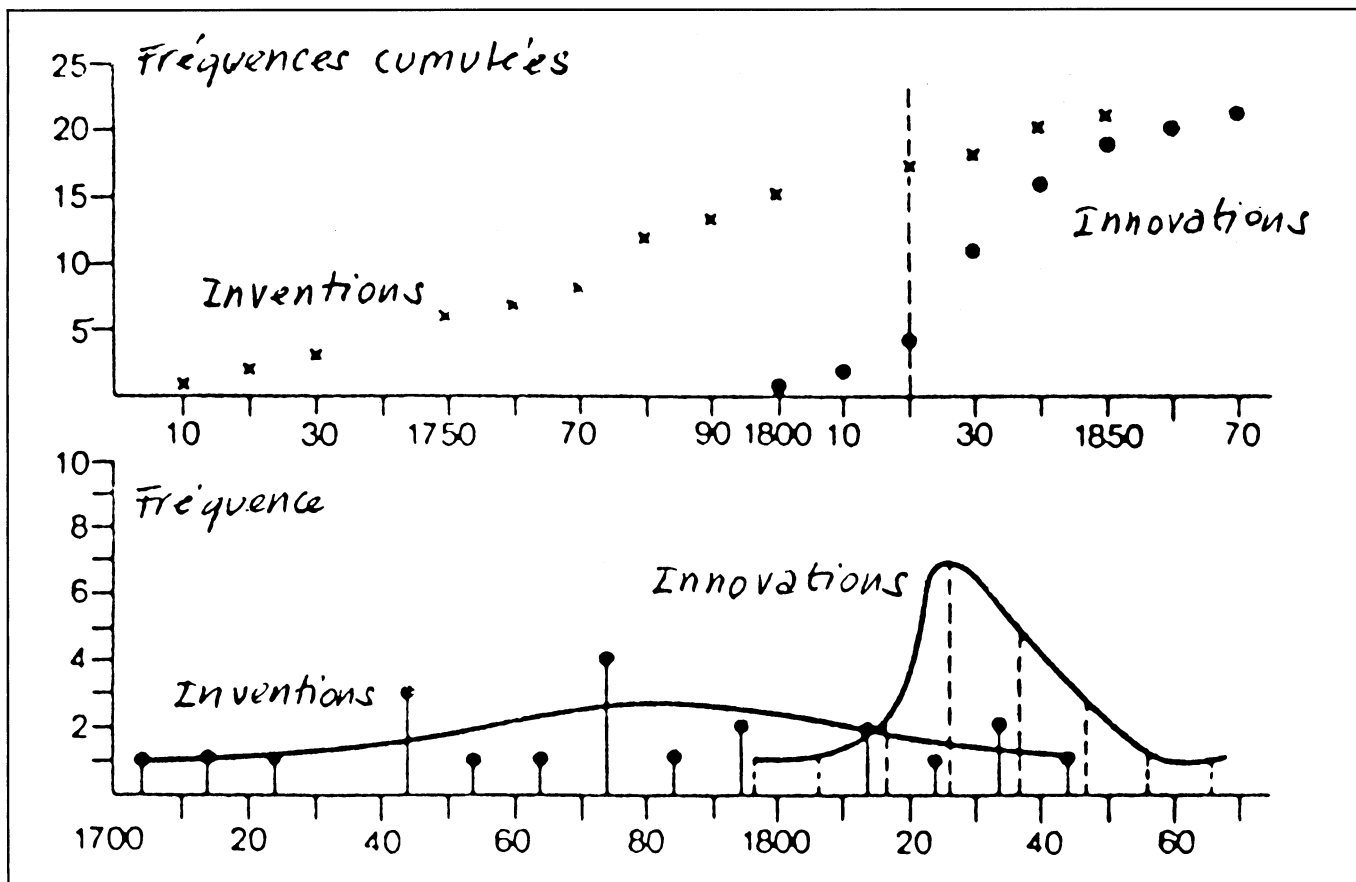


Fig. 3. Inventions et innovations fondamentales (première moitié du XIX^e siècle).

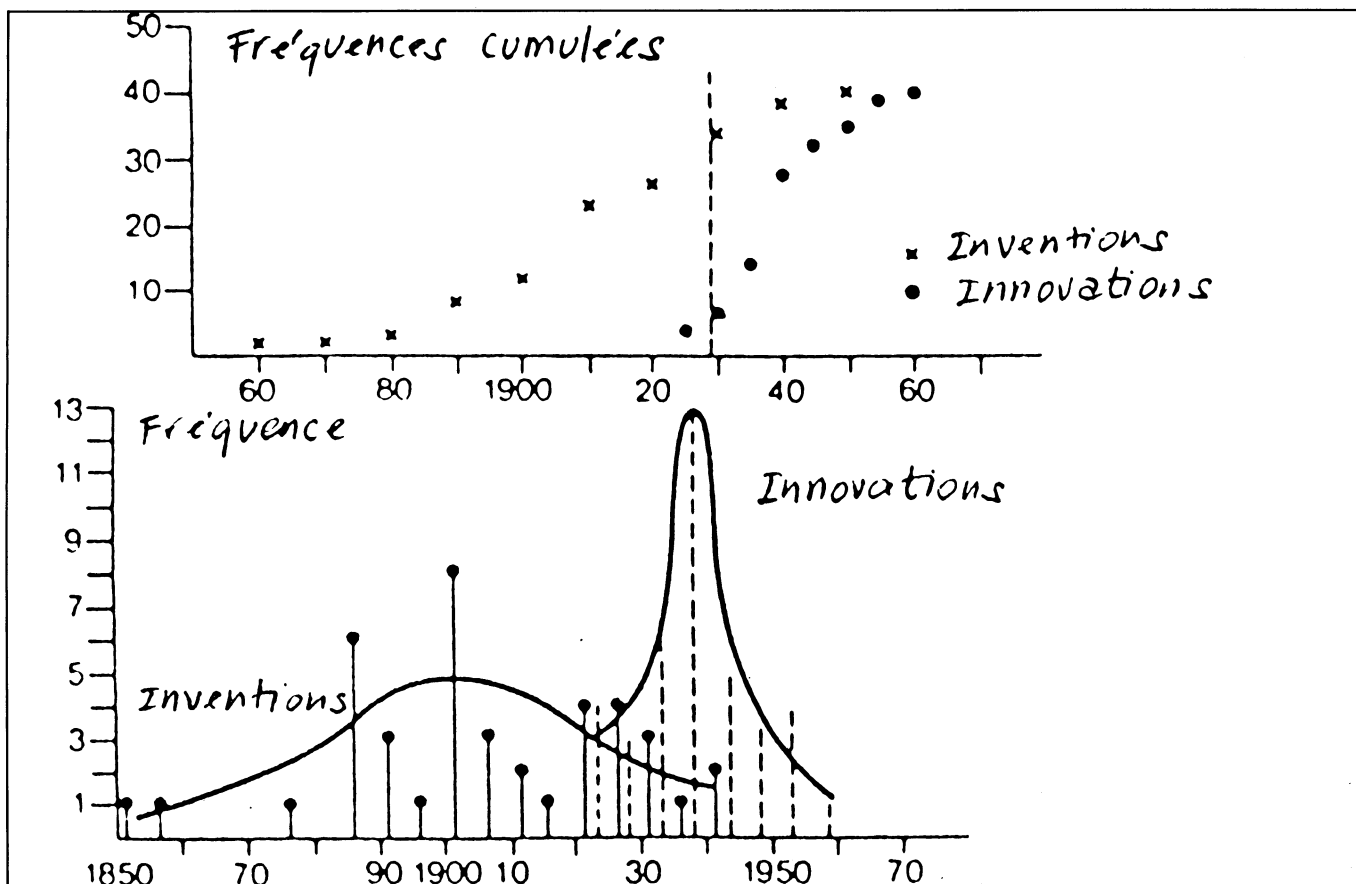


Fig. 4. Inventions et innovations fondamentales (première moitié du XX^e siècle).

Ainsi, même en limitant notre étude aux avancées scientifiques, nous engloberons indirectement les événements extérieurs au royaume de la science mais qui influent en retour sur la constitution du savoir scientifique. Événements scientifiques et culturels sont étroitement liés : « Ce sont toujours les esprits créateurs qui façonnent l'Histoire, ces esprits qui possèdent en eux un monde différent de celui dans lequel ils sont nés », écrit Heinz Ohff dans son hommage à Picasso. De même que les innovations techniques fondamentales s'accompagnent d'une multitude de changements non techniques du *modus operandi*, de même les événements scientifiques s'accompagnent d'une multitude d'expériences d'apprentissage et de « désapprentissage ». Le problème consiste donc à trouver un sous-ensemble dénombrable qui soit approximativement représentatif de tout l'ensemble des événements. Ce sous-ensemble sera en l'occurrence notre liste d'innovations fondamentales.

Reprenons donc la question : le champ épistémologique du savoir scientifique connaît-il des périodes stériles ou fertiles, et ce savoir procède-t-il par vagues que l'on peut observer ? Pour les historiens des sciences, il s'agit là d'un sujet très controversé qui a longtemps occupé leur discipline. Les « uniformitaristes », qui croient en l'expansion continue et cumulative du savoir, tendent à répondre négativement, tandis que les « catastrophistes » répondent affirmativement¹¹. Aux yeux de ces derniers, les opinions scientifiques qui régnaient sans partage perdent tout crédit dès qu'elles sont contredites par les faits. Si, dans ces conditions, un savant élabore alors une théorie plus satisfaisante, les catastrophistes pensent que le corpus entier du savoir doit faire l'objet d'un réexamen, qu'il faut abandonner certains de ses fondements et en réviser radicalement d'autres¹². Les savants considèrent généralement la nécessité de rejeter les vieilles théories et la lourde tâche de réviser leurs manuels comme une révolution dans leur discipline¹³, révolution fort susceptible de produire une vague d'innovations fondamentales dans son sillage.

Comment peut-on voir dans ces discontinuités des périodes stériles ou fertiles pour certains champs épistémologiques ? Procéder de façon concrète, voilà le préalable à toute étude empirique, y compris cette incursion dans le domaine jusqu'à présent négligé du transfert de connaissances. Des générations successives d'arbres du savoir plongent leurs racines dans le champ épistémologique. Chaque génération connaît des variations distinctives ; l'esprit de chaque époque (*Zeitgeist*) donne aux inventions fondamentales un caractère très reconnaissable, qualité toute particulière qu'on peut percevoir dès les premières inventions de l'époque nouvelle. Voilà qui est décisif : ces inventions nouvelles inaugurent de nouvelles normes de qualité pour la théorie (pouvoir explicatif) comme pour la pratique (performance technique).

Ainsi, les premiers fruits d'une nouvelle récolte de l'arbre du savoir sèment la confusion dans les cercles érudits et soulèvent, par leur nouveauté, des débats houleux. Certains savants reconnaissent au premier coup d'œil le pouvoir des nouveaux principes, alors que d'autres n'y voient rien de plus que les condisciples de Galilée regardant dans sa lunette, c'est-à-dire : rien. La nouvelle théorie, objet de controverse, est un paradigme en puissance. L'intensité de la controverse est proportionnelle à l'insatisfaction que procure aux savants l'écart entre les faits connus et la structure théorique dominante. Lorsque théorie et réalité divergent trop, toute nouvelle théorie suscite un émoi considérable parmi la communauté scientifique. Thomas Kuhn caractérise ce processus de révolution scientifique comme étant la substitution d'un nouveau paradigme au paradigme dominant¹⁴.

Nous appelons « paradigme » une théorie particulièrement féconde. Kuhn caractérise ainsi sa fonction principale : un paradigme invite les savants à n'envisager qu'une partie du flot ininterrompu de problèmes comme thème de recherche possible ; il établit des priorités. En outre, les problèmes sur lesquels les savants décident de travailler une fois qu'ils ont accepté une théorie particulière, ces problèmes lancent de nouveaux défis à l'invention scientifique. Des questions nouvelles se dessinent, et des solutions aussi nouvelles que surprenantes jaillissent du paradigme. Ces avancées scientifiques sont le produit d'un champ épistémologique donné ; elles apportent une information précieuse et des inventions fondamentales qu'on peut faire passer de la théorie à la pratique. Nous devrions par conséquent, en examinant les données relatives aux innovations fondamentales (cf. tableaux 1 à 5), pouvoir observer des révolutions scientifiques qui aboutissent à un jaillissement d'innovations fondamentales.

Afin de mieux cerner le concept d'invention fondamentale, reprenons la distinction établie par Schmookler entre sous-invention et invention, en commençant par préciser l'acception courante de ces termes. Une sous-invention est une amélioration du produit, ou de processus de production, qui provoque peu d'étonnement dans son domaine parce que chacun aurait pu la trouver soi-même. Une invention, en revanche, est une formule de nouveau produit ou processus qui stupéfie même les spécialistes de la question¹⁵. De plus, une invention fondamentale est plus profondément enracinée dans le monde de la découverte scientifique ; elle comporte un solide élément théorique, et donne souvent naissance à plusieurs inventions et à beaucoup de sous-inventions.

On peut maintenant facilement concevoir que le taux d'apparition des intuitions scientifiques à l'intérieur d'un champ particulier n'est jamais constant. Au contraire, comme tout processus évolutif, il est soumis à la dynamique de la création, de la croissance et du déclin. Ce processus organique de déploiement et de maturation crée ainsi des vagues d'inventions fondamentales ; il commence lentement car, lorsqu'il apparaît une théorie nouvelle qui affirme proposer une meilleure explication de faits pertinents, les savants ne peuvent encore voir toute l'étendue des problèmes qu'elle va soulever. Ces derniers ne seront reconnus, puis résolus, que progressivement. Quand un ensemble de circonstances apparaît comme un problème soluble, ou comme le fondement de la solution d'un problème principal, on l'appelle invention fondamentale.

Tant que les inventions fondamentales résultent d'un savoir qui en est encore à ses débuts, elles émergent en petit nombre. Ce nombre augmente au fil des ans, car de plus en plus de savants tiennent le nouveau paradigme pour correct et se guident donc sur lui pour sélectionner les problèmes à étudier. Le succès les récompense, puisqu'ils travaillent sur la base d'un meilleur paradigme. Ainsi le processus se renforce lui-même, et produit finalement des vagues d'inventions fondamentales.

Au fur et à mesure qu'on résout les nombreux problèmes contenus dans un cadre théorique donné — problèmes initiaux ou problèmes découlant des premiers — le nombre des intuitions nouvelles qui apparaissent dans ce domaine diminue graduellement. Il peut même devenir nul si ce domaine problématique a été exhaustivement étudié, ou bien si la curiosité scientifique a été attirée dans une autre direction et suit désormais les paramètres d'un autre paradigme, laissant stérile le premier champ épistémologique.

Le nombre des inventions fondamentales varie au fil des ans, selon que les champs épistémologiques qui s'étendent aux limites du savoir demeurent fertiles et productifs ou bien —

comme c'est aujourd'hui le cas pour la pharmacologie — épuisés. Il est donc concevable que les savants se trouvent périodiquement dans l'incapacité d'imaginer des solutions pratiques à d'importants problèmes pratiques. Aussi les vagues d'inventions fondamentales peuvent-elles alterner avec des périodes pendant lesquelles seules quelques inventions fondamentales surgissent d'un champ épistémologique donné. On connaît en fait bien des exemples contemporains d'épuisement momentané du champ épistémologique, comme le montre la crise de la physique moderne. Certains responsables vont même jusqu'à reconnaître que nombre de projets de recherche en cours sont peu prometteurs.

Le passé offre d'excellents exemples des aspects dynamiques du processus d'invention. Nous choisirons les champs de la chimie et de l'électrophysique pour suivre le transfert de connaissances depuis la révolution scientifique jusqu'au foisonnement d'applications industrielles qui en dérive. Le processus commence avec l'introduction d'une nouvelle théorie, qui devient rapidement un paradigme pour développer la recherche, et qui entraîne la multiplication des travaux et des découvertes. Comme l'écrit T. Kuhn :

« Ce que Lavoisier expose dans ses écrits de 1777 n'est pas tant la découverte de l'oxygène que la théorie de la combustion de l'oxygène. Cette théorie constitue la clé de voûte d'une reformulation de la chimie, reformulation si décisive qu'on l'appelle généralement la révolution chimique¹⁶. »

« La découverte de la bouteille de Leyde comporte toutes ces caractéristiques, ainsi que celles que nous avons observées auparavant. Il n'existait, avant son apparition, pas de paradigme pour la recherche en électricité. Bien plus, plusieurs théories, toutes dérivées de phénomènes relativement accessibles, se trouvaient en compétition. Aucune d'elles n'était capable d'ordonner l'entière variété des phénomènes électriques, échec qui se trouve à la source de quelques anomalies qui ont permis la découverte de la bouteille de Leyde¹⁷. »

« Ces [deux] exemples récents montrent que les paradigmes offrent aux savants non seulement une carte, mais aussi des instructions indispensables au tracé d'une carte. Lorsqu'il apprend un paradigme, le savant acquiert à la fois une théorie, des méthodes et des normes généralement indissolublement liées. C'est pourquoi, quand le paradigme vient à changer, on assiste au bouleversement des critères qui déterminent la légitimité non seulement des problèmes, mais aussi des solutions qui leur sont proposées¹⁸. »

Ces deux événements ont été suivis d'une prodigieuse quantité de découvertes scientifiques. Après les révolutions chimique et électrophysique et la percée sensationnelle que représentait la formulation d'une théorie vraiment exploitable, chimistes et électrophysiciens purent continuellement développer de nouvelles définitions de problèmes, et proposer des solutions (les inventions fondamentales) qui étaient le résultat direct de ces révolutions scientifiques.

Poursuivons la description du transfert de connaissances dans le champ de la chimie et de l'électrophysique. Les tableaux recensent les dates des inventions et des innovations fondamentales. Ces dates signalent, respectivement, le début et le produit final du transfert de connaissances. Elles associent des événements par paire : le plus ancien appartient au courant d'inventions fondamentales, et le plus récent au flot d'innovations fondamentales.

Les processus d'invention fondamentale en électrophysique et en chimie sont représentés figure 2. Il s'agit d'une série chronologique recensant le nombre d'inventions fondamentales

par décennie, selon les données des tableaux 2 et 3 de la partie précédente.

Les séries chronologiques de la figure 2 révèlent :

1. De fortes vagues d'innovations fondamentales dans les industries électrotechnique et chimique ; comparées aux décennies voisines, les années 80 connaissent un haut niveau, nettement reconnaissable, d'activité innovatrice.

2. La distribution des fréquences des inventions fondamentales donnant lieu à des innovations fondamentales en électrophysique et en chimie s'étend sur une très longue période ; plus de cent ans se sont écoulés entre la première formulation d'une théorie paradigmatique et l'application commerciale de ce savoir à la pratique industrielle.

3. Ces distributions de fréquences montrent les fluctuations de l'émergence des inventions scientifiques fondamentales en électrophysique et en chimie ; avec un peu d'imagination, on distingue un pic d'inventions aux alentours de 1840, mais on peut aisément, pour peu qu'on soit sceptique, contester cette lecture.

La figure 2 donne l'impression que périodes étales et vagues se succèdent réellement au cours du processus d'invention, mais qu'elles n'alternent pas aussi clairement que les discontinuités du processus d'innovation : impression qui va se renforçant au fur et à mesure que l'on examine davantage de données.

Considérons d'abord les inventions fondamentales qui ont donné naissance au groupe d'innovations fondamentales des débuts de l'ère industrielle, aux alentours de 1825. Les chronologies correspondantes (tableau 1) sont représentées figure 3 (bas). Un sentiment plus net des fluctuations du courant d'inventions fondamentales se dégage des données de la figure 3, davantage en tout cas que celles de la figure 2. On peut toutefois se demander si ce sont vraiment là des périodes étales et des vagues d'inventions fondamentales.

Voyons maintenant les inventions fondamentales qui ont donné lieu aux innovations fondamentales de la première moitié du XX^e siècle. Les chronologies correspondantes (tableau 7) sont représentées figure 4 (bas). Ces distributions de fréquences renforcent l'impression que le courant d'inventions fondamentales a connu d'imposantes vagues, qui ont par la suite pu susciter la vague d'innovations fondamentales des années 35. Il n'est cependant pas facile de déterminer si le courant d'inventions fondamentales a vraiment connu des périodes étales, qui se seraient ensuite traduites, pendant les années de marasme technique qui ont précédé la crise économique mondiale de 1929, par la rareté des innovations fondamentales. Comme l'impression visuelle peut varier d'un observateur à l'autre, le seul examen des graphiques ci-dessus ne permet pas de conclure unilatéralement ni qu'un effet d'écho existe vraiment, ni qu'il n'est pas manifeste ici. Il convient donc d'étudier méthodiquement le courant d'inventions fondamentales.

La recherche des effets d'écho

Etant donné que l'existence de flux et de reflux dans le courant d'inventions fondamentales est incontestable, et qu'ainsi les responsables de l'économie ne sont peut-être pas responsables de la pénurie occasionnelle d'innovations fondamentales, il faut maintenant examiner s'il existe un effet d'écho dans le processus du transfert de connaissances. La réponse sera négative si l'on ne peut établir de similitude entre le courant d'inventions fondamentales et le courant d'innovations fondamentales. Par « similitude », nous entendons que l'ensemble des séries chronologiques d'inventions fondamentales doit produire une courbe de fluctuation qui, compte tenu du décalage dans le temps, corresponde à la courbe de discontinuité du processus d'innovation, tant pour

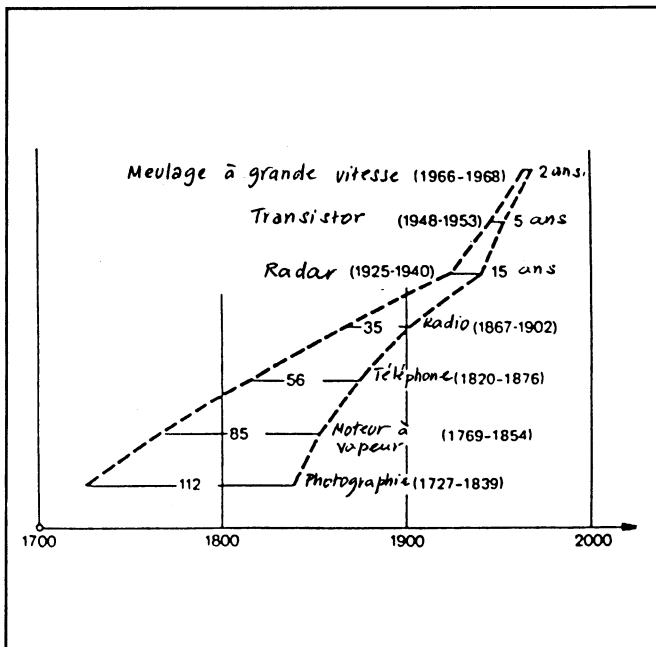


Fig. 5. L'accélération dans l'histoire.

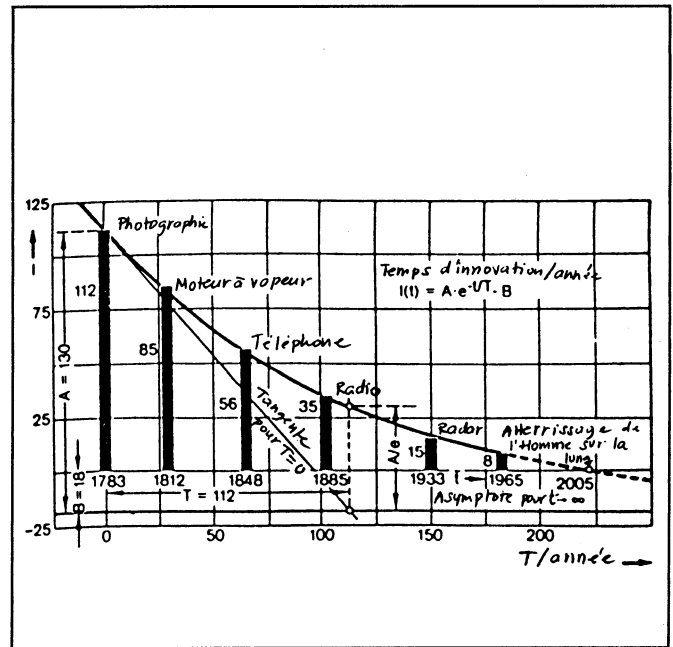


Fig. 6. L'accélération dans l'histoire.

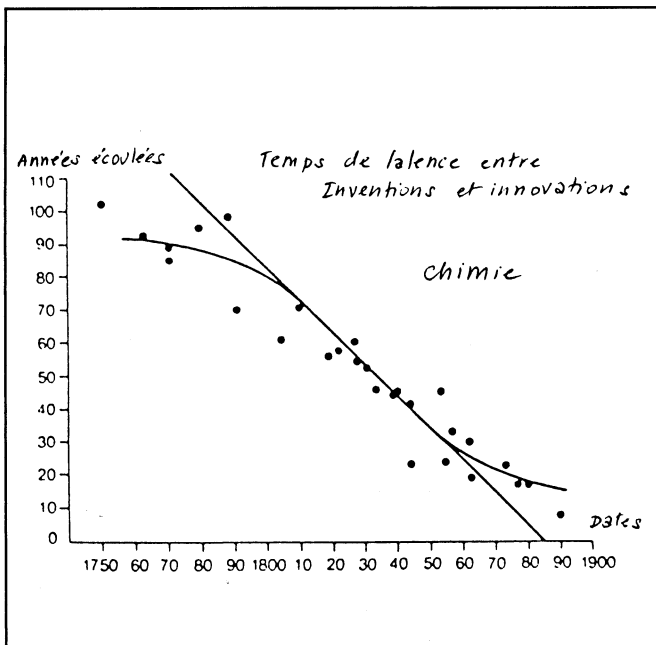


Fig. 7. Temps de latence séparant les inventions fondamentales dans le domaine de la chimie des innovations fondamentales dans l'industrie chimique (seconde moitié du XIXe siècle).

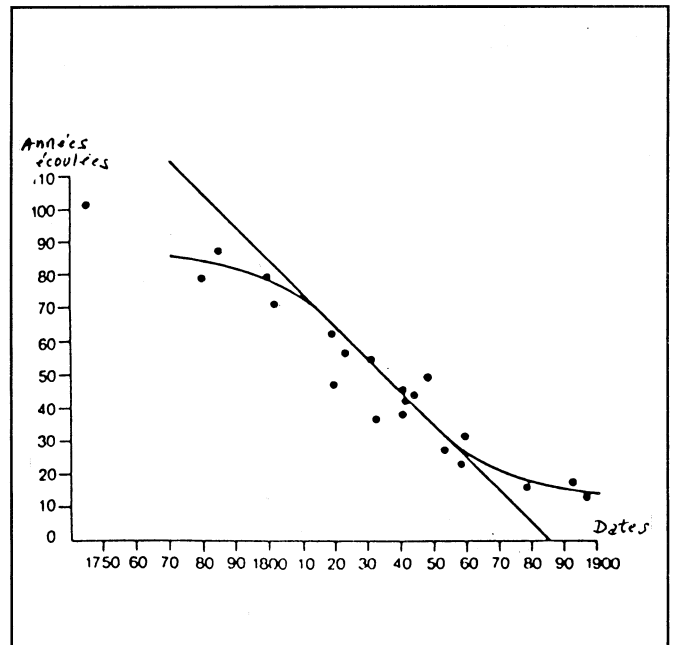


Fig. 8. Temps de latence séparant les inventions fondamentales dans le domaine de l'électrophysique des innovations fondamentales dans l'industrie d'équipements électriques (seconde moitié du XIXe siècle).

la hauteur et profondeur des pics et dépressions que pour les distances qui les séparent. Faute de quoi on ne pourrait établir l'existence d'un effet d'écho. Les séries chronologiques de toutes les inventions fondamentales devraient présenter des écarts semblables à ceux qu'on observe dans l'émergence des innovations fondamentales, pour qu'il soit justifié de rendre la science et la recherche responsables de la rareté de ces dernières.

D'un autre côté, il est peu probable que des périodes étales du courant d'innovations fondamentales se soient développées à partir de périodes étales antérieures qui leur correspondraient dans le courant d'inventions fondamentales, si les variations de ce dernier ne produisent pas de courbe caractéristique, comme c'est le cas pour le courant d'innovations. À l'aide de la méthode que nous avons utilisée pour tester la courbe de discontinuité des

séries chronologiques d'innovations fondamentales (voir ci-dessus), nous pouvons évaluer la discontinuité du courant d'inventions en testant son caractère aléatoire. Nous déterminerons quelle est la probabilité que la courbe des variations dans le temps du courant d'inventions fondamentales soit due au hasard. Il est très peu probable que le seul hasard produise des discontinuités nettement définies et régulièrement récurrentes. Par conséquent, une courbe de discontinuité confuse et irrégulière *ne saurait* être tenue pour semblable à la très caractéristique courbe de discontinuité du courant d'innovations fondamentales si la probabilité que le hasard produise la première était largement supérieure à 5 %, puisque la probabilité que le hasard produise la seconde courbe est significativement inférieure à 5 %.

Si nous compilons toutes les données relatives aux inven-

tions en séries à long terme, la probabilité que le hasard soit responsable des irrégularités varie de 15 % (quand on examine des périodes de dix ans) à 33 % (quand on examine des périodes de cinq ans). La courbe observée peut donc très bien être produite par le hasard et l'on ne saurait en aucun cas considérer que les séries chronologiques d'inventions fondamentales ressemblent de façon significative aux séries chronologiques d'innovations fondamentales ; la similitude est, dans le meilleur des cas, superficielle.

Le concept d'effet d'écho permettrait d'expliquer la rareté des innovations fondamentales pendant les années de stagnation par le manque antérieur d'inventions fondamentales, lui-même causé par l'insuffisante production des savants et des chercheurs. Voilà qui pourrait apparaître comme une explication plausible des circonstances, si l'on s'en tient à une étude superficielle des données ; mais lorsqu'on examine méthodiquement les faits, l'impression n'est pas assez significative pour servir d'alibi aux responsables de l'économie.

En réalité, chaque fois que des impasses techniques se sont produites par le passé, elles n'ont pas été causées par l'insuffisance de savoir théorique nouveau et utile, mais par l'incapacité manifeste de l'économie à traduire ce savoir en termes pratiques. Tel est le paradoxe des techniques inutilisées, que nous avons observé pendant les périodes précédant les années 1825, 1873 et 1929 et qu'on peut également, selon Marshall Robbins et d'autres chercheurs qui étudient les politiques fédérales d'encouragement à l'innovation, observer aujourd'hui¹⁹.

De nos jours, comme cela s'est déjà produit à plusieurs reprises au cours de l'histoire, bien des techniques nouvelles ont été conçues et mises au point dans les secteurs de la recherche. Ces techniques ne sont pourtant pas appliquées, du moins pour le moment, dans le cadre de nos économies frappées de stagnation. Tel est le résultat de l'inertie qui freine toute nouvelle réparation des facteurs.

Les dirigeants de l'économie, quand on les accuse d'être responsables du manque d'innovations fondamentales pendant les périodes de marasme technique, répliquent que les savants n'ont rien produit, ou qu'ils n'ont pas produit au bon moment et n'ont donc pas fourni assez d'idées innovatrices quand on en avait besoin. Selon cette théorie — pour peu du moins qu'elle soit valide — ce n'est pas le marché, mais le monde de la science et de la recherche qui serait coupable de ne pas avoir adopté les mesures qu'exige un contexte de stagnation. L'analyse des résultats conduit à rejeter l'effet d'écho. Les responsables de l'économie ne sont pas innocents du manque d'innovations fondamentales, qui n'est pas dû au manque d'information utile, mais au dysfonctionnement du marché de l'information et à l'inertie avec laquelle on redistribue le capital. « Les époques calmes nous apprennent peu. L'adversité est un bon maître. » (Otto Eckstein²⁰).

III. LA NÉGLIGENCE ET LA PRÉCIPITATION

Nous avons souligné les conséquences qu'entraîne, en période de croissance économique, le désintéret envers le transfert de connaissances dans l'innovation fondamentale. Ce qui veut dire que *les besoins actuels en nouvelles possibilités d'investissement ne peuvent être, dans l'immédiat, satisfaits par des projets d'innovation qui soient à la fois bien adaptés et suffisamment importants* pour compenser la stagnation et la croissance négative dont souffrent beaucoup de branches traditionnelles de l'industrie.

Pourquoi les ressources innovatrices ne sont-elles pas

employées en temps utile ? Le retard résulte en partie de l'excessive division du travail entre instituts de recherche d'une part, lieux de production de l'autre. Poursuivant chacun des objectifs différents, ils interrompent, de par leur séparation, le flux précieux d'information sur les besoins futurs et les moyens nouveaux de les satisfaire avec profit. Un tel système enterre sans peine les possibilités d'innovation, qui ne sont exhumées que lorsque la stagnation remet sérieusement en cause les modes de production traditionnels. Les mécanismes du marché fonctionnent bien et sans accroc tant qu'il s'agit de fournir à la population des biens de consommation courante. Leur faiblesse réside dans leur inaptitude fondamentale à attirer les possibilités innovatrices produites par le secteur de la recherche, et à les diriger vers les activités où le besoin d'innovation fondamentale est le plus pressant. Ce qui revient à dire que le marché de l'information ne fonctionne pas assez efficacement pour les économies industrialisées, tributaires qu'elles sont d'un approvisionnement flexible en information utile.

Autrefois, c'est principalement sous la pression des crises que les responsables de l'économie finissaient par répartir, avec des années de retard, les possibilités d'innovation fondamentale entre ceux qui étaient vraiment en mesure de les réaliser. Dans ces situations critiques, des vagues d'innovations — activées par les événements et favorisées par des hommes d'Etat énergiques comme Metternich, Bismarck ou Roosevelt — se sont finalement développées aux alentours des années 1825, 1886 et 1935.

En nous basant sur le paradoxe des techniques inutilisées, nous allons montrer maintenant que les responsables de l'économie ont négligé l'innovation fondamentale aux époques de prospérité, ce qui a peu à peu installé le marasme technique. Nous montrerons également quels problèmes entraîne la précipitation des dirigeants, quand ils commencent à prendre des mesures pour se dégager de l'impasse technique.

Le paradoxe des techniques non exploitées

Pendant la phase de stagnation du processus économique, le manque d'innovations fondamentales transforme le marasme technique en situation critique. Aujourd'hui, l'économie a manifestement besoin à la fois d'innovations techniques et organisationnelles, sans parler des innovations sociales qui sont nécessaires à la collectivité. M. Robbins écrit, à propos de ce paradoxe des techniques non exploitées :

« Si l'on admet la nécessité d'atteindre un taux d'innovation technique plus élevé, il est paradoxal de constater qu'aux Etats-Unis comme ailleurs on ne manque pas de techniques susceptibles de développer ce taux dans le secteur privé, d'améliorer le service public et de redresser la situation sociale.

« Ce qui soulève la question suivante : pourquoi cette abondante technique n'est-elle pas davantage utilisée ? Bien des facteurs s'opposent aux changements innovateurs, et notamment : les politiques de dépenses publiques ; la structure du marché dans le secteur privé ; la nature de la compétition dans les secteurs public et privé ; l'insuffisant regroupement des unités industrielles et administratives en ensembles de taille à adopter les techniques nouvelles ; et le fait que, lorsqu'il s'agit de prendre des risques techniques, on se prononce le plus souvent contre les changements innovateurs²¹. »

Sans nous occuper d'établir si le savoir technique accumulé, par exemple, dans les domaines de la défense, de la navigation aérienne et de l'énergie atomique, est réellement capable de suffire aux besoins de l'humanité, ou si ces techniques nouvelles vont largement méconnaître les besoins de la population dans les nations industrialisées, nous constatons que le paradoxe des techniques non exploitées demeure une réalité. S'il s'agissait seu-

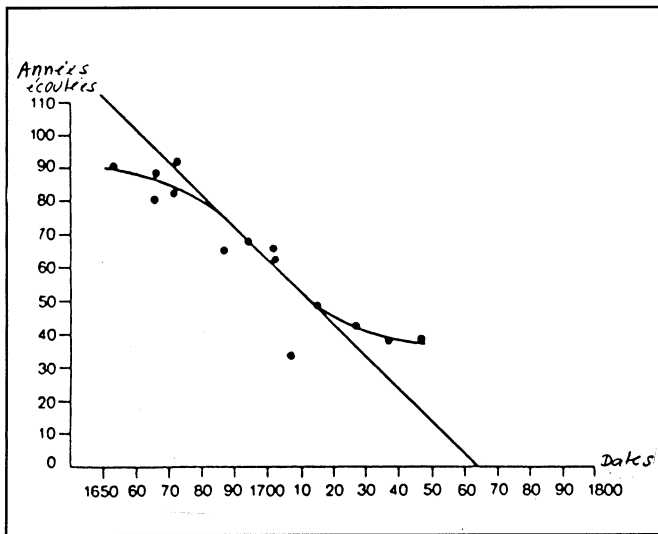


Fig. 9. Temps de latence séparant les inventions fondamentales des innovations fondamentales pendant la révolution industrielle de Brno (vers 1764).

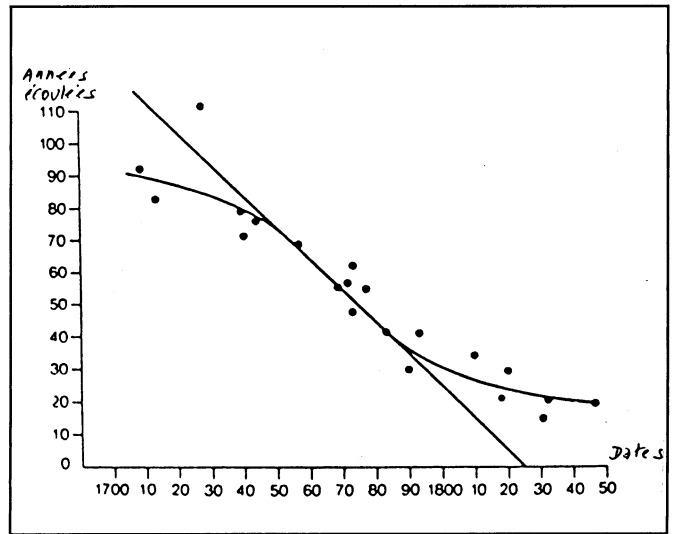


Fig. 10. Temps de latence séparant les inventions fondamentales des innovations fondamentales (première moitié du XIXe siècle).

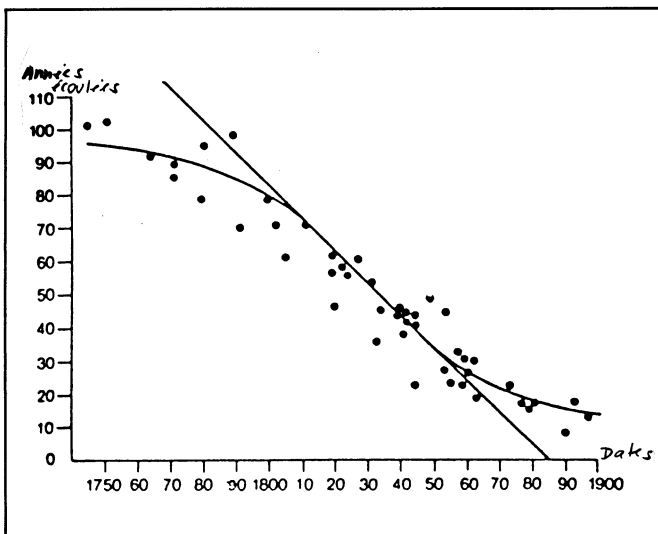


Fig. 11. Temps de latence séparant les inventions fondamentales des innovations fondamentales dans les industries chimiques et électrotechniques (seconde moitié du XIXe siècle).

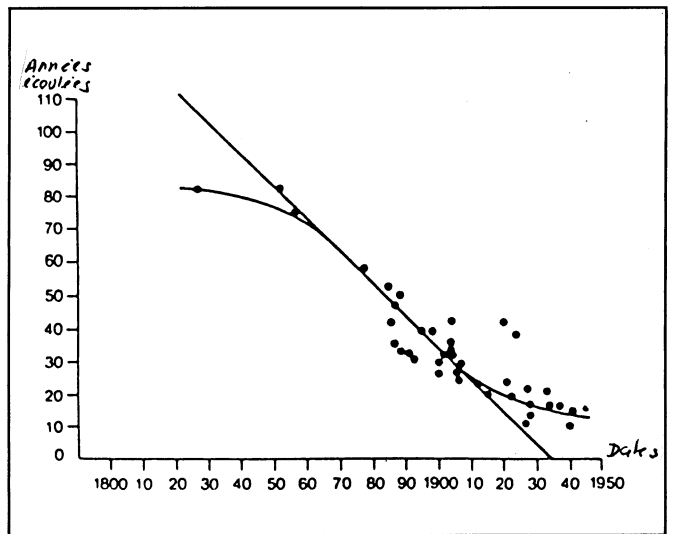


Fig. 12. Temps de latence séparant les inventions fondamentales des innovations fondamentales (première moitié du XXe siècle).

lement d'affecter à de grands projets d'innovation technique la force de travail humain aujourd'hui inemployée et le capital sous-utilisé, il y aurait largement assez d'idées pour lancer d'ambitieux programmes publics de travaux. Mais qui souhaite vraiment une telle solution ?

A n'en pas douter, bien des difficultés freinent la progression du savoir technique. Quoique le monde de la théorie — c'est-à-dire les universités et centres de recherche financés par les fonds publics — fournisse de nombreux projets d'innovations exploitables, le monde de la pratique semble malheureusement incapable d'utiliser la plupart de ces nouveaux concepts techniques. L'un des obstacles majeurs à l'innovation est que, bien sûr, personne ne *sait* vraiment ce qui est souhaitable pour l'avenir.

Dans le passé, le gouvernement américain a accompli des efforts considérables pour que les avancées techniques réalisées dans les domaines de la défense, de la navigation aérienne et spatiale (NASA) et de la recherche atomique (AEC) rejaillissent sur l'ensemble de l'économie. Ce transfert forcé de technique aurait certainement bénéficié au Pentagone, à la NASA et à l'AEC s'il avait alors été plus facile au Congrès d'investir des milliards supplémentaires dans la défense, l'espace et la recherche atomique

parce que le consommateur retirait, lui aussi, quelque avantage de ces dépenses. Pourtant, très rares sont les tentatives de faire retomber ces techniques nouvelles dans le secteur civil qui ont eu un impact significatif sur l'économie. Le flux de savoir provenant des grands projets gouvernementaux de recherche n'a pas développé l'innovation dans le secteur privé de l'économie. Les spécialistes du transfert de technique appellent ce phénomène — c'est-à-dire l'accumulation substantielle de savoir technique nouveau et les tentatives infructueuses d'implanter ce nouveau savoir dans l'économie — « l'effet spaghetti ».

L'effet spaghetti est l'inverse de l'effet d'écho. Ce dernier propose (sans succès) d'expliquer le manque d'innovations fondamentales par un échec momentané de la science. L'effet spaghetti, lui, fait découler le manque d'innovations de l'inertie des capitaines d'industrie. Quand on déplace l'extrémité d'un spaghetti (cuit), l'autre extrémité ne bouge pas : image qui rend bien compte de la réalité. Une vaste réserve de savoir se constitue, mais elle n'affecte que très lentement la pratique réelle. C'est une conclusion parfaitement établie de la recherche en innovation que « l'offre technique » est une médiocre façon d'introduire des techniques nouvelles sur le marché ; la « demande » est un

important facteur de succès pour l'innovation. Si cette demande vient à manquer, le taux d'innovation est faible.

Pourtant, le paradoxe des techniques non utilisées ne caractérise pas seulement le glissement de la dernière décennie vers le marasme que nous connaissons aujourd'hui. On peut établir un parallèle avec des époques antérieures ; la même situation paradoxale se retrouve au cours d'autres périodes de stagnation qui ont abouti à des impasses techniques. **La même constellation d'avancées théoriques majeures dans le domaine de la technique et d'applications pratiques en nombre très restreint se retrouve dans les années qui ont précédé les crises de 1825, 1873 et 1929.**

Nous tirons ces observations des données relatives aux innovations fondamentales, et aux inventions fondamentales qui leur ont donné naissance (cf. tableaux 1 à 4). Examinons d'abord la vague d'innovations des années 30. Le marasme technique des années 20 résulte du manque d'innovations fondamentales de la période précédente. Pourtant, la figure 4 indique que la plupart des inventions fondamentales majeures qui allaient ensuite être appliquées lors de la vague d'innovations des années 30 étaient déjà bien connues en 1925. Nous voyons ainsi que le paradoxe des techniques non utilisées existait déjà pendant les années 20 !

Pendant cette période, la relation entre l'accumulation de savoir et son application pratique était la suivante :

- au moment de la crise de 1929 *plus des trois quarts* des inventions fondamentales avaient déjà été produites ;
- en 1929 *moins du quart* des innovations fondamentales qui en découlaient étaient appliquées.

On observe la même relation paradoxale entre un haut niveau d'accumulation du savoir et un faible degré d'application pratique à la veille de la grande crise de 1825 (cf. figure 3). En 1820, la réserve de savoir disponible (exprimée par le nombre total d'inventions fondamentales non utilisées) comprenait 80 % de l'information à partir de laquelle allait bientôt se constituer la vague d'innovations en 1825. En 1820 toutefois, moins de 20 % des innovations fondamentales qui seraient mises en œuvre les années suivantes (selon le tableau 1) étaient en fait appliquées. Ecart plus étonnant encore si l'on tient compte des problèmes majeurs concernant l'utilisation des capitaux disponibles²² au sein d'une économie en proie à une crise structurelle²³.

Les économistes britanniques contemporains caractérisèrent cette époque comme une époque de misère.

En fait, pendant la crise mondiale de 1820, le blocage des innovations fondamentales ne fut pas aussi total qu'en 1920. Certaines innovations fondamentales d'une grande portée économique furent appliquées lors des années qui précédèrent immédiatement l'effondrement de 1825, et notamment : la première production de ciment de Portland (1824), la première construction d'un four à puddler (1824), le premier étirage de fil (1820) et la distillation industrielle de la quinine (1820). Ces innovations techniques opportunes ont peut-être freiné la tendance dominante à la dépression et contribué à amortir la crise.

La crise économique mondiale de 1873 et la dépression qui s'ensuivit furent plus graves que celles de 1825, mais moins que celles de 1929. On y observe la même relation paradoxale entre un taux initialement faible de mise en œuvre d'innovations fondamentales, et un haut niveau d'accumulation d'inventions fondamentales. La figure 2 illustre cet écart. Dans les domaines de la chimie, de l'électrophysique et des technologies connexes, la vague d'innovations fondamentales eut lieu bien des années après le désastre économique mondial de 1873, alors que les inventions qui leur donnèrent naissance appartenaient depuis longtemps au fonds du savoir exploitable.

Les détenteurs de capitaux n'investissaient pas dans l'innovation

fondamentale. Bismarck formula le caractère paradoxal de la situation ; il suggéra par manière de plaisanterie que, compte tenu des difficultés que l'Allemagne, frappée par la stagnation, éprouvait à investir de façon productive l'indemnité de cinq millions de marks de la guerre franco-prussienne, on devrait forcer la France non pas à payer, mais à accepter x milliards de marks de l'Allemagne après la prochaine guerre. L'économiste Newbold, essayant de tirer, pendant la dépression des années 30, les leçons de la dépression de 1870, attribua la responsabilité de la catastrophe de 1873 à « la confusion totale qui régnait sur le marché mondial de l'or²⁴ ». Diagnostic exact, mais superficiel, comparé à la comparaison de l'économie politique que Bismarck avait manifestée cinquante ans plus tôt²⁵.

Le marasme technique actuel est également caractérisé par le retard des investissements d'innovation dans le secteur privé. Les grands détenteurs de capitaux ne trouvent pas d'occasions rentables d'investissement. De toute évidence, ces occasions ne leur sont pas fournies, ou du moins pas encore, par les innombrables idées produites dans les grands programmes publics de recherche, les institutions universitaires et les laboratoires de recherche industrielle.

Cette fois pourtant, la connaissance des possibilités d'innovation qui sont déjà disponibles ou en cours d'élaboration dans le secteur de la recherche pourrait ranimer la confiance des planificateurs, et empêcher que leurs réactions précipitées ne nous conduisent à une autre crise mondiale. Comme ils l'ont toujours fait par le passé, les investisseurs privés, au lieu de rester dans l'expectative, pourraient alors investir dans ces idées nouvelles leur capital généralement sous-utilisé ; ils compenseraient par là même leur désintérêt passé et contribueraient peut-être à l'émergence d'une nouvelle vague d'innovations fondamentales.

Mais les mesures adoptées pour remédier au manque d'innovation peuvent aller d'un extrême à l'autre, comme cela a typiquement été le cas dans le passé. La précipitation peut occasionner des tentatives irréfléchies de stimuler l'économie par l'introduction de techniques d'une valeur sociale discutable. Une mise en garde contre la précipitation elle-même : quand L. Robbins étudia en 1934 la grande dépression de 1870-1880, il déclara que le meilleur moyen d'éviter une dépression était, avant tout, de ne pas chercher à déclencher de boom²⁶.

On peut surtout redouter que l'énergie accumulée par les forces d'investissement ne soit artificiellement libérée vers les plus proches, plus rapides mais non pas meilleures possibilités d'innovation. En de pareilles circonstances, ces dernières se sont toujours révélées être de nouveaux types d'armes ou des procédés plus efficaces pour produire la machinerie de guerre. Non seulement l'investissement public dans les industries de guerre ne laissait alors plus de place aux investissements privés dans les industries de paix, mais il introduisait aussi une plus haute propension à la guerre. Tel fut l'artifice utilisé par Hitler.

Le rythme du progrès technique

La thèse selon laquelle le changement technique s'accomplit à un rythme toujours plus rapide est maintenant très répandue. Sa popularité s'explique par le désir de croire que les innovations qui font souvent défaut peuvent être produites en un clin d'œil ou, comme le pensent les keynésiens, sorties des réserves à volonté, et qu'il n'y a donc pas de raisons de s'inquiéter vraiment. Cette thèse de l'accélération n'est qu'à moitié vraie ; son fondement, à savoir l'idée qu'on peut créer sur-le-champ de nouvelles industries, est faux.

Lisons à titre d'exemple les propos de Paul A. Samuelson, qui est probablement l'économiste le plus célèbre, non seulement des Etats-Unis mais du monde entier. Dans un entretien accordé

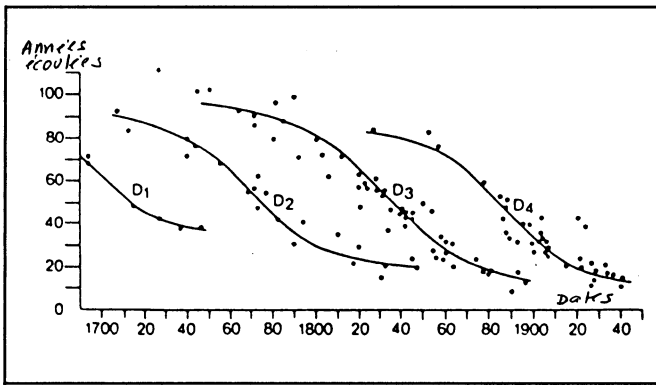


Fig. 13. Aperçu d'ensemble des temps de latence depuis le début de la révolution industrielle.

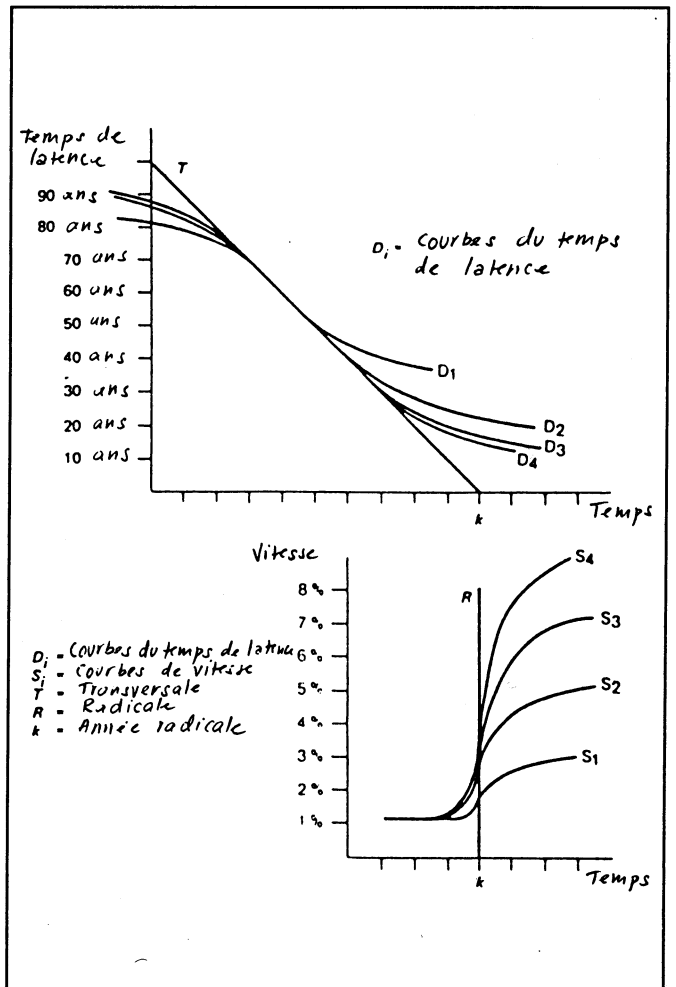


Fig. 15. Diminution du temps de latence et augmentation de la vitesse à différentes étapes de l'histoire économique.

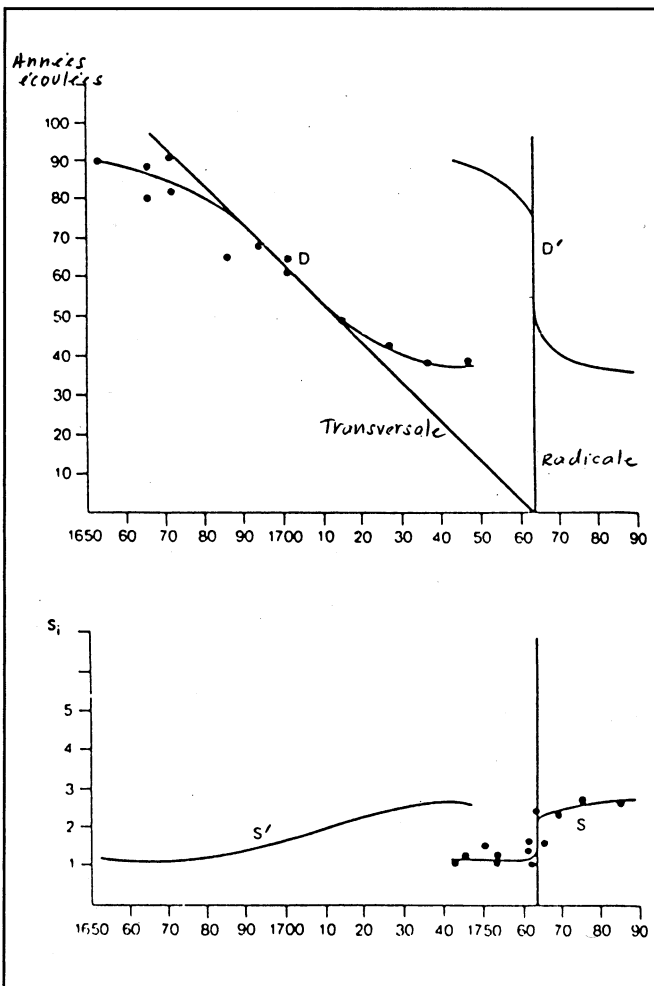


Fig. 14. Temps de latence et vitesse du changement innovateur.

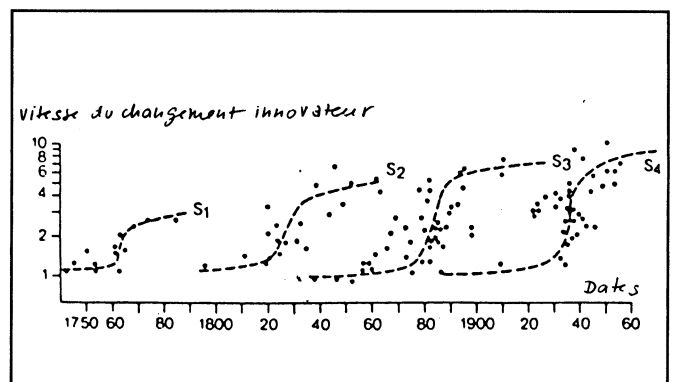


Fig. 16. Les cycles d'accélération du changement innovateur au cours de l'histoire économique.

à *Economic Impact* (1978/2), publié par l'U.S. International Communications Agency et distribué par le Service diplomatique américain, Samuelson déclare :

« Autrefois, on ne savait pas comment créer des emplois. Quand un homme, par exemple l'employé d'une fabrique de buggies, perdait son travail à cause des techniques nouvelles, on priait pour que l'industrie automobile arrive et crée des emplois. Mais aujourd'hui, on dispose de banques centrales, de politiques gouvernementales monétaires et fiscales. On peut, sans s'en remettre à la bonne fortune, créer des emplois dans des secteurs nouveaux si la technique fait disparaître des emplois dans les secteurs traditionnels. »

Cette croyance selon laquelle on peut instantanément créer de nouveaux emplois — qui rend bien compte de la philosophie dominante en matière d'économie — illustre clairement « le besoin d'une reconstruction totale des microfondations de la théorie monétaire contemporaine » (R. W. Clower et P. W. Howitt, *Journal of Political Economy*, 1978, n° 3, p. 449).

On peut aujourd'hui mettre très rapidement en place des innovations de détail dans bien des secteurs traditionnels de la technique ; car ces domaines traditionnels de la connaissance peuvent offrir beaucoup d'idées techniquement réalisables. Mais la demande du marché en produits traditionnels est insuffisante dans une société riche puisque, par définition, cette dernière en a été gorgée. C'est que, au fur et à mesure que les améliorations de qualité portant sur des innovations successives diminuent sur les marchés établis, les pseudo-innovations se multiplient et se succèdent de plus en plus vite. Il y a là, sans aucun doute, une accélération réelle.

Par ailleurs, on n'a pas saisi que les innovations fondamentales, parce qu'elles créent des marchés entièrement nouveaux, ne progressent pas plus vite maintenant que dans les siècles passés.

Aujourd'hui, on dispose de trop peu d'innovations dans les nouveaux domaines de la technique, parce qu'on ne peut accélérer le processus d'innovation autant qu'on le croit communément. Il faudrait pour cela mener à toute vitesse la recherche, les essais, le développement et l'expérimentation de possibilités d'innovation qui ont été négligées pendant des dizaines d'années. C'est seulement au prix d'un plus grand risque et de moindres résultats que l'on pourrait abrégé ce processus qui demande beaucoup de temps. Si le temps, c'est de l'argent, du temps précieux a été gaspillé parce que le trajet qui mène de l'invention à l'innovation est long quand il doit traverser des territoires industriels inexplorés.

Le rythme du progrès technique dans ces zones inexplorées de la nouvelle technique est lent, si on le compare au rythme du changement dans les domaines confirmés, que l'on maîtrise bien comme c'est le cas pour l'aviation, les synthétiques et l'informatique. Aujourd'hui, la théorie de l'accélération du progrès technique semble valide pour certaines innovations d'amélioration, mais pas pour les innovations fondamentales. Il faut examiner la totalité des innovations, qu'elles soient déjà appliquées, en cours de réalisation ou même inutilisées. On observera alors des différences significatives.

L'affirmation selon laquelle le temps écoulé entre le début et l'accomplissement d'un changement tend à se réduire, cette affirmation n'est pas davantage crédible sous prétexte qu'elle remonte à fort loin. Lorsque Comte formula la première loi de la dynamique sociale en 1840, il reprit le concept des phases historiques de Turgot. Il maintint que les états théologique, métaphysique et scientifique étaient chacun plus court que les précédents. L'état scientifique céda ensuite le terrain à l'état électrique, puis

« le progrès de la vitesse de sa forme mécanique à sa forme électrique instantanée », pour reprendre l'expression de Marshall McLuhan, est devenu une expérience quotidienne pour l'homme moderne.

La notion d'accélération générale du cours de l'histoire, c'est-à-dire l'idée que les changements s'accomplissent en périodes progressivement plus courtes, a été formulée comme une loi par Henry Adams²⁷. Elle est reprise par plusieurs travaux érudits et scientifiques modernes, tout particulièrement dans les écrits relatifs à la conception et au développement de produits nouveaux. Beaucoup d'auteurs affirment qu'il faut de moins en moins d'années au savoir pour voyager de l'inventeur à l'innovateur.

La figure 5 offre un exemple des conclusions périlleuses auxquelles on aboutit quand on rassemble quelques observations choisies. Cette figure est extraite d'un ouvrage de Stamm et Wilmes²⁸, qui ont utilisé des données recueillies par Brankamp. Le docteur Zipse a, par jeu, doté la loi de Henry Adams d'une formule mathématique précise, afin de montrer qu'il est très facile de se donner l'apparence de l'exactitude scientifique. Il a ensuite associé les données de Stamm et Wilmes et la courbe d'Adams

$$I = A - \exp(t/T)^{-b}$$

afin d'obtenir le graphe de la figure 6. Le temps d'innovation, exprimé en années, a été figuré en hauteur au-dessus des dates de découverte²⁹. A vrai dire, le docteur Zipse n'est pas le premier à avoir montré l'absurdité de la soi-disant loi Adams. En 1943, Winters³⁰ publia un livre soulignant combien la thèse d'Adams embrouillait les choses. Il est évident, par conséquent, que cette thèse ne repose sur rien de solide ; demandons-nous alors quel est ce petit « rien » sur quoi elle repose ?

La faille ne réside pas dans les intervalles de temps. Comme Sicherl l'a récemment établi³¹, la durée d'un processus de changement fournit une indication sur la distance qu'une économie arriérée doit parcourir sur la route du développement. De même, le temps nécessaire au transfert de connaissances depuis l'invention jusqu'à l'innovation nous renseigne sur les différences observables à l'intérieur d'une économie à diverses époques de son évolution. Ce décalage dans le temps indique qu'il a été difficile et pénible de faire passer le système de sa condition initiale à l'époque de l'innovation. **On observe de longues périodes d'innovation pour les innovations d'avant-garde et des périodes plus courtes pour les innovations qui se développent en terrain connu. Seules les pseudo-innovations se réalisent en un rien de temps.** Cette explication éclaire la dynamique du progrès technique³² ; la vitesse varie selon le caractère plus ou moins radical de l'innovation et la réceptivité des différents secteurs de l'économie.

Le problème, avec la loi de Henry Adams, n'est pas tant dans l'utilisation des intervalles de temps, bien que ces intervalles puissent évidemment avoir été incorrectement déterminés dans certains cas : il est surtout dans l'incapacité de percevoir les variations de rythme du transfert de connaissances **selon les secteurs et selon les types d'innovation.** Certains mouvements révèlent des tendances opposées au mouvement général, et il ne peut donc subsister d'illusion quant à la diminution générale du temps nécessaire aux changements structurels. La croyance commune selon laquelle la tendance historique à l'accélération du progrès technique nous permettrait d'intervenir au bon moment avec toutes les techniques nouvelles souhaitables, et d'atténuer la stagnation, cette croyance est donc sans fondement. Si le temps d'innovation semble généralement diminuer, c'est tout simplement que beaucoup de pseudo-innovations sont apparues ces

dernières années, au point de nous donner des choses une image assez déformée.

Les innovations fondamentales n'apparaissent généralement pas à un rythme de plus en plus rapide. Ce n'est qu'occasionnellement que ce rythme s'accélère : à savoir lorsque la pression qui pousse au changement est si forte, du fait du retard initial, qu'elle produit une vague d'innovations. C'est une situation tout à fait exceptionnelle.

Il y a un effet d'entraînement. Au début, seuls quelques wagons s'ébranlent ; puis, au fur et à mesure que le train s'allonge, la vitesse augmente ; si bien que, lorsque les derniers traînards rejoignent le groupe, celui-ci a déjà atteint sa pleine vitesse. C'est exactement ainsi qu'une vague d'innovations fondamentales déferle sur une économie en proie au marasme technique.

Le mouvement de sortie de l'impasse technique s'effectue en deux phases distinctes :

- Au début, seules les quelques innovations particulières sont réalisées. Les autres — la majorité — sont encore immobilisées.

- Puis la vague d'innovations surgit, avec, pour résultat, beaucoup d'affluence et de précipitation.

On peut donc observer l'effet d'entraînement à la fois dans les variations du nombre d'innovations fondamentales, et dans la vitesse croissante à laquelle chaque innovation est réalisée. Nous avons déjà établi une méthode d'observation du premier aspect. Les données relatives aux variations du nombre d'innovations fondamentales ont été rassemblées dans les tableaux de la partie II tandis que dans la partie I, nous avons identifié l'effet d'entraînement dans l'apparition par vagues des innovations³³.

Les décalages observés dans le transfert de connaissances

Nous aimerions maintenant décrire le mouvement du transfert de connaissances de l'invention fondamentale à l'innovation fondamentale dans des domaines déterminés, à commencer par la chimie et l'électrophysique. Nous avons, avec l'aide de Thomas Kuhn, décrit la révolution scientifique qui a bouleversé ces secteurs. La théorie de la combustion formulée par Lavoisier constitue le paradigme de la chimie moderne ; il en va de même pour l'invention de la bouteille de Leyde et l'électrophysique. Ces deux domaines du savoir trouvent leur origine dans le champ épistémologique de la fin du XVIII^e et du début du XIX^e siècle. L'élan et l'esprit de l'époque offraient un terrain fertile au savoir théorique qui se constituait dans ces branches nouvelles de la technique qu'étaient la chimie et l'électricité. De plus, ces découvertes se produisirent à une époque où la recherche piétinait sur les acquis théoriques précédents en mécanique et en thermodynamique, c'est-à-dire sur la tentative de construire une machine à vapeur.

Nous avons esquissé le cours emprunté par le savoir dans ces domaines, puis nous l'avons exposé sous forme de listes d'innovations fondamentales (cf. tableaux 2 et 3), qui indiquent également l'intervalle de temps écoulé entre une invention et l'innovation résultante. Les écarts visibles du transfert de connaissances matérialisent ces distances dans le temps (cf. figure 2).

L'année à laquelle s'est produite une invention fondamentale et le temps écoulé jusqu'au moment où ce savoir trouve une application pratique sont représentés par des points (figures 7 et 8). Un point représente à la fois l'année de l'invention et le temps de latence nécessaire pour aboutir à l'innovation. L'ensemble des points, qui est l'image du transfert de connaissances dans sa globalité, illustre les variations du décalage préalable à l'application des innovations dans un domaine déterminé du savoir. Ces ensembles de points forment un dessin assez comparable au négatif d'une photographie de la Voie lactée ; les points sont dis-

séminés sur une large bande orientée vers le bas et la droite.

La thèse populaire selon laquelle le temps de latence de l'innovation diminue sans cesse est ainsi partiellement confirmée par cette réduction du décalage dans certaines branches du savoir. Le temps de latence se réduit nettement dans la chimie et l'électrophysique. Ce qui révèle en outre le rôle moteur joué par les innovations pionnières. Les innovations qui sont appliquées les premières produisent un stimulus accélérateur sur les suivantes³⁴.

Jetons maintenant un coup d'œil sur la figure 11. Ces grappes de points illustrent les données relatives au transfert de connaissances dans la chimie et dans l'électrophysique. Comme nous l'avons souligné plus haut, ces deux domaines proviennent du même groupe de connaissances ; il est également évident que, dans ces deux domaines, la courbe du temps de latence offre le même dessin. Ce qui veut dire que les courants d'inventions fondamentales de ces deux domaines scientifiques suivent des cours parallèles jusqu'à leur fusion rapide dans un contexte de marasme technique (cf. figure 2).

Appelons cette double similitude *principe de correspondance du transfert de connaissances*. Il énonce que les inventions fondamentales de différents domaines du savoir dérivant cependant du même champ épistémologique (de différentes branches de l'ensemble du savoir) ont besoin d'un temps de maturation sensiblement égal, et qu'elles deviennent productives à peu près au même moment.

Le principe de correspondance explique que la majorité des inventions fondamentales conçues sur un demi-siècle ou plus donnent naissance à une vague d'innovations qui s'étendra sur quelques années, et cela même si leurs bases théoriques (inventions) appartiennent à différentes branches scientifiques. Ce qui provient partiellement du fait que les branches qui produisent simultanément des idées exploitables ont généralement été inspirées par la même *Zeitgeist*. Ainsi, les vagues d'innovations fondamentales qui ont surgi vers 1825, 1880 et 1935 tirent leur origine de disciplines différentes bien qu'elles se fondent sur les mêmes postulats philosophiques. Mais leur traduction dans la pratique économique progresse clopin-cloplant. La force principale à l'œuvre derrière le principe de correspondance est toutefois le désintérêt initial de l'économie envers les avancées scientifiques, et le besoin aigu d'innovations fondamentales qui en résultera aux époques de dépression.

Le principe de correspondance explique également la ressemblance frappante qui caractérise les courbes du temps de latence à diverses époques (cf. figures 7 à 12). Bien que toutes ces inventions proviennent de domaines différents, les temps de latence produisent des courbes presque identiques.

La figure 13 offre une vision d'ensemble de toutes les courbes du temps de latence. Elle montre que la tendance à la diminution du temps nécessaire au changement n'est repérable que dans certains domaines, et à certaines périodes. Elle peut varier considérablement dans d'autres domaines. Pour tout théoricien pourvu d'ambitions concrètes, cela signifie qu'il lui faudra attendre horriblement longtemps avant d'assister au moindre résultat économique. En vérité, triste est le destin de l'inventeur quand il travaille dans un domaine qui se trouve à l'écart de la pratique et des préoccupations industrielles dominantes. Il peut en effet s'écouler 70, 80 ou 90 ans avant que sa brillante invention se soit frayé un chemin jusqu'à la pratique économique. En d'autres termes, l'inventeur ne vivra pas assez longtemps pour voir son idée se concrétiser dans le monde réel. « Entre la première et la seconde étape, il y a un long chemin à parcourir. Quelquefois, cette distance est si grande qu'on ne peut jamais la franchir, et les inventions demeurent tout simplement dans le royaume des

idées jusqu'à ce que la poussière du temps les recouvre, ou que, les circonstances ayant changé, elles rencontrent enfin un environnement réceptif³⁵. »

Après l'examen des courbes du temps de latence (cf. figure 13), nous pouvons nous rallier, dans ses grandes lignes, à l'avis de Dennis Gabor, lauréat du prix Nobel :

« L'union de la science et de la technique ne s'est pas réalisée tout d'un coup mais progressivement, sur trois siècles. Même au XIX^e siècle, cette union était encore si incomplète que, bien que la plupart des lois de l'électricité et du magnétisme eussent été découvertes et intégralement formulées par Faraday et Maxwell, aucun appareil électrique ne fut inventé au pays de la Royal Society. La situation n'était guère plus brillante ailleurs. En 1887, Heinrich Hertz produisit les ondes électromagnétiques qui étaient implicitement en germe dans les équations de Maxwell de 1868, mais c'est à Marconi qu'il revint en 1896 de tirer parti de l'antenne, dont la théorie complète était contenue dans les équations de Hertz. Cet écart de vingt à quarante ans entre la découverte scientifique et son exploitation technique est caractéristique de presque tout le XIX^e et le XX^e siècle. Ce n'est qu'à notre époque qu'il s'est fortement réduit³⁶. »

Nous ne sommes pourtant pas d'accord avec la dernière phrase. D'abord, cette réduction du temps de latence ne se constate pas, comme nous l'avons signalé, dans tous les domaines de la recherche scientifique et technique ; ensuite, de telles réductions se sont également produites aux alentours des années 1760, 1825, 1886 et 1935. Il suffit, pour établir le fait, d'examiner les vagues d'innovations de ces périodes (cf. figure 13).

En outre, chaque fois que la réduction du temps de latence atteint son maximum, notamment dans le cas d'innovations successives apportées à des techniques confirmées, les possibilités d'application de découvertes vraiment nouvelles se réduisent considérablement. L'histoire de Dennis Gabor, inventeur de l'holographie, en est une illustration parfaite.

En 1948, Gabor, qui enseignait à l'Imperial College de Londres, publia un article dans lequel il expliquait qu'il était possible de prendre des photos sans lentille, et que les images ainsi produites étaient vraiment tridimensionnelles : il s'agissait de l'holographie. Sur ce, il breveta le procédé holographique en 1948. La contribution de Gabor constituait la solution pratique d'un problème théorique reconnu et défini depuis des années. Tant la théorie du rayonnement, qui contribua à la production des premières images holographiques en 1963, que les rayons laser utilisés par le procédé de 1963 dérivent en fait des équations formulées par Einstein en 1917. Ce point précis du savoir, ébauché par Albert Einstein, mit très longtemps à passer de la théorie à la pratique. En 1978, au bout de 30 années, l'holographie n'avait toujours pas sa place sur le marché.

On observe, pour une technique donnée, des variations étonnantes du temps de latence, selon que l'innovation se développe ou pas dans le cadre d'industries existantes. De telles variations infirment nettement l'idée commune selon laquelle le transfert de connaissances s'effectue plus rapidement aujourd'hui que par le passé. Ainsi, les brevets du transistor et de l'holographie ont tous deux été déposés en 1948. Ces deux techniques sont donc nées en même temps, mais la différence de développement entre leurs deux domaines est proprement stupéfiante !

Trente ans ont passé et l'industrie holographique n'existe toujours pas, alors que dix ans après l'invention du transistor, toute une industrie s'était édifiée, représentant une activité chiffrable en milliards de dollars. Différence qui n'est guère difficile à expliquer. A partir de 1948, le transistor a remplacé le tube à vide dans toutes ses utilisations antérieures parce qu'il était plus

compact, beaucoup plus sûr, consommait moins d'énergie et revenait bien moins cher à produire. Il a rapidement établi son propre marché et rejeté le tube radio au rang des techniques obsolètes³⁷. Le transistor a fait irruption dans un domaine technique constitué, alors que l'holographie n'existe que dans un no man's land. La figure 13 fournit une vue d'ensemble de l'accélération du transfert de connaissances dans différents domaines scientifiques et techniques qui ont produit des changements structurels depuis la révolution industrielle.

L'étude des figures 9 à 12 montre encore une fois que le temps de latence ne s'est réduit que dans certains domaines techniques confirmés. La croyance populaire selon laquelle ce temps se réduit n'est pas vérifiée dans le cas d'inventions fondamentales qui surgissent dans un terrain vierge et s'exposent au no man's land industriel. Dans ce cas, le progrès technique n'est pas un tigre (Paul Samuelson), mais un escargot (Günter Grass).

La vitesse du processus de transfert

Le temps écoulé entre une invention fondamentale et son application à certains domaines de la technique constitue une donnée préliminaire permettant d'évaluer approximativement la vitesse avec laquelle apparaissent les vagues d'innovations fondamentales. Comment peut-on mesurer la vitesse de l'activité innovatrice ? J'ai esquissé une méthode, applicable aux innovations fondamentales, dans un essai sur la dynamique du progrès technique, mentionné plus haut³⁸.

Le concept sous-jacent est très simple. Nous avons emprunté la méthodologie utilisée en physique pour mesurer la vitesse d'un mouvement dans l'espace, et nous l'avons appliquée au mouvement qui se produit pendant un transfert de connaissances. Ce mouvement consiste en une progression qualitative, qui va de l'invention fondamentale *i* à l'innovation correspondante *i*, progression qui s'effectue en *di* années.

D'après les principes de la mécanique, la vitesse est l'expression qui caractérise le mouvement d'un corps parcourant une distance dans l'espace. De façon analogue, nous exprimons la distance qualitative qui sépare l'invention fondamentale de l'innovation fondamentale dans le transfert de connaissances par une grandeur relative : 100 %. Cent pour cent exprime la différence entre l'état du monde avant la naissance de l'idée (invention) et l'état du monde après l'application pratique de cette idée (innovation) ; 100 % est une expression certes peu informative. Cependant, elle signifie que le transfert de connaissances s'est accompli, et elle remplit donc parfaitement sa fonction.

100 % est une expression commode, car dépourvue de dimensions, pour comparer divers processus d'innovation afin de comprendre les différentes modalités d'apparition du changement. Des temps de latence longs sont le signe des difficultés qu'entraîne l'introduction des améliorations.

Tout ce qu'il nous faut maintenant, ce sont les règles simples de calcul de pourcentages. La vitesse est mesurée par le rapport entre la distance parcourue et une unité de temps déterminée en raison de sa signification. J'ai choisi l'année pour unité. La vitesse moyenne d'un processus de transfert, *i*, est donc égale à l'inverse de la valeur de sa durée, *di*, exprimée en pourcentage :

$$V_i = \frac{\text{transfert de 100 \%}}{di \text{ années de décalage}}$$

Cette expression mesure la progression, exprimée en pourcentage, qu'a accomplie chaque année le *i*^{me} processus de transfert entre une invention fondamentale et l'innovation qui lui correspond.

Nous admettons ici que le *i*^{me} processus de transfert avance chaque année à la même allure ; l'hypothèse n'est pas réa-

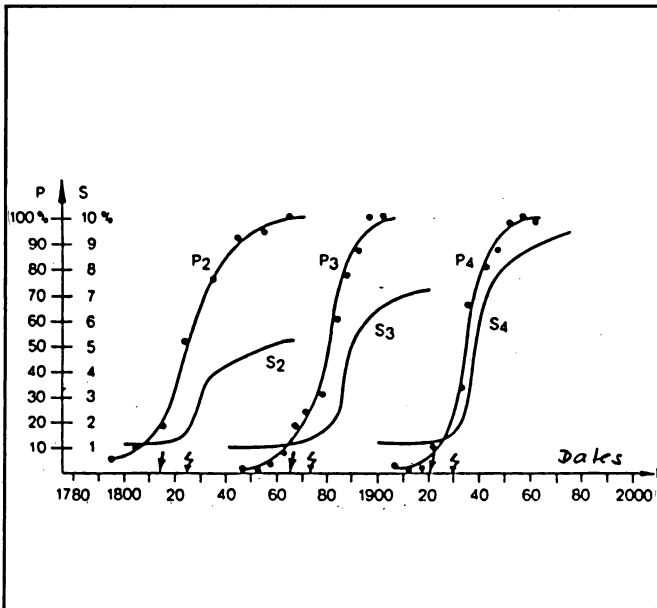


Fig. 17. Corrélation entre fréquence et vitesse de changement.

liste, mais nous verrons plus loin qu'elle s'annule, et que cela n'affecte donc pas gravement les résultats.

Reprenons le problème de départ. Nous voulons mettre en évidence le renversement de tendance qui s'opère lors d'une impasse technique, ainsi que la facilité soudaine avec laquelle le transfert de connaissances triomphe des obstacles. Démontrons pour ce faire la rapide accélération de la vitesse du transfert. Nous utiliserons à cet effet la donnée *si*, c'est-à-dire l'inverse de la valeur de la durée *di*. Ces données sont présentées dans les tableaux 1 à 5 sous les rubriques « Décalage en années » et « Rythme du changement ». Nous étudierons la rapidité ou la lenteur avec laquelle ont été mises en œuvre les innovations de chaque vague, du début jusqu'à la fin du mouvement.

Appliquons d'abord cette méthode à la vague d'innovations produite par la révolution industrielle sur le continent européen⁹. Les données, tirées de mon étude sur Brno (menée avec H. Freudenberger), sont présentées dans le tableau 5.

La partie supérieure gauche de la figure 14 montre les différents temps de latence, *di*, représentés par une série de points semblables à celle de la figure 9^o. Ces points sont éparpillés le long de la courbe du temps *D*, dont la partie médiane présente une pente de 45 degrés. Cette partie médiane se confond avec le graphe d'une fonction linéaire, c'est-à-dire avec une droite, que nous nommerons la transversale et qui possède les caractéristiques suivantes : sa pente est de -45 degrés ; elle coupe l'axe du temps en un point qui est l'image de l'année à laquelle tous les processus de transfert dont le point de départ appartient à la transversale aboutissent à une innovation fondamentale.

La perpendiculaire à l'axe du temps menée à partir de ce point s'appelle la radicale, et l'année elle-même année radicale : c'est l'année pendant laquelle la vague d'innovations a produit les innovations les plus décisives. 1825, 1886 et 1935 sont des années radicales.

Examinons maintenant l'autre distribution de points, dans la portion inférieure droite de la figure 14. Ces points représentent la vitesse moyenne de chaque transfert de connaissances pendant les années où les innovations correspondantes se sont produites. Ils se rassemblent le long de la courbe de rythme *S*, dont la partie médiane, perpendiculaire aux deux autres parties, se confond avec la radicale.

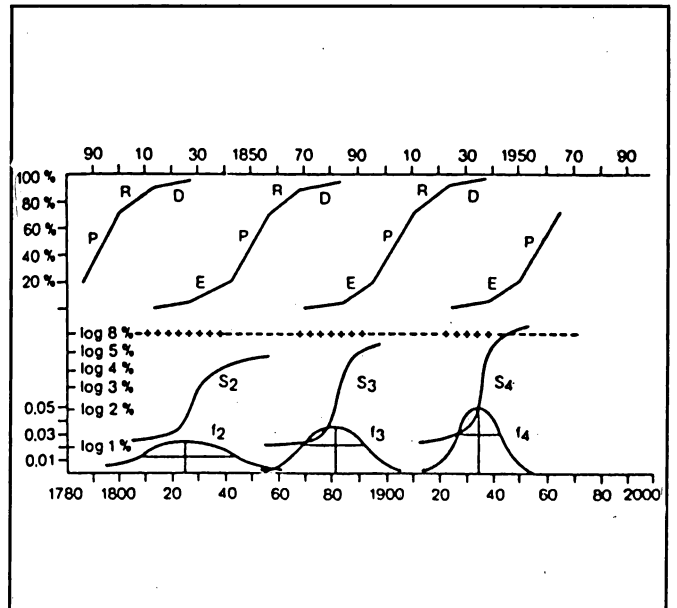


Fig. 18. La dialectique stagnation-innovation.

On peut obtenir la courbe de rythme *S* à partir de la courbe de temps de latence *D* de deux façons différentes. Une méthode consiste à déplacer, par une translation, *D* le long de la radicale, afin d'obtenir *D'*, puis à appliquer à *D'* la transformation définie par $S = 100\%/D'$. L'autre méthode commence par la transformation : $S' = 100\%/D$, puis effectue la translation de *S'*, qui aboutit à *S*.

Quel intérêt présente la courbe de rythme *S* ? Nous dirons qu'elle permet de voir à quelle vitesse se comble le fossé entre théorie et pratique. Jusqu'à l'année radicale, c'est-à-dire le point d'intersection de la radicale avec l'axe du temps, la vitesse moyenne du transfert de connaissances est médiocre. La courbe *S* est plate. Quand elle rejoint la radicale, la courbe du rythme se redresse vers des régions où le progrès s'installe plus rapidement. Ce qui veut dire que l'activité innovatrice reçoit un vigoureux élan accélérateur qui, dans le cas de la révolution industrielle, a rapidement fait augmenter la vitesse du changement, si bien qu'en 1764 le taux de progrès avait plus que doublé.

La courbe *S* de la figure 14 donne à voir ce doublement soudain de la vitesse moyenne du changement pendant l'année radicale 1764. Encore ce plus-que-doublement de l'accélération doit-il être regardé comme une estimation très modérée de l'accélération réelle pendant la phase terminale du transfert de connaissances. En effet, les données qui ont servi à établir *Si* sont des valeurs moyennes, qui tiennent donc compte de tous les ralentissements survenus pendant les premières phases du transfert. Aussi notre postulat selon lequel le taux annuel de progression depuis l'invention fondamentale jusqu'à l'innovation fondamentale est constant, ce postulat conduit-il à sous-estimer les valeurs réelles. Mais comme nous voulons seulement établir que le rythme s'accélère réellement, la comparaison ordinale, exprimée en nombres cardinaux, des degrés d'accélération ne pose pas de problèmes.

Comme nous nous intéressons à la comparaison ordinale des indicateurs de la vitesse du changement à des époques données, nous avons en fait toute liberté d'augmenter ou de diminuer systématiquement les valeurs cardinales des ordonnées de la position de la courbe de rythme (étirement vertical). Ce qui ne change pas la position de la courbe sur l'axe du temps ; seule est modifiée l'impression visuelle d'une accélération radicale de l'ac-

tivité innovatrice.

Nous avons profité de cette liberté (cf. figure 16) pour atténuer plutôt qu'intensifier l'impression d'une adaptation radicale du niveau d'activité.

Afin de réfuter davantage la croyance erronée en l'accélération générale du progrès technique, déterminons maintenant la vitesse moyenne de l'innovation fondamentale lors des trois grandes vagues d'innovations qui se sont produites depuis 1800. Ainsi, avec pour condition que la courbe *D* du temps de latence repose sur la transversale, nous avons soumis les séries de points des figures 9 à 12 à une analyse de régression graphique. Nous obtenons les courbes consécutives de temps de latence *D1*, *D2*, *D3* et *D4* de la figure 13. Ces courbes de durée ont été transférées dans le graphe supérieur de la figure 15, où les quatre transversales qui apparaissent respectivement pendant les années radicales 1764, 1825, 1886 et 1935 ont été superposées, afin de produire une seule ligne de tendance.

Les courbes de temps de latence superposées à cette ligne de tendance se rapprochent d'autant plus de l'angle inférieur droit que les données relatives à ce transfert particulier du savoir sont récentes. Il y a donc un grain de bon sens dans la notion d'accélération générale de la vitesse du changement.

La figure 15 montre la dérivation des courbes de rythme *S1*, *S2*, *S3* et *S4* à partir des courbes de temps de latence *D1*, *D2*, *D3* et *D4*. Etant donné la distance entre deux points et le temps mis pour les relier l'un à l'autre, on peut calculer le degré de vitesse en utilisant des valeurs inverses ; on peut également, avec la même logique, faire dériver les courbes de rythme des courbes de durée. La méthode consiste à faire subir une rotation suivie d'une translation à la transversale oblique (partie supérieure de la figure 15), afin de la superposer à la radicale perpendiculaire (partie inférieure de la même figure).

Les vagues consécutives d'innovations que nous avons observées montrent nettement une variation très particulière et répétitive du rythme. Les points de départ de chaque courbe de rythme se trouvent au même niveau médiocre d'activité innovatrice. La phase initiale dure longtemps : et cela à toutes les époques.

De l'examen des formes de chaque courbe *S*, il ressort que, à partir du moment où la vague d'innovations est bien lancée, les innovations se succèdent à un rythme accéléré dans les secteurs nouveaux. Maintenant, si nous comparons la hauteur des quatre courbes *S*, nous constatons que, d'une vague à l'autre, les innovations consécutives surgissent à un rythme de plus en plus rapide. Il ressort également de cette comparaison que la théorie de l'accélération du progrès technique, dont nous avons vu qu'elle s'applique à certains secteurs seulement, ne s'applique également qu'à certaines époques. Pendant les deux dernières décennies, par exemple, les innovations d'amélioration sont apparues à un rythme indiscutablement plus rapide, tandis que le rythme des innovations fondamentales est probablement resté aussi lent qu'il l'était vers 1750.

A une époque de marasme technique, le rythme des innovations fondamentales passe à la vitesse supérieure tandis que se produit une poussée d'innovations et que des idées nouvelles sont appliquées pour la première fois à la création de branches industrielles nouvelles. Les courbes de rythme révèlent à la fois la vitesse hésitante du changement au début de la vague d'innovations et son accélération à mesure que le temps passe. La figure 16 montre le rythme du changement lors des vagues successives d'innovations fondamentales.

Une vague d'innovations est marquée à la fois par l'accumulation et l'accélération. Quel est le lien entre ces deux aspects ?

Nous pouvons mettre en évidence leur interaction en combinant les figures relatives au rythme du changement innovateur avec celles qui sont relatives à la fréquence des innovations. Ces deux phénomènes doivent se dérouler simultanément à chaque vague d'innovations fondamentales. La figure 17 confirme graphiquement cette interdépendance en faisant apparaître une forte corrélation. Les courbes *P1*, *P2*, *P3* et *P4* représentent les fréquences cumulées des innovations fondamentales (cf. tableaux 1 à 4). La comparaison de ces courbes avec les courbes de rythme *S1*, *S2*, *S3* et *S4* révèle que les deux ensembles de courbes connaissent de fortes accélérations aux mêmes périodes.

Cette corrélation entre fréquence relative et vitesse moyenne des innovations fondamentales est encore plus évidente quand on normalise les valeurs de fréquence (produisant ainsi les dérivées premières des courbes *P1*, *P2*, *P3* et *P4*). Ces courbes en cloche *f1*, *f2*, *f3* et *f4* sont représentées dans la partie inférieure de la figure 18. La comparaison de ces fréquences relatives avec les fréquences absolues de la figure 1 met en évidence l'effet de cette normalisation.

Les caractéristiques des vagues d'innovations apparaissent très nettement figure 18. *Pendant les années radicales 1825, 1886 et 1935, la fréquence relative de l'innovation tout comme l'accélération du rythme d'innovation atteignent leur maximum.*

L'interaction stagnation-innovation

La figure 18 permet d'observer le retour périodique de l'effet d'entraînement sur une période de deux cents ans. La succession d'effervescences, vagues d'innovations ou révolutions industrielles, comme on appelle parfois ces phénomènes, ne peut être comprise que si on la considère dans le contexte économique de l'époque.

Pour décrire le climat socio-économique d'une époque donnée choisie parmi les deux cents dernières années, nous nous reporterons à un modèle de métamorphose. Ce modèle décrit les cycles économiques longs comme des successions de phases : prospérité (*P*), récession (*R*), dépression (*D*) et reprise (*E*). Ces tendances sont reproduites schématiquement figure 18.

De ces tendances, nous pouvons établir que les phases de prospérité du cycle économique cèdent la place à la récession quand le taux d'apparition des innovations fondamentales reste si longtemps médiocre que la stagnation finit par l'emporter sur les impulsions stimulantes de la vie économique. L'économie, en proie au marasme technique, glisse vers la dépression. La formule selon laquelle stagnation égale manque d'innovation décrit le brutal déséquilibre dont souffre le développement économique. C'est une situation très instable que celle du marasme technique ; la croissance industrielle est lente, et le développement des structures socio-économiques s'immobilise parce que les conceptions anciennes ne sont plus adaptées et qu'il faut en établir de nouvelles.

Le manque d'innovations fondamentales signifie que capitaux et main-d'œuvre libérés des branches stagnantes de l'économie ne trouvent pas à s'employer immédiatement. La récession se transforme alors en dépression. Des capitaux redeviennent disponibles pour la recherche et le développement de techniques tout à fait nouvelles ; l'investissement dans les secteurs touchés par la stagnation n'est plus du tout rentable. Bien plus, l'Etat, menacé qu'il est par le problème du chômage, élabore des politiques de plein emploi et soutient les efforts d'entrepreneurs inventifs qui promettent d'améliorer la situation du marché du travail. Si l'on peut dire que la nécessité est la mère de l'invention, alors il faut ajouter que la dépression est la mère de l'innovation fondamentale.

Avec l'accroissement du chômage et la sous-utilisation des capitaux, l'hostilité et la méfiance vis-à-vis d'idées nouvelles, qui n'ont jamais été essayées et qui comportent des risques, disparaissent car on croit que tout peut concourir à une amélioration. Une telle situation produit une vague d'innovations fondamentales, qui dégage l'économie de l'impasse technique où la maintenait la stagnation, et qui mène à la phase de reprise.

La figure 18 montre quand, et à quel rythme, ces vagues ont surgi : aux alentours de 1764, 1825, 1886 et 1935. A chaque fois, plus le processus avançait et plus l'élan était fort. On peut facilement voir comment ce besoin soudain de possibilités innovatrices conduit à la précipitation. L'effet d'entraînement exerce un attrait fulgurant qui a toujours été orienté en priorité vers les techniques nouvelles qui peuvent être rapidement appliquées, plutôt que vers l'innovation sociale. En règle générale, plus la volte-face est récente, plus l'accélération de l'apparition des nouvelles techniques est prononcée.

Un contexte aussi pressant désavantage les possibilités d'innovation qui s'élaborent lentement ; or, les inventions utiles ont besoin de temps pour être menées à terme. La hâte aiguise la concurrence entre différentes possibilités d'innovation à l'intérieur d'un domaine technique donné, et elle intensifie la rivalité entre innovations techniques et non techniques. Aini, la précipitation entraîne une sélection partielle des innovations : des innovations intéressantes, mais lentes, peuvent être évincées par d'autres, plus rapides.

Aujourd'hui, les conditions d'apparition d'une nouvelle vague d'innovations techniques s'accumulent tranquillement dans un contexte de marasme technique. On peut craindre que le climat économique ne se détériore, en dépit des politiques de relance — ou peut-être à cause de politiques de relance erronées — au point que les réserves graves émises contre les à-côtés négatifs de certaines techniques nouvelles soient étouffées. La protection de l'environnement, l'inquiétude suscitée par des modèles de réacteurs atomiques peu sûrs, des systèmes de transport public excessivement coûteux pourraient alors être négligés.

On peut déjà constater un tel renversement des priorités dans plusieurs pays. Ainsi, le désir d'innovations sociales exprimé par la majorité des Allemands a déjà officiellement reculé dans la liste des priorités gouvernementales. Jusqu'à présent, le mépris des innovations sociales et l'intérêt accordé aux nouveaux développements techniques ont toujours prévalu pendant les périodes de relèvement, qui suivent généralement de très près la chute des mouvements libéraux pendant les périodes de stagnation. Ces circonstances ont sans le moindre doute exercé une influence décisive sur le type d'innovation qui allait être retenu.

Les mécanismes du marché souffrent depuis toujours d'une faiblesse constitutive ; ils ont tendance à négliger les mesures à long terme, tel l'investissement dans les innovations fondamentales, parce qu'ils font passer les profits à court terme avant l'instauration d'un bien-être durable. Le marché tend d'abord à se désintéresser des innovations fondamentales, puis à les produire en quantité avec l'aide énergique du gouvernement. Il peut, dans sa précipitation, sélectionner de nouveaux développements techniques à visée parfaitement insignifiantes. Etant donné les forces techniques du monde moderne, de tels développements pourraient bien constituer un problème critique pour le genre humain. C'est là la question fondamentale contenue dans la notion d'impasse technique. Même si nous réussissons à stabiliser l'économie, la technologie nous asphyxiera peut-être.

Voici le drame de l'impasse technique tel qu'il se répète toutes les deux générations. Au début, l'économie ne produit pas

suffisamment d'innovations fondamentales hors des marchés saturés et des industries terrassées par la crise ; elle s'engage alors dans la dépression, si bien que de vastes quantités de capitaux sont sous-investis et que beaucoup de gens ne trouvent plus de travail dans l'industrie. Le manque d'innovations fondamentales se constate nettement à la veille de toutes les crises économiques mondiales ; il est apparent pendant les années qui précèdent 1825, 1873 et 1929. Puis, sous la pression de ces crises et avec l'aide du gouvernement, l'économie met en œuvre toute une masse d'innovations fondamentales (nouveaux biens de consommation, moyens de transport, matières premières et procédés de production) à partir desquelles se créent de nouvelles industries.

Ces réussites substantielles sur le plan technique et organisationnel se partagent pourtant la vedette avec des innovations trop coûteuses ou trop peu sûres, ou avec beaucoup de « contributions majeures à des causes mineures », pour reprendre l'expression de la Cour suprême. Il y a toutes les raisons de croire que, du fait de la précipitation ambiante, des innovations importantes sont évincées par des projets qui n'ont guère pour eux que de disposer d'un marché immédiat. Si ces derniers deviennent trop nombreux, l'économie ne disposera plus de ressources quand se présenteront des innovations utiles, ou encore le public ne voudra plus d'innovation, car il ne peut supporter et assimiler qu'un nombre limité de changements en un temps donné : la vitesse est donc ennemie de la qualité.

Nombre d'économistes ou de responsables de l'économie croient de nos jours à l'accélération générale du changement innovateur à travers l'histoire, et surtout maintenant. Cette croyance implique qu'il existe une sorte de malle aux trésors, bien remplie, et dotée de pouvoirs miraculeux, comme celui d'offrir aux investisseurs de précieuses possibilités d'innovation chaque fois qu'ils en ont besoin, ou de se remplir toujours très vite grâce au « processus du progrès ». Cette croyance selon laquelle on peut créer sur-le-champ de nouveaux types d'investissement et de nouveaux emplois ne repose sur rien ; elle découle d'une analyse empirique du processus d'innovation fondamentale.

Notre conclusion sera donc la suivante : la vitesse du changement innovateur n'augmente pas avec le temps ; elle est généralement inférieure à ce que l'on croit souvent et ne permet pas, dans un contexte de marasme technique, de compenser le médiocre niveau d'investissement dans l'innovation. Qui plus est, quand la vitesse du changement innovateur augmente de façon exceptionnelle du fait du jeu du marché ou de l'intervention gouvernementale, alors les effets secondaires de la précipitation peuvent en fin de compte l'emporter sur les avantages à court terme.

Nous avons ainsi effleuré deux problèmes étroitement liés à l'activité innovatrice de l'économie occidentale : le problème de la stabilité de la croissance économique, et celui de la sélection pendant le changement économique. On ne saurait négliger que les mécanismes du marché se montreront peut-être une nouvelle fois incapables de neutraliser la stagnation des industries traditionnelles, laissant ainsi bien des secteurs de l'économie s'engager dans la crise. On a en outre quelque raison de craindre que, lorsque l'économie se rétablira, elle aura accumulé, en même temps que les innovations techniques, tant de ballast et de détritiques que de nouvelles difficultés pourraient aussitôt menacer sa santé.

On ne dispose d'aucun remède-miracle pour le problème de la sélection pendant le changement économique ; on ne peut que souligner l'existence de ce problème et de son actualité ; on peut craindre également que les gouvernements, obnubilés par le

chômage et la sous-utilisation du capital pendant la dépression, n'en viennent à négliger les réserves émises par le public envers des techniques peu sûres. La création d'emplois et d'investissements nouveaux pour les capitaux dormants a toujours constitué la priorité absolue en période de crise économique. Etant donné les forces destructrices que peuvent déchaîner nos nouvelles techniques, le problème de la sélection se pose aujourd'hui plus gravement que jamais.

Pour résoudre ce problème, il faut évaluer les nouvelles innovations techniques de façon bien plus réfléchie. Opération qui prend du temps. C'est le temps, précisément, qui a manqué lors des grandes dépressions qui ont suivi les années 1820, 1873 et 1929 ; or, ne pas prendre aujourd'hui le temps de réfléchir, voilà le vrai danger qui menace la vie de nos enfants et petits-enfants.

31. P. Sicherl, « Time-Distance as a Dynamic Measure of Disparities in Social and Economic Development », *Xyklos*, XXXI, 1973, pp. 559-578.
32. G. Mensch, « Zur Dynamik des technischen Fortschritts », *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 41, 1971, pp. 295-314.
33. R. Dahrendorf, *Pfade aus Utopia*, Munich, 1967, p. 323.
34. G. Mensch, « Zur Dynamik des technischen Fortschritts », *op. cit.*
35. M. T. Hodgen, *Change and History*, New York, 1952, p. 45.
36. D. Gabor, *Innovations ; Scientific, Technological and Social*, London, 1970, p. 5.
37. N. Lindgren, « A New Process Gropes for a Market », in D. Allison (éd.), *Dealing with Technological Change*, Princeton, Princeton University Press, 1971, p. 133.
38. G. Mensch, « Zur Dynamik des technischen Fortschritts », *op. cit.*
39. Il s'agit du cas de Brünn, jadis « la Manchester du Continent », qu'on peut considérer comme un cas-modèle pour l'Europe centrale.
40. Il y a pourtant une exception : le point (1704, 36), que nous avons laissé de côté parce qu'il était très éloigné de la distribution d'ensemble. Selon la dynamique révélée par la figure 13, on peut facilement identifier ce point comme l'image d'une « retardataire » appartenant à une vague antérieure d'innovations fondamentales (cf. figure 13 pour plus de précisions).

Notes bibliographiques

1. K. P. Schlüter, *Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft*, 129, 1973, pp. 613-633.
2. *Ibid.*, p. 614.
3. J. Kornai, *Antiequilibrium*, Amsterdam, 1971.
4. Illinois Institute of Technology Research Institute, « Technology in Retrospect and Critical Events in Science », *NSF*, 1, p. xi.
5. U. Weinstock, *Das Problem der Kondratieff-Zyklen*, Berlin-Munich, 1964, p. 120.
6. G. Mensch et C. D. Stolze, *Innovation und Industrielle Evolution, Preprint 1/73-29*, Berlin, International Institute for Management, 1973.
7. Kenneth Arrow, « Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention », in R. R. Nelson, *The Rate and Direction of Inventive Activity*, Princeton, Princeton University Press, 1962, pp. 600-625.
8. E. M. Rogers et F. F. Shoemaker, *Communications of Innovations*, New York, 1971, p. 341.
9. W. Goldschmidt, *Exploring the Ways of Mankind*, New York, 1960, p. 115.
10. M. Foucault, *Les Mots et les choses*, Paris, 1966 ; *The Order of Things*, London, 1970.
11. W. I. Cannon, « The Uniformitarian-Catastrophist Debate », *Isis*, 51, 1960, pp. 38-55.
12. J. Agassi, *Towards a Historiography of Science*, Den Haag, 1963.
13. G. Buchdahl, « A Revolution in Historiography of Science », *History of Science*, 1965, pp. 55-69.
14. T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, 1970.
15. J. Schmookler, *Invention and Economic Growth*, Cambridge, 1966-1967.
16. T. S. Kuhn, *op. cit.*, p. 56.
17. *Ibid.*, p. 61.
18. *Ibid.*, p. 109.
19. M. D. Robbins, *Federal Incentives for Innovation*, Denver, Denver Research Institute Report C790 to the National Science Foundation, novembre 1973, p. 4.
20. Otto Eckstein, *The Great Recession (1973-1975)*, Amsterdam, 1978, pp. 1 et 139.
21. M. D. Robbins, *op. cit.*
22. Knut Borchardt, « Zur Frage des Kapitlmangels in der Ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts », *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik* 173, 1961, pp. 401-421.
23. G. Mensch et H. Freudenberger, *Von der Provinzstadt zur Industrieregion (Brünnstudie)*, Göttingen, 1975, pp. 45-46.
24. J. T. W. Newbold, « The Beginnings of the World Crisis, 1873-1896 », *Economic History*, 2, 1932, p. 437.
25. H. Rosenberg, *Grosse Depression und Bismarckzeit*, Berlin, 1967.
26. L. Robbins, *The Great Depression*, London, 1934, p. 171.
27. H. Adams, « The Rule of Phase Applied to History », in E. Stevenson, *A Henry Adams Reader*, Garden City, N.Y., Doubleday, 1958.
28. K. Stamm et P. G. Wilmes, « Produktplanung und Produktentwicklung als zentrale Stabsaufgabe », *Hoesch-Estel*, 2, 1973, pp. 41-50.
29. H. W. Zipse, « Beherrschung der Dynamik mehrstufiger Innovationsprozesse », *Hoesch-estel*, 2, 1973, pp. 51-58.
30. Y. Winters, *Henry Adams, or the Creation of Confusion : The Anatomy of Nonsense*, Norfolk, 1943.