



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org

18038

Distr. LIMITEE

IPCT.107(SPEC.)
1er février 1990

ORGANISATION DES NATIONS UNIES
POUR LE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL

Original : FRANCAIS

PREVISION TECHNOLOGIQUE :
PRINCIPES ET ANALYSE DES METHODES*

par

Pierre F. Gorod
Consultant de l'ONUDI

* Les opinions exprimées dans le présent rapport sont celles de l'auteur et ne reflètent pas nécessairement celles du Secrétariat de l'ONUDI. Ce document n'a pas fait l'objet d'une mise en forme rédactionnelle.

Table des matières

I l'intérêt de la prévision technologique pour l'ONUDI.....	page 1
II la problématique de la prévision technologique.....	2
□ les niveaux de la prévision technologique.....	2
□ les stades de l'innovation et de la prévision technologiques.....	8
□ prévision, évaluation, veille et prospective technologiques.....	13
III Les principales méthodes de prévision technologique.....	19
□ orientation de la prévision.....	19
□ approches intellectuelles.....	23
□ continuités et discontinuités.....	23
● revue rapide des principales méthodes utilisées.....	24
□ les courbes enveloppes.....	25
□ les courbes en S et les modèles analogiques.....	26
□ les méthodes statistiques.....	27
□ les "state of the art".....	27
□ la méthode DELPHI.....	29
□ les matrices d'interdépendance.....	32
□ les scénarios.....	36
□ les matrices de passage "mission-technologie-science".....	37
□ l'analyse morphologique.....	38
IV le futur de la prévision technologique	41

I l'intérêt de la prévision technologique pour l'ONUDI

La première fonction de la prévision technologique du point de vue de l'ONUDI est d'éclairer les choix stratégiques des investissements.

La méconnaissance de l'évolution technologique contemporaine a pu conduire de nombreux pays en développement- et des pays industrialisés- à effectuer des investissements massifs rapidement obsolètes. Ces erreurs de parcours sont évidemment fonction de la fiabilité de la prévision technologique, de la diffusion de ses résultats et des contraintes et degrés de liberté qui ont accompagné les investissements.

C'est ainsi que la mise en place de systèmes informatiques lourds et centralisés pouvaient à l'époque apparaître un choix rationnel avant que n'apparaisse la micro-informatique, beaucoup plus souple et décentralisée. Malheureusement le développement de la micro-informatique n'avait pas été envisagé. Ce qui d'emblée situe la relative faiblesse de la prévision technologique, faiblesse dont il convient de comprendre les raisons.

Des anticipations hasardeuses peuvent avoir aussi des conséquences désastreuses. Ainsi en URSS après la seconde guerre mondiale on espérait que les progrès de la génétique dominée, par les dogmes de Lissenko, allait permettre de faire l'économie d'une coûteuse industrie des engrais. Quarante ans après, cette perspective n'est plus aussi irréaliste avec les progrès de la biologie et de l'ingénierie génétique. De même les pratiques agronomiques nouvelles sont susceptibles d'entraîner de profondes modifications du matériel agricole.

On peut multiplier les exemples d'inadéquation entre l'évolution technologique et la réalisation des investissements.

La seconde fonction de la prévision technologique est d'envisager les développements concurrentiels dans la compétition économique internationale.

Cette fonction ne concerne plus seulement l'évolution intrinsèque de la technologie et des choix isolés en regard des perspectives de celle-ci, mais *en plus*, l'évaluation des potentiels de changements technologiques des compétiteurs, entreprises rivales, pays adversaires.

Avant la crise économique, l'endettement massif des PVD, les politiques d'ajustement structurel, cette fonction aurait paru secondaire pour de nombreux pays en développement. Il n'en est plus de même aujourd'hui où, un peu partout, l'ouverture au marché international, le démantèlement des barrières protectrices des industries nationales, s'effectuent -au demeurant parfois non sans "casse". La croissance des exportations devient un impératif commun imposé par les rigueurs de l'équilibrage des comptes du commerce extérieur. Comme beaucoup de PVD occupent les mêmes créneaux de potentialités d'ex-

portation vers les pays industriels à devises fortes où les exigences de qualité des produits sont élevées, il s'ensuit une uniformisation des standards techniques, une plus grande sensibilité, dépendance et fragilité des pays en développement à l'évolution et aux mutations technologiques, et, en conséquence, la nécessité d'être des partenaires informés des perspectives technologiques. D'où un rôle nouveau important susceptible d'être assumé par l'ONUDI.

Par ailleurs dans les industries où l'informatisation de la production et la robotisation ont pu se développer, le mouvement de délocalisation des industries du Nord vers le Sud est maintenant inversé, les avantages comparatifs tenant au moindre coût de la main d'œuvre n'ont plus d'intérêt. Pour les "nouveaux pays industriels", notamment, le maintien dans le club des pays industriels requiert l'adoption des technologies d'informatisation de la production. Le centre de réflexion de la prévision se déplace pour eux des perspectives technologiques des développements de la robotisation vers celles de la maîtrise de ces technologies dans les processus de production.

La prévision technologique, quelque soit son état actuel, fait désormais partie des instruments indispensables de la politique industrielle, dans la mesure où la technologie est devenue la variable stratégique déterminante.

II la problématique de la prévision technologique

Pour expliquer les différentes méthodes de prévision technologique et évaluer leurs résultats, il faut en comprendre la problématique qui est en définitive, celle du système technique. Ceci conduit à poser différentes questions.

- les niveaux de la prévision technologique;
- les stades de l'innovation technologique et de sa prévision.
- les notions connexes et les différences entre prévision, évaluation, veille et prospective technologiques;
- la technologie considérée comme un système autonome ou un construit social.

□ Les niveaux de la prévision technologique

La prévision technologique couvre des niveaux très différents. Ils sont en correspondance avec ceux de la pyramide technologique. On peut analyser celle-ci selon le modèle suivant¹ (voir page suivante).

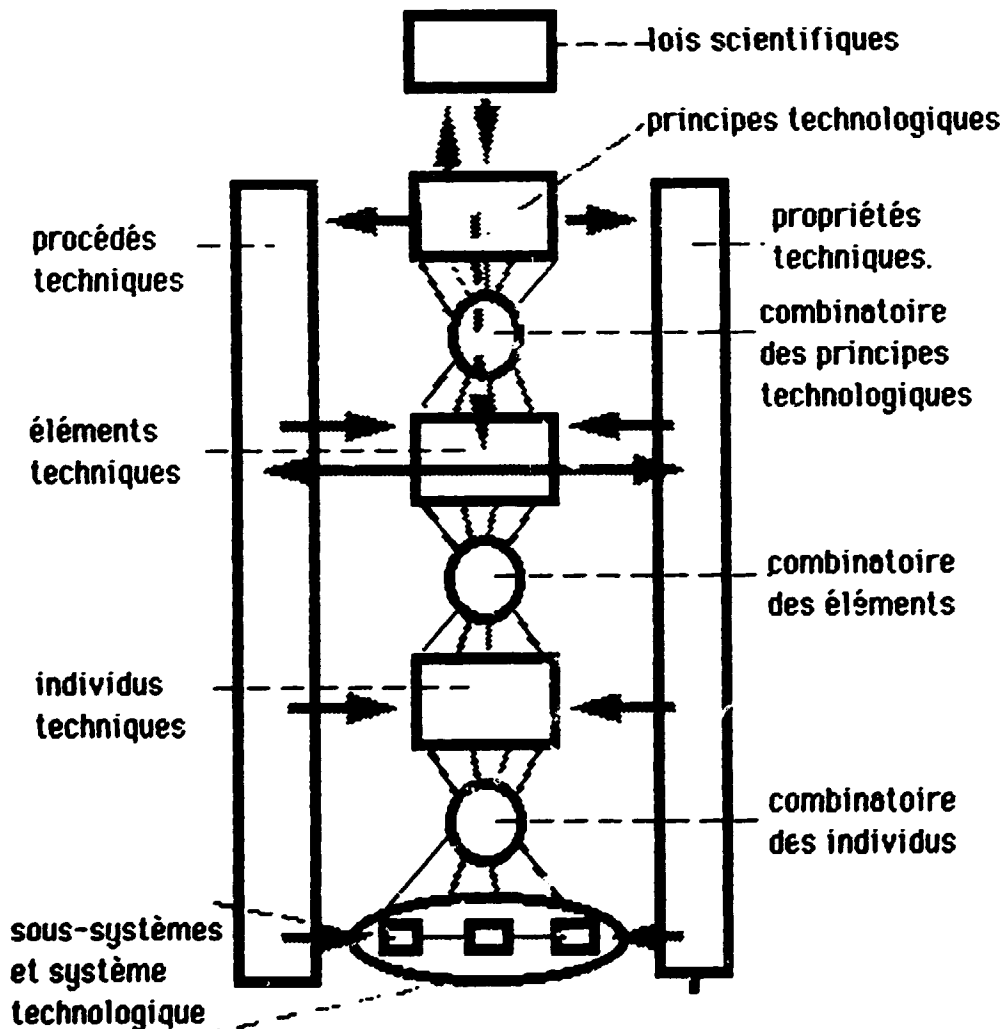
Il n'est pas question ici de traiter de la construction de ce modèle, on se bornera à énumérer les différents niveaux de "l'arche" technologique:

- * les principes technologiques dérivés ou antérieurs aux lois scientifiques
- * les propriétés technologiques qui sont liées aux principes technologiques

¹ Pierre F. GONOD "la technologie générale: projet d'encyclopédie systémique de la technologie" Analyse de systèmes, volume XIV, N°4, décembre 1988.

- * les procédés qui sont "les manières de faire"
- * les éléments qui sont les vecteurs de la technologie: par exemple le transistor, le micro-processeur, le laser....
- * les objets techniques qui intègrent dans des combinaisons spécifiques les principes, propriétés, éléments, procédés
- * les sous-systèmes et technologies génériques transversales, le système dans sa globalité.

modèle de la structure du système technologique



□ *la prévisibilité technologique varie selon les niveaux du système. Ce phénomène n'a pas jusqu'ici été souligné. sa mise en évidence suppose, il est vrai une modélisation préalable du système technologique.*

* au niveau des lois scientifiques la découverte de nouveaux principes n'est pas

prévisible. Les lois et constantes scientifiques sont en nombre limité: de l'ordre de 10^2 . La découverte de lois scientifiques fondamentales, après un lent procès de reconnaissance par la communauté scientifique, conduit à l'émergence de nouveaux paradigmes.

* les principes technologiques sont le résultat de l'expérience de pratiques millénaires qui ont le plus souvent précédé l'explication et la codification scientifiques. Mais aujourd'hui la plupart se rattachent au corpus scientifique. Ils dérivent, par exemple, des notions fondamentales de la statique, de la dynamique, etc. et s'accompagnent de règles de calcul. Les principes technologiques peuvent ou non s'associer entre eux. Ainsi la combinaison des principes de l'électrostatique et de la photo-conductivité a abouti à celui de la xénographie, qui n'est pas la somme des deux principes mais qui possède des propriétés nouvelles. Les principes technologiques sont eux aussi en nombre limité, vraisemblablement de l'ordre de 10^2 . Mais si l'humanité a découvert empiriquement un grand nombre de principes de son activité technique, celle-ci s'enrichit de l'apparition d'autres principes -la superconductivité par exemple- qui élargissent et complexifient le système technique. Les principes technologiques sont à la fois expression des lois de la nature et moyen d'action sur elle. Dans la mesure où désormais ils dérivent de l'activité scientifique leur prévisibilité est liée à cette dernière.

* principes et propriétés technologiques sont étroitement liés, ils peuvent parfois se définir mutuellement, l'une étant la condition de l'autre. L'exemple de la superconductivité illustre cette dialectique:

Ainsi les propriétés de certains matériaux et du principe de la superconductivité vont de pair, à son tour la découverte de nouveaux superconducteurs questionne la théorie (au demeurant établie depuis longtemps). Après la percée technologique réalisée en octobre 1986 par Alex Müller et Georg Bednorz du Zurich research center d'IBM qui découvrirent des céramiques avec des températures de transition de la superconductivité jamais obtenues jusqu'alors, les barrières rencontrées par les physiciens pour faire descendre ces températures à des degrés permettant leur utilisation industrielle sur une large échelle soulèvent des questions théoriques inabordées jusqu'alors. Si la date de la percée technologique était imprévisible, l'événement n'était pas improbable en raison de l'existence d'un principe connu et des programmes de recherche inventoriés. Mais, ensuite, la butée scientifique qui s'est révélée et qui traduit un degré d'ignorance sur le plan fondamental, ne pouvait évidemment être prévue. La fantastique excitation des physiciens qui a suivi la découverte des prix Nobel est retombée, et avec elle les extrapolations hâtives sur les perspectives d'applications de la supraconductivité.

Cet exemple montre la *complexité de la prévision technologique* et de son évaluation.

Par ailleurs, il faut distinguer les "propriétés naturelles" qui sont des données pour l'activité humaine des "propriétés artificielles", créées, fruit du processus d'artificialisation qui caractérise la constitution de la technosphère au sein de laquelle nous vivons. Alors que la table des éléments chimiques est en nombre limité, les propriétés technologiques ne constituent pas un système clos. Ainsi qu'il a été dit la rencontre de deux propriétés peut engendrer une propriété nouvelle, de plus la plasticité des nouvelles technologies ouvre la

faculté de faire des matériaux "à la commande" -les matériaux composites- dotés de qualités pré-déterminées. Ce qui entraîne un retournement de situation de la chimie. Dans ce cas la prévision est d'essence normative et la connaissance des programmes de R&D est un composant essentiel de la prévision. On envisage de faire des banques de données des propriétés. Leur nombre est vraisemblablement de l'ordre de 10^3 .

Selon la nature même du progrès technique il y a donc différents cas de figure de la prévision.

* la technique est faite de procédés opératoires, rigoureux, qui sont des "manières de faire". Chaque procédé est une combinaison spécifique de mise en œuvre de principes et propriétés technologiques par des hommes dotés d'outils, de machine, d'énergie, d'information, de règles, de programmes, selon des séquences ou des ordres d'opérations non arbitraires. *Chaque procédé est une configuration organisée*. Chaque propriété pouvant donner lieu à plusieurs procédés techniques alternatifs, ceux-ci sont évidemment plus nombreux, si l'on retient une estimation moyenne très large de 10 procédés par propriété, on arrive à un ordre de grandeur de 10^4 et au niveau de ramifications plus fines de procédés technologiques spécifiques sans doute de 10^5 . Les possibilités d'évolution intrinsèques des procédés sont très grandes et la combinatoire des procédés technologiques est immense. Aussi, même en l'absence de progrès scientifiques, le système technologique pourrait au niveau de ses procédés continuer à s'auto-développer durant longtemps. Ce phénomène amène souvent à considérer le système technologique dans une position d'autonomie, ou de semi autonomie par rapport au système scientifique. *Il s'ensuit que la prévision de l'évolution des procédés technologiques est moins imprévisible que l'évolution scientifique, abstraction faite de l'apparition de ceux qui sont en ligne directe de percées scientifiques imprévues. Mais ceci implique de considérer que la technologie se développe seulement selon sa rationalité propre. Position insoutenable à d'autres niveaux du système technique.*

* aussi surprenant qu'il paraisse il n'existe pas de classification des éléments qui sont les vecteurs du transfert des contenus de la technologie. Un nombre limité d'éléments usuels sont les premiers matériaux de l'édifice technologique qui s'est constitué au cours de l'histoire. Leur nombre est probablement de l'ordre de 10^3 . Les mécanismes, dispositifs, appareillages, ce que les anglosaxons appellent les "key devices" peuvent être considérés comme des éléments. Il en va ainsi pour la roue, le levier, le coin, le fil, le filet, la corde, le nœud, la chaîne, le ressort, le pàlier, l'engrenage, la valve, le coin, la manivelle, le pendule, le gyroscope, la pompe à air, le régulateur de vitesse, le roulement à bille, l'électro aimant, la cellule photo-électrique, les lentilles optiques et magnétiques, et, plus récemment, l'aérosol, le transistor, le microprocesseur, le laser..... Ces éléments entrent comme composants des objets

techniques et sont répandus à des millions, voire des milliards d'exemplaires. La plupart des éléments ont été créés empiriquement par l'activité humaine. On ne réinvente pas la roue. Ceux qui naissent désormais sont le résultat d'une activité à base scientifique. Ils en ont le même *caractère d'imprévisibilité*, et de fait, la découverte de ces éléments majeurs de notre époque que sont, par exemple, le transistor, le micro-processeur et le laser, n'avaient pas été prévue.

* les objets et individus techniques constituent l'univers familier où nous vivons: objets de l'environnement électro-ménager, outils et machines, instruments de bureau, moyens de transports, appareils de toutes sortes. Leur nombre est de l'ordre de 10^6 . Estimation corrélée par les 5 à 8 millions de types de machines et instruments, par le nombre vraisemblablement voisin de biens de consommation et par les 7 millions de molécules synthétisées par les chimistes. *Création sociale les objets techniques sont soumis non seulement aux lois de la nature mais aussi à celles de la société, de l'économie aussi bien que de la psychosociologie.* Ces dernières révèlent le caractère symbolique, culturel, voire religieux dont sont chargés des catégories d'objets. L'histoire de l'automobile et de la bicyclette montre comment leur conception ont été influencés par les symboles et les signes sociaux avant d'évoluer vers une rationalité technique accentuée. La prévision technologique des "choses de tous les jours" relève de celle de l'innovation de produit et de la psychologie du "desing". C'est sur ce terrain que la prévision technologique débouche sur le marketing et les stratégies industrielles.

A l'extrémité se manifeste l'autre force en présence: la *rationalité technique* qui modèle les objets. Des objets ne sont pas soumis à l'influence symbolique, ce sont, par exemple, les instruments scientifiques tels le microscope, ceux de la médecine moderne, le scanner, les échographes, les spectoscopes à résonance nucléaire.

Les objets se répartissent entre ces deux pôles et leur statut évolue dans le temps

Au niveau des objets techniques il faut aussi considérer à la fois la complexité de leurs fonctions et celle de leur fabrication. Des objets sont mono ou pluri-fonctionnels. Ils ont des degrés différents de facilité d'utilisation. La complexité d'utilisation a pu être réduite et transférée aux organes de la machine ou à son logiciel (ex les micro-ordinateurs). Ils sont constitués d'une seule pièce ou d'une multitude qui peut parfois s'exprimer en puissance de dix: 10^3 pour une automobile, 10^6 pour un vaisseau spatial, sans doute le plus complexe des objets techniques. Leurs éléments sont relativement indépendants ou, au contraire, strictement interdépendants. Il conviendrait de les classer selon ce critère. Leurs performances suivent des échelles: Ainsi le passage de l'industrie mécanique de précision à la mécatronique est aussi celui d'un chan-

gement de l'échelle du 1/10 - 1000 de millimètre au 1/1000-1/10000, celui du microscope optique au microscope électronique est une multiplication du pouvoir de résolution par 10^3 , voire 10^4 .

Ces ruptures sont liées à des changements de principes technologiques, les *nouvelles lignées technologiques* se développent jusqu'à saturation dans un espace délimité par les contraintes physiques : ex. le microscope électronique approche maintenant des limites de sa saturation, les progrès sont attendus désormais d'une autre génération technologique par la mise en œuvre d'autres principes, "l'effet tunnel". *Ainsi la prévision technologique des objets est aussi celle des ruptures, des mutations, de l'apparition de nouvelles "lignées technologiques"*. Comme ces mutations, susceptibles de procurer des avantages concurrentiels décisifs, sont l'objet d'activités de R&D organisées systématiquement, les prévisions technologiques ont le *caractère normatif* de l'objectif visé.

Là encore la prévision technologique présente différents cas de figures.

□ les sous-systèmes technologiques sont des ensembles technologiques intégrant des propriétés différentes. Ainsi la *mécatronique* est le résultat de la fusion de la mécanique et de l'électronique, la *photonique* comprend les technologies de pointe fondées sur l'interaction lumière-matériau et groupe les lasers, les fibres optiques, les systèmes d'acquisition de traitement et d'affichage des données, les systèmes photovoltaïques et solaires. La *bureautique* et le *génie génétique* peuvent être aussi considérés comme des sous-systèmes technologiques en raison de leur caractère intégrateur de diverses technologies. La *robotique* est, elle aussi un système transversal, agrégeant dans une combinaison cohérente diverses technologies. Ces sous-systèmes sont parfois assimilés à des "technologies génériques", caractérisées par leur proximité avec les principes scientifiques.

La prévision de ces sous-systèmes est une synthèse difficile qui doit tenir compte de l'évolution conjointe des technologies impliquées, des facteurs limitants tenant au moindre développement d'un des constituants. Mais au niveau de ces ensembles il est clair que la prévision ne peut plus seulement considérer le développement intrinsèque des technologies et la cohérence de leur association, elle doit incorporer les facteurs économiques et sociaux qui vont jouer le rôle de conditions matrices ou permissives des combinaisons techniques envisageables.

L'agrégation en sous-système est une opération mentale à postériori. Il en est de même du système. Mais ces abstractions sont fondamentales pour la compréhension de l'ensemble. Les différents systèmes technologiques qui se sont succédés ont comme caractéristiques communes une cohésion et des cohérences et une logique ou un *paradigme dominant*. Il y a eu une logique mécanicienne dominante, une logique électrotechnique qui ont marqué l'ensemble du dévelop-

pement technique de leur époque. Il y a aujourd'hui l'émergence de l'informatisation. En d'autres termes, des principes techniques ont abouti à la création de sous-systèmes qui ont opéré transversalement les activités, ils se sont imposés et ont eu un effet d'entraînement sur l'ensemble. Cet entraînement résulte d'un processus complexe. Les principes techniques ne sont pas indépendants des paradigmes existants, mais réciproquement ils en sont un constituant. Ils exercent une action d'imposition sur les techniques dérivées d'autres principes, et, réciproquement, ils ne peuvent émerger que grâce à l'existence d'autres technologies qui sont les conditions permissives de constitution des technologies qu'ils engendrent et qui ne peuvent se diffuser que grâce à un ensemble de conditions socio-économiques. Ce jeu est orienté par un paradigme, c'est-à-dire par les *nouveaux principes qui vont gouverner le comportement des innovateurs et des décideurs*, donc des acteurs sociaux décisifs. La micro-informatique et l'informatique ont un contenu "révolutionnaire" qui façonne le système technologique actuel. Peut-être l'étape suivante sera-t-elle marquée par la biotechnologie, c'est-à-dire les technologies permises par le développement de l'informatique et la conquête de l'infiniment petit, qui, en maîtrisant la complexité du vivant opère un retour par l'artificialisation vers le "naturel". L'entendement du mouvement actuel de transformation, qui met en jeu des forces complémentaires ou antagonistes, requiert une dialectique complexe.

La prévision au niveau du ou des systèmes technologiques est donc largement influencée par le paradigme dominant, et, comme la technologie est considérée sinon comme la variable fondamentale de la société contemporaine, du moins comme une variable essentielle, il s'ensuit que les études globales du futur seront à leur tour sous l'influence du paradigme technologique.

□ Les stades de l'innovation et de la prévision technologiques.

Une source de confusion en matière de prévision tient à l'imprécision de son objet même. *De quoi parle-t-on?* Il n'y a pas seulement le niveau de la technologies mais les stades de son développement à considérer. Le système technologique est un ensemble résultant de techniques de différentes générations qui coexistent plus ou moins durablement, où certaines sont au stade de l'idée, d'autres du laboratoire, de l'expérimentation sous forme de prototype, d'autres émergent sur le marché avec un succès commercial, ce sont les innovations proprement dites, celles-ci sont l'objet d'incessants développements et améliorations soit du produit, soit du procédé, soit des deux. Ces perfectionnements peuvent avoir une grande importance économique. Les innovations majeures donnent naissance à des lignées de produits dont l'amélioration se poursuit jusqu'à ce que les possibilités de développement arrivent à saturation. Une innovation a un réel impact que si elle donne lieu à un

procès de diffusion. Les systèmes technologiques ne se constituent qu'au terme de la diffusion d'innovations techniques dans les systèmes productifs². La diffusion a été définie comme le processus selon lequel une innovation se propage comme idée, produit ou procédé. Leur adoption est une décision. Différentes catégories d'adopteurs sont observés dans le temps selon une courbe qui épouse celle de la "vie" du produit ou du procédé, sa naissance, sa croissance, sa maturité, son déclin, sa mort. Des décalages s'observent entre entreprises, industries et pays. Le concept de diffusion englobe celui de transfert technologique dans le sens que le transfert intervient toujours à une des phases de diffusion de l'innovation. Mais si l'on considère qu'il n'y a véritablement transfert que si il y a assimilation de la technologie par le récepteur, la diffusion des produits et des procédés ne signifie pas qu'il y ait ipso transfert. Comme la technologie est pouvoir, son transfert sera plus restrictif généralement que la diffusion des produits. Le transfert du fait des formes sociales "aliénée", "incarnée", et "capitalisée" de la technologie est un processus de diffusion entravé. C'est avec les mécanismes des transferts que le système technologique se concrétise et est puissamment opéré par les systèmes économiques et politiques, par la logique de l'échange composite, du conflit-coopération et des rapports de force entre partenaires, émetteurs et récepteurs de la technologie. C'est par eux que le système technique international se scinde en systèmes nationaux.

Il s'ensuit que *la prévision technologique pourra porter sur des "moments" temporels différents du système technologique:*

- ◊ La probabilité d'apparition d'inventions
- ◊ Le processus de la création d'innovations
- ◊ Le processus de développement des innovations existantes
- ◊ Le processus de la diffusion et du transfert d'innovations couvrant différents stades de leur naissance à leur disparition.

Ces prévisions comportent des différences profondes qui ne sont pas suffisamment soulignées dans la littérature.

● La prévision des inventions est par nature impossible. L'invention introduit dans l'ordre technologique un désordre créateur et imprévisible. Cependant de grands visionnaires dotés d'une forte culture technologique, tels Léonard de Vinci ou Jules Verne, peuvent anticiper remarquablement sur les développements futurs. aujourd'hui la science-fiction continue à jouer un rôle utile, fruit d'une imagination fondée sur des prémisses scientifiques, elle stimule en retour la capacité de l'imagination. Des méthodes de créativité destinées à débrider le bloc mental existent, non pour prévoir mais pour imaginer et inventer.

² P.F. GONOD "le système technologique" dans le *Traité d'économie industrielle*, Economica, - 1968.

● La création d'innovations est à notre époque un mécanisme organisé. L'innovation est toujours la rencontre d'une technique praticable avec un besoin latent. Si le hasard joue un rôle dans la découverte, ce rôle est plus réduit quand il s'agit de créer de nouveaux produits ou procédés répondant à un besoin, une attente, ou une stratégie technique et industrielle. Que ce soit au laboratoire ou à l'atelier, l'innovation est un objectif explicite à la réalisation duquel correspondent des activités spécifiques. En conséquence *la prévision de l'innovation technologique concerne trois plans* : 1° l'exploration des besoins latents et de leur signification pour les changements techniques à venir; 2° l'exploration des espaces de développement technologique et leur signification pour la définition d'autres produits ou procédés (c'est cette exploration que, comme on le verra plus loin, certains auteurs américains nomment "state of the art" de la technique, qui mesure ses potentialités actuelles de développement); 3° le plan d'action normatif, l'organisation des activités devant conduire au résultat voulu.

Le premier plan correspond à l'approche "demande pull", la seconde à celle de la "technology push", la troisième à la planification. Dans la pratique ces trois formes le plus souvent s'associent. Dans les entreprises modernes elles recouvrent les activités de marketing, gestion de la technologie et management stratégique.

● Le développement des innovations existantes prolonge les activités précédentes. Les innovations se déploient selon deux modalités principales: 1° l'utilisation de leurs propres potentialités, 2° l'incorporation d'éléments, propriétés ou procédés compatibles qui créent autour de l'innovation initiale un bourgeonnement, une grappe, pouvant, à l'exemple des technologies modernes, aboutir à la création par fusion de nouveaux champs technologiques.

La prévision de l'espace technique de développement d'une innovation n'est pas évidente, même si elle concerne en substance la logique intrinsèque de la technique, ses paramètres, leur combinatoire et leurs limites de saturation. Elle suppose des instruments analytiques et des informations qui ne sont pas toujours disponibles.

La prévision des éléments susceptibles de s'associer à l'innovation initiale n'est pas non plus évidente. Elle suppose, d'abord, une maîtrise de l'architecture technique de l'innovation originale et de sa capacité évolutive, ensuite, une connaissance des éléments techniques extérieurs existants ou anticipés susceptibles de s'y agréger.

Le *développement* de l'innovation technologique est en fait un *processus continu*. L'expérience acquise dans des lignes de production est transférée dans les suivantes qui s'enrichissent d'autres apports. La production des familles successives d'avions Boeing, par exemple, illustre comment les programmes ont incorporé le flux continu des nouvelles technologies de l'aérodynamisme, des

structures, des systèmes de navigation et de propulsion.

Les innovations technologiques suivent ainsi des trajectoires multiples. Celles-ci ne sont pas déterminées par la seule logique de constitution et de fonctionnement de la technologie mais aussi par leur *logique d'utilisation*. La tendance générale étant de simplifier l'utilisation pour les usagers, le fabricant devra soit simplifier son produit, soit incorporer le maximum de complexité dans des organes à fonctionnement automatiques ou faire les deux. La logique d'évolution des innovations sera évidemment fonction du caractère du marché et du degré de compétition. Dans les conditions de la compétition sauvage et des incertitudes de la guerre économique, la seule certitude pour survivre est le plus souvent de mettre en œuvre un programme de R&D. D'où l'impérieuse nécessité d'être informés des préparatifs et des avancées adverses. Mais il ne s'agit plus à proprement parler de prévision mais de ce qu'on nomme en français la *veille³ technologique*

● La prévision de la diffusion de l'innovation technologique est le dernier stage de la prévision technique. Ici la "socialisation" du procès technique prend toute sa force. Une invention ou une innovation peuvent être des faits remarquables, mais elles ne deviennent des événements pour la société que si elles sont diffusées à un niveau significatif. Les études de marketing prévisionnel ont pour objet d'envisager le marché des nouveaux produits, ses phases de croissance, de maturité et de déclin. Exercice périlleux ! Non seulement la pénétration des produits dépend de la dynamique de l'économie mais de bien d'autres facteurs. Ainsi le boom de la micro-informatique a conduit à prévoir une importante croissance de "l'informatique ménagère", du "home electronics", la réalité n'a pas été à la rencontre des prévisions et l'écart a coûté très cher à de grandes entreprises. A l'inverse le développement en France de la messagerie électronique prolongeant les services du téléphone -le "minitel" qui équipe 5 millions d'usagers- n'avait pas été prévu et apparaît une sorte de phénomène de société. On est ici au cœur de la dialectique des mécanismes de l'innovation. Car souvent les programmes de R&D pour créer ou développer l'innovation ne sont entrepris que si la prévision de leur diffusion laisse apparaître d'intéressantes perspectives. *La prévision subordonne la création.*

Les structures organisationnelles favorisent ou entravent la diffusion. Ainsi il est connu que des cloisons verticales à l'intérieur ou une structure verticale institutionnelle sont un obstacle déterminant à la diffusion du progrès technique. Il ne suffit pas d'avoir des découvertes ou des innovations en laboratoire ou en usine pour que celles-ci soient effectivement transférées. Aux risques de l'innovation s'ajoutent ceux de leur adoption. Les structures sociales, les

³ l'expression "veille" technologique ne paraît pas avoir son exact équivalent en langue anglaise; "watch fulness" serait une expression approchée à laquelle il faudrait adjoindre l'image du déploiement permanent d'une antenne sensible

systèmes de rémunération en vigueur peuvent être de puissants freins.

L'innovation est protégée par la législation sur la propriété industrielle. Les *transferts technologiques* ne constituent donc pas un "marché pur", mais un échange composite, c'est-à-dire un mixte de transfert libres et réciproques et de relations de pouvoirs qui exprime un conflit-coopération, une lutte-concours. La régulation des transferts est une arme dans la guerre économique-et dans la paix armée- pour les entreprises et pays dominants. La politique d'auto-rétention peut être bousculée par les difficultés économiques, par la réduction des marchés qui peut amener à vendre des technologies. Le licencing de technologies avancées peut être calculé en fonction, d'une part, des progrès estimés dans une période de temps donnée par le partenaire-concurrent licencié, d'autre part, des propres progrès du licenciant. D'où la nécessité d'une double prévision.

- les temps de réalisation des stages du procès technologique constituent généralement la partie la plus faible des prévisions. Sur estimés il y a une trentaine d'années, il ont tendance maintenant à être sous estimés. L'optimisme étant commandé souvent par la tentation de l'analyste d'aller dans le même sens que les espérances de son client. Les temps de la recherche et du développement sont sous la dépendance de facteurs techniques et scientifiques, dans la mesure où certains de ceux-ci ne sont pas maîtrisés. Ils sont en partie prévisibles. Mais la plus grande difficulté réside dans l'estimation des temps de la diffusion. Ici le jeu n'est plus seulement contre la nature mais un jeu sociétal qui requiert une approche plus large.

- les "cycles de vie" de la technologie, de la structure industrielle, du marché et du management stratégique, sont intégrés les uns les autres. Il y a des rapports étroits à chaque stage entre ceux-ci et l'échelle du procédé technique, le niveau requis de la main d'œuvre, la logistique de la production, la stratégie d'investissement, l'intensité du capital, la localisation des installations de production, l'organisation de celle-ci, la facilité d'entrée dans les nouvelles activités, la nature et la hauteur des barrières, l'élasticité des prix, l'intensité de la compétition, etc... La logique de ces articulations centrées autour de la technologie n'est pas suffisamment prise en compte. Elle est pourtant d'une importance décisive pour les projections industrielles des pays en développement. Les "cycles de vie" devraient être une base de la prévision et des stratégies industrielles.

En définitive il faut distinguer les prévisions technologiques selon les étapes du procès de l'innovation, qui présentent des possibilités inégales d'anticipation et mettent en œuvre des méthodes différentes. La littérature courante malheureusement n'analyse pas suffisamment ces différences.

□ Préviation, évaluation, veille et prospective technologiques

Ces notions connexes doivent être explicitées, leur apparition et leur histoire font partie de la compréhension du système technologique.⁴

Après qu'on ait constaté que les techniques de prévision n'avaient pas réalisé la "percée" attendue, le centre d'intérêt s'est déplacé au cours des années 70 vers "l'évaluation technologique", c'est-à-dire l'estimation de l'incidence potentielle des techniques nouvelles sur la société. Ce mouvement nécessitait de resituer l'effort de réflexion dans un contexte socio-économique et géopolitique. Ce recentrage tient à une conjonction de raisons : la crise économique et sociale des pays industriels, les inquiétudes suscitées par les technologies nouvelles sur l'emploi, le poids financier croissant des grands programmes technologiques et le désenchantement suivant une période de croyance mythique dans le pouvoir de la science et de la technologie à transformer la société, la prise de conscience d'une partie de l'opinion des grands risques industriels et des désastres écologiques. Avec l'évaluation la prévision technologique prenait ainsi une dimension politique, au sens le plus général du terme. Une opportunité s'ouvrait donc de reconnaître la technologie comme un construit social et de faciliter la démocratisation du processus de prise de décision. Sans être négatif le bilan reste, là aussi, très mince. D'autant que le "technology assessment", à peine né allait être soumis aux distorsions des pouvoirs politiques et des institutions pour lesquels sa récupération permettait de justifier les décisions prises ou les projets soumis à financement. A d'autres périodes la manipulation des taux d'actualisation remplissait la même fonction d'alibi ou d'artifice. L'interprétation sociale de l'émergence de l'évaluation est éminemment critique. Il ne s'agit plus de s'en remettre "à la main invisible" pour décider des choix technologiques majeurs et des investissements en R&D, il faut éclairer ceux-ci par leurs implications et conséquences. L'évaluation est ambivalente. Elle peut aussi bien porter sur l'appréciation d'activités techniques passées que sur celles projetées. S'attachant aux relations technologie-société, elle embrasse un champ plus large que la prévision courante. On n'a pas suffisamment insisté sur le *changement de dimension intellectuelle* qu'impliquait l'évaluation par rapport à la prévision technologique. Evaluer soulève les questions du choix du modèle théorique de référence, des différentes méthodes de mesure du progrès technique, de la taxinomie des changements techniques, de la stabilité et la régulation des industries, des effets d'entraînement de l'innovation, du niveau de l'évaluation, du choix, du nombre et de la signification sociale des critères retenus pour une évaluation "ex-post" ou "ex-ante". Il s'agit donc bien d'un changement intellectuel qualitatif qui a la signification d'un

⁴ d'après l'analyse de P.F.GONOD "prolégomènes à la prospective technologique" Analyse de systèmes, volume XV, N°2 juin 1989.

dépassement. Mais pour que ce dépassement soit réussi il aurait fallu qu'une base solide d'un corps méthodologique de la prévision technologique ait été disponible et qu'aient été forgées les méthodes permettant d'intégrer les nouvelles dimensions et d'opérer la plus grande complexité. A défaut le dépassement devint une fuite en avant.

Dans ce contexte la pratique de la "veille technologique" a la signification d'un repli réaliste aussi bien que la reconnaissance de l'échec de la prévision et de l'évaluation. Face à l'incertitude de l'évolution, à la compétition internationale sauvage et à la rapidité du changement des techniques, la seule certitude est qu'il faut être constamment et rapidement informé sur les projets et réalisations des autres, que ce soit dans l'industrie ou dans le domaine militaire. Ainsi ont été formalisées des pratiques de management incluant la veille technologique. Mieux que la prévision, le "temps à quatre vitesses" est une approche où la veille technologique est partie d'un "business intelligence system" branché sur l'immédiat. Les autres vitesses sont un plan à trois-cinq ans, des scénarios à dix-quinze ans, une volonté d'existence, un projet d'entreprise à très long terme. Après une période de discrédit qui a frappé la prévision générale impuissante à anticiper la crise économique et sociale on notera le retour en force de la prospective, tout au moins pour les grandes entreprises. Ce phénomène s'explique par la durée de la crise conduisant à la recherche d'issues et d'autres approches. La "planification stratégique de l'entreprise" résulte de cette demande.

La veille technologique qui s'est imposée sous le joug des nécessités et des possibilités réelles pourrait être la base logistique d'un nouvel effort de réflexion de la prévision et de la prospective technologiques. Comment, au demeurant, faire des prévisions sans disposer d'un inventaire systématique des connaissances technologiques?, comment faire de la prospective sans identifier les programmes de développement qui vont exprimer la stratégie des acteurs? Le repli obligé peut donc être salutaire en permettant la collecte d'une information indispensable, à condition toutefois de ne pas être effectuée seulement au sein des grandes entreprises⁵. *L'existence d'une base organisée d'information technologique est une condition permissive de la prévision*

La prospective se distingue de la prévision. Les différences sont résumées ci-dessous:

□ prévision:

Vision: parcellaire "toutes choses égales par ailleurs";

Variables: quantitatives, objectives et connues;

Relations: statiques, structures constantes;

Explication: le passé explique l'avenir;

⁵ le système des Nations Unies, et l'ONU... en particulier, ont un rôle à jouer dans ce domaine.

Avenir: unique et certain;

Méthodes: modèles déterministes et quantitatifs (économétriques) (mathématiques);

Attitude face à l'avenir: passive ou adaptative (avenir subi)

□ **prospective:**

Vision: globale "rien n'est égal par ailleurs";

Variables: qualitatives, quantifiables ou non, subjectives, connues ou cachées;

Relations: dynamiques, structures évolutives;

Explication: l'avenir raison d'être du présent;

Avenir: multiple et incertain

Méthodes: Analyse intentionnelle, modèles qualitatifs (analyse structurelle) et stochastiques (impacts croisés)

Attitude face à l'avenir: active et créative (avenir voulu).⁶

Si l'on retient ces définitions comme référence on peut constater que celle de la prévision cadre bien avec la pratique de la prévision technologique. Par contre *on est moins assuré qu'il existe une prospective technologique* conforme aux critères précédents.

Pourtant c'est celle-ci, et non la seule prévision technologique, qui serait nécessaire dès que le niveau d'agrégation technologique s'élève et aux stages de la création et de la diffusion de l'innovation technologique. Les tableaux ci-dessous résument les approches nécessaires.

prévisibilité selon la structure et les stages technologiques

niveaux de la structure	prévisibilité
lois scientifiques	non prévisibles
principes technologiques	non prévisibles
propriétés	connues et normatives
procédés	prévisibles
éléments	non prévisibles
sous-systèmes	prévisibles par l'approche prospective
système	prévisibles par l'approche prospective

stages du procès	prévisibilité
invention	non prévisible
création de l'innovation	n.p. et normative
développement de l'innovation	en partie prévisible; veille technologique
diffusion et transfert de l'innovation	approche prospective
temps du procès	approche prospective

Les jugements portés dans ce tableau sont abrupts, c'est l'inconvénient de toute

⁶ Michel GODET "crise de la prévision, essor de la prospective, PUF, 1977.

catégorisation de phénomènes complexes. La réalité est plus subtile. Ainsi une forte culture scientifique et technologique jointe à une bonne connaissance des recherches en cours peut permettre d'envisager, par hypothèse la perspective de la découverte de nouveaux principes scientifiques et technologiques, axiomatiquement imprévisibles.

Plus le niveau de l'agrégation technologique s'élève et plus les stades du procès se "socialisent", plus est nécessaire l'approche prospective. Cette constatation renvoie alors à l'évaluation de l'état des méthodes prospectives. ce n'est pas l'objet de ce dossier d'en traiter⁷. On se bornera à souligner que *la prospective est par essence dialectique et systémique*. Dès lors les progrès de la prospective sont tributaires du transfert dans son champ des acquis dialectiques et systémiques. Mais l'outil systémique n'a été que faiblement utilisé par les prospectivistes et le mouvement intellectuel de la pensée et de la dialectique complexes n'a pas encore suffisamment imprégné l'approche prospective. Par ailleurs la systémique soulève l'important problème de ses rapports avec la théorie scientifique en général dont elle est un des produits mais non le substitut. La représentation de la technologie est un fragment de la représentation du monde, et donc d'une ou de théories le plus souvent implicites. Il convient de les rendre explicites.

le schéma "récapitulation des groupes de méthodes" résume l'analyse précédente et compare les approches prévision, évaluation, veille et prospective.

● le choix des approches est fonction de la **représentation et de la compréhension du système technologique**.

Ainsi si l'on considère la technologie comme un phénomène autonomisé, cela incitera à penser dans un univers déterministe où la technologie façonne la société et à favoriser l'approche prévision basée sur la rationalité propre de la technologie.

Si l'on la considère comme un construit social, cela conduit à penser en terme de système ouvert où la technologie est façonnée par la société. Cette position comporte deux variantes. Dans la première on n'envisage pas un sous-système physique auto-organisé; dans la seconde le système technologique comprend des interfaces physiques et sociales, ce qui conduit à tenir compte simultanément des lois de la nature et des lois de la société.

Enfin une "nouvelle vague" de sociologues considère la technologie et la société comme un "tissu sans couture" (seamless web), ce qui, a priori, paraît exclure toute possibilité de prévision.

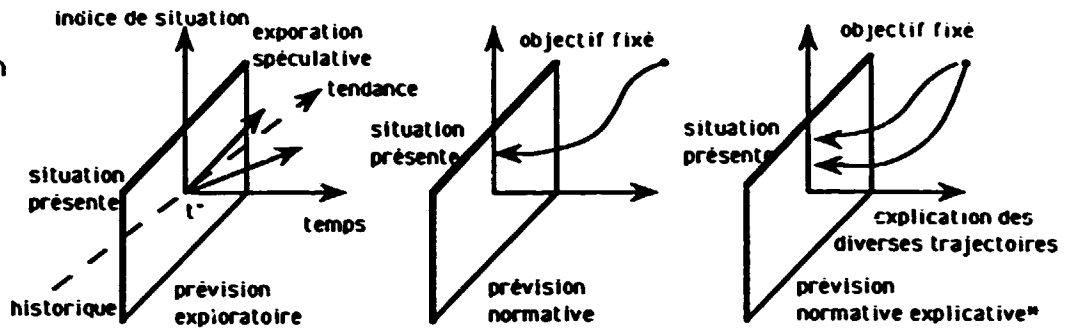
Le schéma "compréhension de la technologie" résume l'influence de celle-ci sur les approches de sa prévision.

⁷ le lecteur intéressé pourra se reporter aux "prolégomènes à la prospective technologique", document cité, réf. 2 et à l'étude à paraître de l'auteur de ce dossier "dynamique de la prospective".

récapitulation des groupes de méthodes

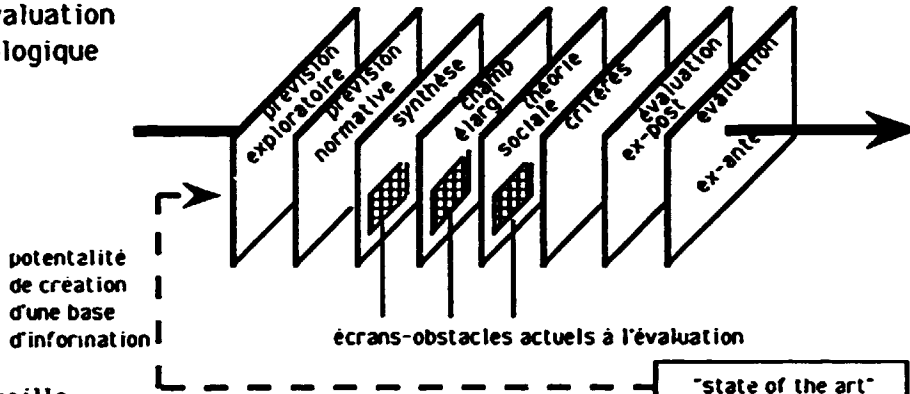
l'ordre d'apparition:

1° La prévision technologique

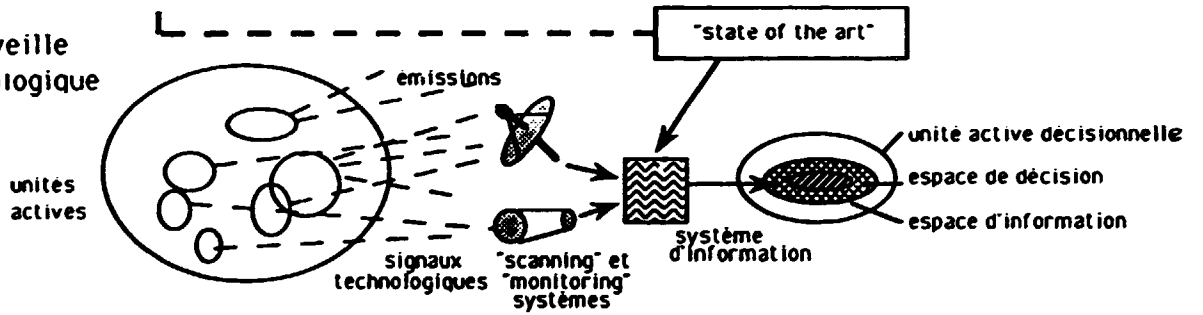


*Source: Saint-Paul et Ténrière-Buchot

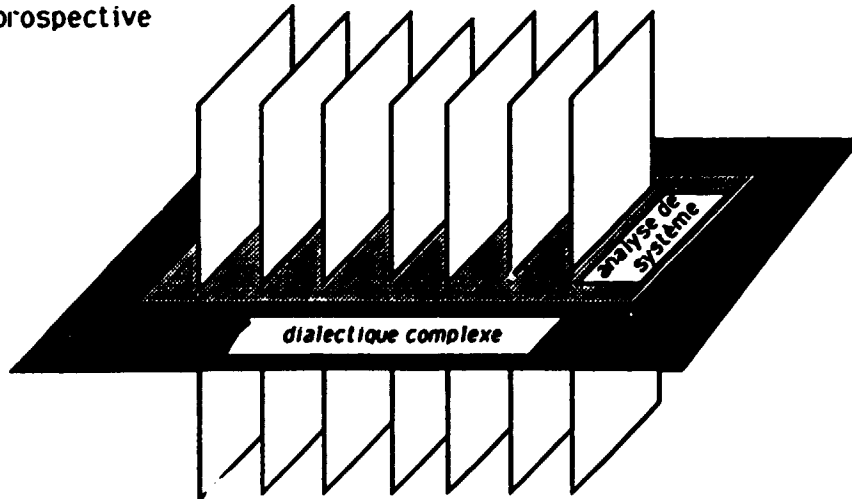
2° L'évaluation technologique



3° La veille technologique



Conditions requises pour la prospective



compréhension de la technologie

<p>phénomène autonomisé la technologie façonne la société</p>	<p>construit social la technologie façonnée par la société</p>	
<p>univers déterministe</p>	<p>la technologie comme système ouvert</p>	<p>technologie et société forment un tissu sans couture.</p>
<p><input type="checkbox"/> la technologie se développe selon sa rationalité propre, en conséquence la société devient un système technicien</p>	<p><input type="checkbox"/> système à interfaces "physique" et "social"</p> <p><input type="checkbox"/> hypothèse d'un système physique auto-organisé</p> <p>existence de lois physiques de composition interne</p> <p><input type="checkbox"/> édifice technique structuré</p>	<p><input type="checkbox"/> système comprenant des variables physiques et sociales</p> <p><input type="checkbox"/> non considération d'un sous-système physique auto-organisé</p> <p><input type="checkbox"/> distinction variables internes et externes</p> <p><input type="checkbox"/> acteurs opérant le système technique et son environnement socio-économique</p>
<p>approche prévision</p> <p><input type="checkbox"/> déductive et de caractère continu: extrapolations, prévision exploratoire</p> <p>prévision normative, explicative ou corrélatrice</p> <p><input type="checkbox"/> synthèse démarches</p> <p><input type="checkbox"/> inductive et de caractère discontinu: analyse morphologique</p>	<p>approche prospective</p> <p>théorie économique et sociale explicite ou implicite</p> <p>analyse de système</p> <p>possibilités de bâtir des scénarios technologiques</p>	
		<p>approche sociologique</p> <p>construction sociale de la technologie</p> <p>analyse empirique</p> <p>utilisation inconnue pour la prospective</p>

III Les méthodes de la prévision technologique

La "problématique" précédente montre que les méthodes de prévision technologiques font partie de la compréhension du système technologique et reflètent celle-ci. Les possibilités de prévision varient avec les niveaux de la structure de l'édifice technologique et les stages de son procès. Il y a donc des limites objectives aux méthodes et aussi la nécessité en fonction de l'objet de la prévision -niveau et stage- d'utiliser l'outil méthodologique adéquat. Beaucoup d'échecs dans le domaine de la prévision tiennent à cette inadéquation et au recours indiscriminé à des méthodes qui ne sont pas des "passe partout" et encore moins des recettes polyvalentes.

Dans ce chapitre on a résumé l'essentiel des méthodes qui ont une portée pratique et qui concernent la prévision technologique proprement dite, telle qu'elle se situe et est définie dans la "problématique".

Le schéma de la page suivante présente les méthodes de la prévision technologique⁸.

Cette classification est faite selon trois critères: l'orientation de la prévision, l'approche intellectuelle, leur logique.

□ **l'orientation de la prévision** : il faut distinguer *prévision exploratoire et prévision normative*.

● La prévision exploratoire se divise elle même en deux catégories: *l'approche tendancielle et l'exploration spéculative*.

○ l'approche tendancielle est la prévision traditionnelle qui consiste à poursuivre dans le futur des observations passées. Elle postule la permanence des lois, des structures, et des évolutions linéaires. Infondée théoriquement c'est cependant la démarche la plus courante. Elle conduit à des extrapolations simplistes, à des visions optimistes ou catastrophiques postulant que le futur sera le prolongement du passé.

○ l'exploration spéculative est une variante de l'approche tendancielle. Autour de la moyenne résultant de la tendance, on module une "hypothèse haute" et une "hypothèse basse", sortes de bornes supérieure et inférieure. Ces spéculations ne sont guère éclairantes des futurs possibles, le balayage autour de la moyenne étant intellectuellement très superficiel.

Le slogan qui pourrait résumer cette démarche est "prévoir, c'est savoir". Mais la qualité du savoir est ici en cause. Ainsi il n'y a aucune raison, à priori que les structures restent inchangées dans le temps et que des mutations, des ruptures n'apparaissent dans les développements

⁸ la littérature de base dans ce domaine est le livre de R.U. AYRES "technological forecasting and long range planning", Mac Graw Hill, 1969, et en langue française R. SAINT PAUL et F.P. TENIERE- BUCHOT "innovation et évaluation technologiques", Entreprise moderne d'édition, 1974.

méthodes de prévision technologique

	orientation de la prévision		approche intellectuelle		logique	
	exploration	normative	rationnelle	intuitive	observation	causalité
les méthodes continues						
1 individuelles						
◊ l'extrapolation de la tendance	■		■		■	
◊ les courbes enveloppes	■			■	■	
◊ l'analyse des événements précurseurs	■		■			■
◊ les courbes d'apprentissage		■	■		■	
◊ les courbes en S, les modèles analogiques, heuristiques et phénoménologiques		■	■			■
◊ les méthodes statistiques: analyse de la variance, la simulation, probabilité à priori, plausibilité		■		■		■
2 collectives						
◊ les scénarios		■		■		■
◊ DELPHI		■		■		■
◊ les matrices d'interdépendance (cross impact matrix)		■	■			■
les méthodes discontinues						
◊ l'analyse morphologique		■		■		■
(pour mémoire)						
◊ la science fiction		■		■		■
◊ les méthodes de créativité, brainstorming, buzzgroup, jeux prospectifs, synectique	■			■	■	

d'après R. SAINT-PAUL et P.F. TENIERE-BUCHOT

● la prévision normative procède d'un esprit totalement différent. C'est d'après l'objectif fixé dans le futur qu'on va raisonner et non d'après la situation présente. On remontera le temps partant de l'objectif vers l'état présent. le slogan illustratif de la démarche est "prévoir, c'est pouvoir". Mais la volonté ne suffit pas toujours, loin s'en faut. Les objectifs peuvent être irréalisables. Partant de l'objectif on ne pourra par un raisonnement récurrent rejoindre la situation de départ. Si celle-ci est plus basse que le point d'arrivée, cela signifie que la prévision normative est trop élevée, ou si elle est plus haute que la prévision normative pourrait être plus élevée.

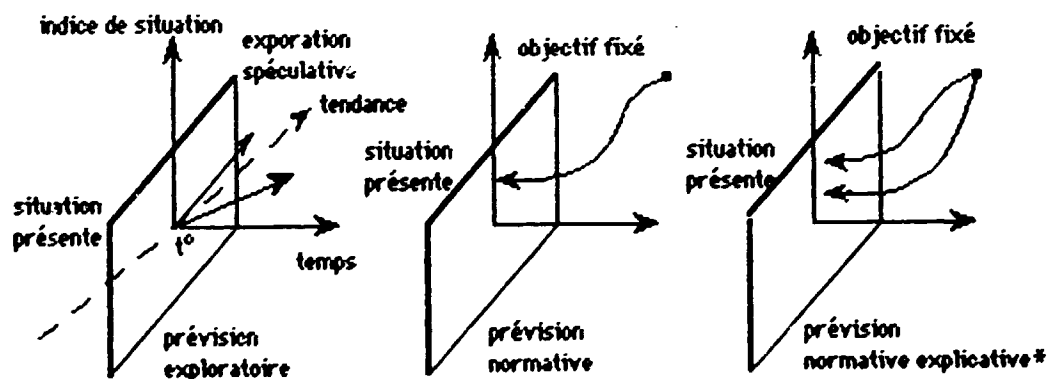
La prévision normative conduit à une *approche explicative* et à une *approche corrélatrice*.

◊ l'approche explicative est la conséquence de la prévision normative. On cherche à savoir pourquoi certains objectifs sont réalisables et d'autres pas. Les causes sont analysées en fonction des effets qu'ils produisent le long des trajectoires allant d'une façon récurrente des objectifs à la situation présente. Les phénomènes ne sont plus envisagés sous l'aspect de leurs effets, qui caractérise la prévision tendancielle, mais de leurs causes. Celles-ci étant généralement variées, l'efficacité de la méthode dépend de la qualité des outils de l'analyse causale. Le problème est déplacé sans pour autant être résolu.

◊ l'approche corrélatrice est une forme plus développée de l'approche explicative. L'objectif est considéré dans son environnement. Celui-ci est constitué de contraintes, de facteurs favorables ou défavorables à la réalisation de l'objectif. Les liaisons entre ces facteurs et l'objectif permet d'établir des corrélations. Mais, comme en théorie statistique, il ne faut pas confondre corrélation et explication. La corrélation est une présomption. La démarche peut donner l'impression d'une fausse sécurité, ce qui en fait le danger. De nouveau on ne peut faire l'économie de l'analyse causale et de l'impact des variables de l'environnement sur la structure du système considéré. Mais la démarche est une sorte de transition vers l'analyse de système.

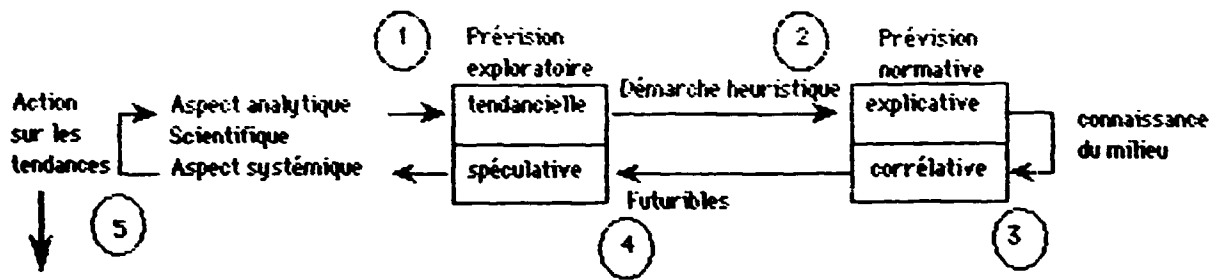
En définitive l'approche normative est plus intéressante et propice à l'action que l'approche tendancielle, mais elle comporte un piège: celui que le prospectiviste prend ses désirs pour la réalité. On ne peut être normatif en dehors de tout mécanisme de vérification.

Le schéma suivant résume les situations des approches tendancielle et normative.



*source: Saint Paul et Tenière- Buchot

• Les deux approches, tendancielle et normative, sont utiles et même nécessaires. Mais elles ont des limites. Elles expriment des éclairages du ou des futurs. Elles peuvent se compléter et s'interfertiliser. Il faut en opérer la synthèse. Celle-ci requiert un mécanisme plus complexe qui articule les deux orientations méthodologiques. Le schéma ci-dessous le décrit:



La synthèse des deux approches apporte à la prévision exploratoire les idées qui lui manquaient, et à la prévision normative les garanties de vérifications théoriques a priori permettant d'éliminer l'utopisme. Elle permet de passer de l'observation de tendances (marquées 1 dans le schéma), à des explications (2) sous la forme de relations de causalité, par une démarche "heuristique" consistant à passer des effets aux causes. La démarche systémique commence au stade (3). Elle consiste à acquérir une connaissance approfondie des corrélations entre le résultat à obtenir et son environnement, de spéculer sur des avènements possibles, les "futuribles". Ce qui revient à considérer l'avenir à court et moyen terme comme déterminé par un avenir à long terme voulu et réalisable. Les spéculations, variantes autour de la tendance, pourront alors à la lumière des avènements possibles être interprétées concrètement (4). Le système serait bouclé par des actions sur les tendances décidées pour répondre aux choix déterminés par l'approche spéculative (5). La mise en pratique de ce schéma ouvrirait d'énormes possibilités au prévisionniste, aussi bien du point de vue de la conception que de l'action.⁹

On peut l'interpréter comme la recherche d'un mécanisme intégrant différentes méthodologies indispensables mais, prises séparément, réductionnistes par rapport à une réalité plus complexe. En d'autres termes la "variété" (notion cybernétique qui exprime le nombre d'états que peut prendre un système), des méthodologies séparées est trop faible pour opérer celle du système technologique. En fait la synthèse et le mécanisme contenus dans le schéma peuvent être considérés comme une *voie de passage à l'analyse de système* qui est l'aboutissement et la synthèse de nombreuses disciplines et un point de départ de la prévision technologique. "C'est une troisième voie à l'approche méthodologique à côté de celle de Descartes (principe d'évidence, décomposition en parties élémentaires, synthèse et ordonnancement, généralisation en loi) ou de celle de Claude Bernard (observation, hypothèses, expérimentation, énoncé d'une loi, vérification)... Tout un problème de langage et de structure se pose donc présentement, et notamment à l'informatique et à la logique. Des

⁹ il y a 15 ans que SAINT PAUL et TENIERE-BUCHOT ont fait cette proposition (voir référence 6) qui est à coup sûr réalisable. Il ne semble pas qu'un tel mécanisme intégrant les deux orientations de la prévision ait été mis en œuvre.

difficultés importantes vient par contre le jour à l'occasion de ces recherches: par exemple le problème des mutations ou créations parmi les éléments d'un système reste encore mal traité⁶.

□ les approches intellectuelles

Le schéma précédent "méthodes de la prévision technologique" contient une seconde colonne intitulée "approches intellectuelles" et qui est un classement complémentaire. Bien que le critère principal de classification soit la dualité exploratoire-normatif, en fait aucune méthode n'est totalement exploratoire ou normative, mais un mélange en proportions variables entre ces pôles dépendant des inclinaisons du prévisionniste. Certaines méthodes seront plutôt *rationnelles*, d'autre plutôt *intuitives*. Les méthodes rationnelles seront le plus souvent exploratoires, les méthodes intuitives plutôt normatives. sans se confondre les deux classifications se recourent.

□ les logiques

La troisième colonne du schéma est intitulée "logique". Il s'agit de la logique utilisée dans la prévision, ontologique ou causale.

- La logique ontologique (ou d'observation) considère le sujet étudié comme un tout et prévoit son évolution d'après l'observation de ce tout. De nombreuses technique exploratoires ressortent de cette logique où les causes ne seront pas recherchées.

- La logique téléologique (ou de causalité) considère au contraire les constituants et explique l'évolution, la finalité du tout par une représentation modélisée plus ou moins complexe. Les modèles corrélatifs, économétriques, expérimentaux, phénoménologiques, dynamiques, d'apprentissage, etc... ressortent de cette logique.

- La synthèse de ces deux logiques reste à faire. On peut en effet concevoir une logique ontologique plus riche, plus systémique, s'attachant à la compréhension de la structure, des relations et interactions entre les parties entre elles et avec le tout. Ces interactions dont la configuration constituent l'*organisation* du système, peuvent être le siège de contradictions, être surdéterminées entre elles, présenter des liaisons faibles ou fortes, des degrés de cohésion et de cohérences rendant l'ensemble plus ou moins stable ou instable. On est ici dans le domaine qui commence à émerger de la dialectique et de la pensée complexes. *C'est dans ce champ intellectuel que se trouve désormais les réponses véritables à la hauteur des problèmes de la prospective, en général, et de la prévision technologique, en particulier, et non dans l'amélioration de telle et telle technique.*

□ continuité et discontinuité

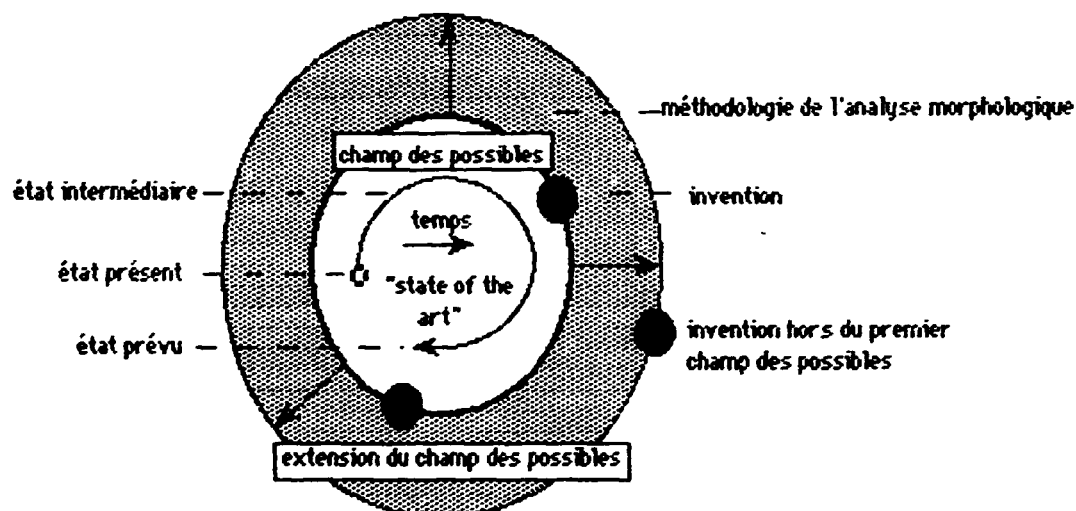
Les méthodes de prévision peuvent encore être rangées en "continues" et "discontinues".

La plupart des prévisions sont continues. Dans le champ des possibles une

trajectoire permet de passer régulièrement de l'existant au prévu. Une méthode intéressante consiste à mesurer ce champ des possibles (appelé "state of the art" par des auteurs américains¹⁰) et à étudier les solutions à l'intérieur de celui-ci. Mais des sauts technologiques peuvent se produire en dehors de ce champ par l'apparition d'inventions, de novations, un peu comme des particules sautant d'orbite en orbite en mécanique quantique. Ce sont souvent des innovations majeures du type du transistor, du polaroïde, de la lyophilisation ou du laser. Les méthodes, l'analyse morphologique, en particulier constituent alors des sortes de matrices de découverte.

Le schéma suivant résume les différences d'approche.

continuité et discontinuité technologiques



□ Une revue rapide des principales méthodes utilisées pour la prévision technologique

Après la présentation de la typologie des méthodes de prévision, orientation, approche intellectuelle et logique, il est utile d'examiner plus en détail, non l'ensemble des méthodes de prévision, mais celles qui trouvent une application en technologie.

On analysera donc dans la famille de l'extrapolation des tendances, les "courbes-enveloppes", dans celle mixte de l'extrapolation et du normatif, les courbes en S et les modèles analogiques, les méthodes statistiques, les state of the art, dans la famille à prépondérance normative les scénarios et les matrices d'interdépendances, la méthode DELPHI et l'analyse morphologique.

¹⁰ par exemple E.N. DODSON "measurement of state of the art and technological advance"; J.P. MARTINO "measurement of technology using tradeoff surfaces", technological forecasting and social change, 27, 1985

● Les courbes enveloppes

L'extrapolation est un outil prévisionnel médiocre, il postule la continuité des phénomènes dans le temps. Or la question se pose si ceux-ci présentent des points d'inflexion, donc des modifications dans l'orientation de la courbure de la tendance. Si tel est le cas il va de soi que l'extrapolation est inopérante pour la prévision. Des phénomènes peuvent par ailleurs être cycliques ou périodiques et avoir plusieurs points d'inflexion. L'extrapolation de la tendance postule également que "toutes choses restent égales par ailleurs" (*ceteri paribus*). Ce qui revient à penser en avenir "certain". Les séries statistiques peuvent montrer de remarquables progressions linéaires, il en a été ainsi, par exemple, pour les taux de consommation de l'électricité, la puissance des véhicules automobiles où entre 1900 et 1970 on pouvait observer un doublement tous les 20 ans. Dans le cadre de la croissance continue de l'économie mondiale durant les 30 ans après la seconde guerre, on pouvait constater l'existence de nombreuses séries de cette sorte. L'ennui pour les prévisionnistes irréfléchis c'est que l'économie mondiale est régie par des cycles, sans doute de longue durée, et qu'elle a présenté des points d'inflexion, une rupture de crise. En conséquence le décor environnant la prévision technologique de ces quinze dernières années s'est considérablement modifié. Les chocs pétroliers ont conduit à des économies unitaires énergétiques, à freiner la course à la puissance des automobiles. La conscience des dangers, liés au développement de l'activité industrielle, qu'encourt la planète, crée une situation nouvelle, cette fois ci du point de vue des contraintes du décor sociétal et politique.

Les courbes enveloppes sont un procédé pour tenir compte de diverses contraintes. Il faut distinguer les *contraintes absolues*, les *contraintes relatives*, les *contraintes économiques*.

◇ Les contraintes absolues tiennent aux lois de la nature, constantes physiques ou limites physiologiques. Il en est ainsi, par exemple de la limite théorique du rendement d'une hélice, du pouvoir de séparation des générations de microscopes construits selon des principes scientifiques et techniques successifs, de la densité du nombre de puces par unité de surface, du nombre de G supportable par l'organisme humain au cours de l'accélération, etc... Paramètres précieux pour évaluer les barrières qualitatives, les limites de saturation de technologies et des industries correspondantes.

◇ Les contraintes relatives sont généralement spécifiques aux procédés. Elles correspondent à l'état des arts et techniques (*the state of the art*). Ce sont des limitations provisoires. Elles ont un caractère plus extensif, quantitatif. Ainsi le relèvement des températures critiques des matériaux possédant des propriétés de superconductivité est la levée d'une contrainte relative. Les techniques permettant la création d'une nouvelle génération de supercomputers travaillant en parallèle ressortent aussi de cette catégorie de contraintes.

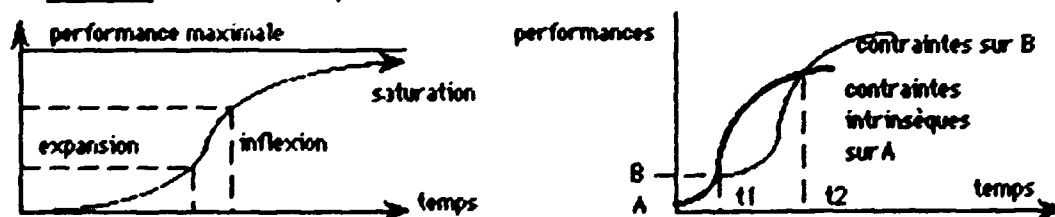
◊ Les contraintes économiques sont le troisième type de contraintes. Il ne suffit pas d'envisager un développement technique aux performances remarquables, encore faut-il qu'il soit acceptable en termes de besoins et de coût. Une innovation forte, même à coup initialement élevé, peut avoir un effet désstabilisateur pour le secteur considéré. Assurer un monopole d'innovation sur le marché peut accélérer l'obsolescence des produits ou procédés concurrents. La politique technologique est devenue le fer de lance du management stratégique. Elle prend pour données les contraintes économiques et celles de pouvoir, mais elle peut agir sur elles, tout au moins pour les "unités actives" capables d'influer leur propre environnement.

Pour bâtir une courbe-enveloppe il faut tenir compte de ces éléments, c'est pourquoi sa construction est malaisée et est plus compliquée que la simple courbe mathématique le laisserait supposer. Mais le sous-produit de sa constitution, à savoir la masse de renseignements nécessaires, est peut-être plus important que la courbe-enveloppe elle-même. Son intérêt est de restituer les problèmes dans un contexte général, mais elle ne permet pas de prévoir l'apparition de nouvelles percées au niveau des procédés.

• Les courbes en S et les modèles analogiques

Les courbes en S sont un transfert analogique dans le domaine de l'innovation de la croissance biologique en milieu fermé. En effet cette dernière peut être représentée par une courbe comportant trois parties distinctes: d'abord une expansion (courbure orientée vers le haut), une zone de transition (point d'inflexion), une saturation (courbure tournée vers le bas). Plusieurs équations peuvent représenter cette évolution (par exemple: équation de Pearl, de Gompertz, de von Bertalanffy). L'intérêt pour la prévision technologique des courbes en S est double. D'une part, elles permettent de faire passer par une série de points statistiques une courbe plus réaliste que ne l'aurait été une droite en fonction uniforme, logarithmique ou exponentielle. Elle permettent aussi -du moins théoriquement- un enchaînement de prévisions dans le temps, les prévisionnistes corrigeant successivement les projections correspondant aux trois phases. D'autre part, et c'est le plus important, elles peuvent servir à guider les décisions en identifiant les contraintes intrinsèques des phases technologiques.

Le schéma suivant récapitule la forme et l'utilisation des courbes en S:



• les méthodes statistiques

La notion de probabilité fait évidemment partie de l'arsenal conceptuel de la prévision. Ce qui distingue celle-ci de l'anticipation est une indication de la probabilité de réussite. Mais il faut distinguer *futur probabilisable* et *futur incertain*. Le calcul des probabilités ne s'applique qu'au premier. Dans ce cas une espérance mathématique et une variance pourront être calculées, des tests effectués, des intervalles de confiance s'en déduiront. Pour l'avenir incertain, rien de tout cela ne pourra être mis en œuvre. On supposera que tous les événements ont la même probabilité de réalisation. Et on ne pourra aller plus loin.

En *futur probabilisable* l'établissement de "fourchettes" autour de la tendance peut donner lieu à des calculs statistiques. Pour les établir il faut disposer d'un nombre suffisant d'informations, desquelles on déduit des intervalles de confiance qui s'appuient sur des résidus issus d'un traitement par la méthode des moindres carrés. Mais la pratique montre que dans des projections à long terme l'ampleur des "fourchettes" croît fortement. Bien adaptées à la prévision à court terme les fourchettes sont pratiquement inutiles en prévision technologique.

En *prévision incertaine* plusieurs techniques existent. La méthode de Monte-Carlo qui s'appuie sur des probabilités a priori, dans le même sens les modèles markoviens ne corrigent pas les probabilités a priori, mais les transforment progressivement grâce à des matrices de transition dont les éléments sont des probabilités. La théorie des jeux a aussi été expérimentée dans le domaine de la prévision technologique, apparemment sans résultat.

• Les "state of the art" (SOA)

L'expression "state of the art" signifie ici *niveau* de la technologie¹⁰. La technologie moderne, particulièrement la technologie militaire et spatiale, est hautement complexe et évolue très rapidement. Il s'agit donc d'évaluer les bénéfices des nouveaux systèmes. Or une technologie peut être décrite par un ou plusieurs paramètres qui mesurent ses caractéristiques. Quelquefois la performance des paramètres est dominée par un seul qui est suffisant pour caractériser le SOA. Dans la plupart des cas la technologie comporte un jeu de paramètres techniques qui mesurent ses caractéristiques. Une famille de technologies similaires de même niveau SOA peut avoir différentes valeurs pour chaque paramètre. Ces technologies, objets ou procédés, peuvent être équivalents pour le designer car chacun représente une balance différente (tradeoff) entre les paramètres que le designer est libre de modifier. En effet à un temps donné il y a un montant fixe de performance technologique disponible pour une classe de technologie. Si le designer souhaite augmenter la valeur d'un paramètre technique il doit sacrifier un ou d'autres paramètres.

Conceptuellement le SOA peut être vu comme une surface dans un espace de

paramètres multidimensionnels. Les designers sont libres de se mouvoir dans cette surface en générant des designs alternatifs. Il y a des limites à cette liberté. Ils ne peuvent se déplacer à une surface plus "basse", ce qui serait inefficace. Ils ne peuvent se déplacer à une surface plus "haute" sans une avance dans le SOA. On rejoint ici la notion de *surface maximum d'opération* développée en Economie Politique¹¹.

Le point précis de la surface du "tradeoff" selon lequel un designer choisit, dépend des besoins des usagers, ce point est à la tangente de la surface de "tradeoff" d'utilité pour l'utilisateur et de la surface accessible pour le designer. C'est la détermination de cette dernière surface qui a fait l'objet de recherches récentes. Pour illustrer cette représentation abstraite d'une "surface" on l'éclairera par l'exemple des paramètres considérés qui sont en interaction au sein d'une technologie:

Dessiner un bateau à voile implique quelques "tradeoffs". Un bateau devrait transporter le plus de charge possible dans la limite de ses contraintes de taille. Ceci signifie que pour une longueur donnée il devrait avoir un bau (beam) et une profondeur de tirant (draft) en conséquence. En outre il devrait transporter cette charge à la plus grande vitesse possible. De plus le bateau doit à la fois avoir de la vitesse avec le vent et contre lui. La vitesse avec le vent requiert un bau étroit et un faible tirant; la vitesse contre le vent requiert un tirant profond. Pour une taille donnée d'un bateau, un design économique et efficace requiert un arbitrage prudent des différentes dimensions sous le contrôle de l'architecte naval. Ce qui pose de nombreux problèmes.

Toute technologie comporte des variables corrélées et aux effets souvent contradictoires. La liberté de design se situe donc à l'intérieur de la "surface" délimitée par l'état de la technique et tend à optimiser les compromis dans la sélection des variables.

Mathématiquement la "surface" est une ellipsoïde d'ordre 2, c'est-à-dire une surface convexe qui admet trois plans de symétrie, deux à trois orthogonaux et trois axes de symétrie deux à deux orthogonaux, ces trois plans et ces trois axes se coupant en un seul point qui est le centre de l'ellipsoïde. Les paramètres de l'ellipsoïde sont ceux procurés par l'analyse du SAO.

Ainsi il est possible de comparer différentes générations de technologies (par exemple les moteurs à propulsion ou les transistors), de mesurer l'évolution de leurs "surfaces", d'identifier les intersections et recouvrements de surfaces entre générations, d'évaluer dans quelle mesure ont été utilisées les potentialités technologiques disponibles à une époque donnée. Il ne semble pas que ces recherches aient été appliquées à la prévision technologique, il n'est pas sûr qu'elles permettent d'anticiper les changements futurs de SAO, mais elles paraissent constituer une piste intéressante de réflexion. Elles permettent une désagrégation de la technologie et de raisonner la logique et la cohérence de l'association de ses paramètres.

¹¹ voir F. PERROUX "unités actives et mathématiques nouvelles" Dunod 1975

• la méthode DELPHI

C'est probablement la méthode la plus pratiquée, elle a donné lieu à des milliers d'applications. Elle repose sur le *principe de la convergence des opinions, d'un consensus qui se dégage par itérations successives au sein d'un groupe de personnes soigneusement choisies et qui répondent isolément aux questions posées.*

On procède en trois étapes essentielles:

o la constitution d'un groupe d'experts

o l'élaboration d'un questionnaire

o le déroulement de la consultation et le traitement de l'information recueillie.

□ la constitution d'un groupe d'experts subordonne l'ensemble des activités. Le terme expert est entendu, non pas dans le sens du spécialiste d'une discipline étroite ou du prestige des titres, de la fonction ou du niveau hiérarchique. L'expert du DELPHI sera choisi pour sa compétence, bien sûr, mais aussi sa largeur de vue et son orientation vers l'avenir. Les organisateurs du DELPHI doivent donc sur des sujets importants dresser une liste d'une centaine de noms afin que l'effectif final qui participera jusqu'au bout à l'enquête ne soit pas trop réduit.

On notera d'emblée les "biais" inhérents à la constitution de ce groupe. La méthode repose strictement sur le principe de l'indépendance des participants et sur leur isolement pour formuler leurs réponses. Cette condition primordiale peut rarement être respectée. Les experts se connaissent généralement et constituent des cercles où ils ont de multiples occasions de rencontre. Même indépendant et isolé un expert n'en subit pas moins les "effets de mode" qui créent dans une conjoncture donnée des convergences d'opinion et des conformismes

□ l'élaboration du questionnaire est de la responsabilité des organisateurs de l'enquête. Celui-ci doit être précis, les questions doivent être quantifiables et indépendantes les unes des autres, ce qui n'est pas toujours aisé. On entend par indépendance le fait que la réalisation supposée d'une des questions à une date donnée, n'a pas d'influence sur la réalisation d'une autre question. Une étude approfondie du questionnaire est donc nécessaire afin d'éliminer dans toute la mesure du possible les relations de dépendance des questions. Comme pour une enquête d'opinion, le questionnaire sera testé auprès d'un nombre limité de personnes.

Les questionnaires sectoriels ou spécialisés sont les plus difficiles à établir car les liaisons entre les paramètres y sont nombreuses. Les questionnaires généraux qui s'intéressent plus au futur qu'à un domaine particulier comportent des questions plus diversifiées et a fortiori moins liées entre elles. Comme toute enquête d'opinion la formulation initiale des questions ne va pas manquer d'influer, malgré les mécanismes particuliers du DELPHI, sur les réponses. Il est

inévitables que le questionnaire soit un cadre initial qui reflète une représentation du problème.

□ le déroulement de l'enquête et son exploitation. Les opérations comportent cinq phases: quatre phases d'enquête et une phase de dépouillement.

◊ phase N°1: envoi du premier questionnaire.

Le questionnaire est envoyé par la poste en une centaine d'exemplaires afin de tenir compte des abandons en cours d'enquête. La théorie statistique enseigne qu'un échantillon n'a pas seulement de signification par son pourcentage de représentativité mais aussi par sa taille absolue. Dans ce cas il faut que l'exploitation porte sur au moins vingt-cinq questionnaires.

Une note de présentation explique les buts et l'esprit du DELPHI et rappelle l'assurance de l'anonymat des réponses. Chaque expert devant faire figurer son nom en bas de celle-ci afin d'en garantir l'authenticité et de faciliter le dépouillement.

Une particularité du premier questionnaire est que chaque expert doit se noter lui-même vis-à-vis de la question posée. L'échelle de valeur généralement utilisée est la suivante: 1 très compétent (spécialiste), 2 compétent, 3 au courant du sujet, 4 peu au courant du sujet, 5 incompetent (l'expert doit néanmoins fournir une réponse)

Cette autoévaluation permettra de sérier les réponses supposées les meilleurs et de faciliter par la suite leur interprétation.

□ phase N°2: dépouillement du premier questionnaire et envoi du second.

Les organisateurs éliminent les réponses des experts qui ne désirent pas poursuivre. Ils traitent chaque question selon les règles de la statistique descriptive. Une distribution est construite, une médiane et un écart interquartile sont calculés.

Supposons que la question porte sur la possibilité d'un vol habité sur la planète Mars. Si la médiane de la distribution se situe en l'an 2010 cela signifie que 50% des experts pensent que cela pourra arriver avant 2010 et 50% après. Supposons encore que 25% des experts pensent que le voyage sera possible avant 2005, et 75% le contraire. C'est le premier quartile Q1. Autre supposition: 75% des experts pensent que le voyage aura lieu avant 2015, et 25% pensent le contraire. C'est le dernier quartile Q3. L'espace interquartile EIQ est défini par les deux dates 2005 et 2015, et 50% des experts pensent que l'événement se produira durant cet intervalle, alors que 25% "d'optimistes" pensent qu'il aura lieu avant et 25% de "pessimistes" qu'il aura lieu après. *L'objectif de la méthode DELPHI est de diminuer l'espace interquartile tout en précisant la médiane.*

Le second questionnaire adressé aux experts fera part des résultats du premier en indiquant l'année de la médiane M (2010) et l'espace interquartile (2005-2015). Il sera rappelé la réponse de l'expert dans le questionnaire N°1 et

demandé au vu des résultats sa nouvelle réponse et les raisons qui justifient celle-ci en deça ou au delà de l'espace interquartile (EIQ).

Ce second tour présente des biais. Si la première réponse est située à l'intérieur de l'EIQ, l'expert peut être incité à la répéter et à jouir d'une "satisfaction majoritaire", et il est rare qu'il change d'opinion. Si sa première réponse est déviante par rapport à la majorité, il doit la justifier. Des indécis ou peu motivés peuvent être tentés de se rallier à l'opinion majoritaire.

□ phase N°3, dépouillement du second questionnaire et envoi du troisième.

Même processus que dans la phase N°2. Le traitement de ce dernier fait apparaître une distribution moins étalée que dans le premier. Les nouvelles valeurs de la médiane et de l'espace interquartile sont, par exemple, 2009 et 2006-2012. Dans le troisième questionnaire les nouvelles valeurs sont indiquées ainsi que les arguments des "extrémistes". Les experts auront à se prononcer pour être dans la "majorité" ou au contraire pour se maintenir en dehors. Des critiques, en forme de contre-arguments, leur sont de plus demandées, vis-à-vis des allégations avancées.

Par l'intermédiaire des organisateurs, il paraît donc s'établir un débat entre les participants à l'enquête. Mais il convient de remarquer que le débat ne porte que sur les positions des déviants et non sur celles de la majorité. On comprend dès lors pourquoi *la méthode est bien adaptée à la prise de décision, elle suscite des consensus successifs qui resserrent les choix, elle est moins efficace pour des applications exploratoires*

Le mécanisme de réduction de l'EIQ conduit à la prédominance du centrisme.

□ phase N°4: dépouillement du troisième questionnaire et envoi du quatrième.

Le processus précédent recommence. Le questionnaire N°3 donnera, par exemple, 2008 pour la médiane et 2006 et 2010 pour l'EIQ.

Comme précédemment le questionnaire N°4 indiquera les valeurs prises par M, Q1 et Q3 ainsi que les contre arguments opposés aux partisans de l'une et de l'autre extrémité de l'histogramme.

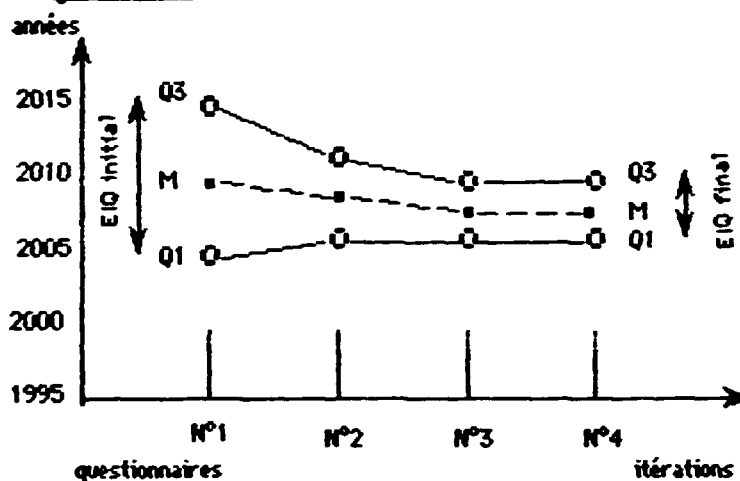
Une réponse définitive à la lumière de ces derniers échanges sera demandée aux experts.

Supposons les arguments opposés par les tenants d'un événement plus proche: par exemple, la moisson d'informations rapportées par des sondes spatiales inhabitées ont considérablement enrichi la connaissance de MARS pour permettre d'y envoyer des hommes, la technologie des fusées et des véhicules spatiaux récupérables a fait de grands progrès, la fin de la guerre froide, le désarmement, facilitent une coopération entre les USA et l'URSS pour en partager les coûts. A l'inverse les arguments opposés à cette aventure pourraient être les suivants: la fin de la guerre froide conduit à d'autres priorités dans la coopération internationale en faveur de l'aide au Tiers-Monde, de la protection de la biosphère, de la recherche bio-médicale, l'information scientifique à réunir ne

nécessite pas la présence humaine à bord du vaisseau spatial, les connaissances sur l'adaptation de l'organisme humain à ces vols humains est encore insuffisante pour risquer l'aventure, etc...

Phase N°5: dépouillement du dernier questionnaire et résultats finals.

L'enquête est maintenant terminée les distributions des réponses ne varient plus significativement, L'EIQ s'est stabilisé, les positions des experts se sont cristallisées. L'ensemble des réponses est enregistrée dans un tableau où est indiquée séparément la moyenne des spécialistes, par exemple l'an 2009. En définitive au cours de l'enquête un phénomène de convergence s'est produit ainsi que le montre le graphique suivant:



Le resserrement des opinions est rassurant, surtout quand la position majoritaire est supportée par les experts. C'est un avantage pour la prise de décision en même temps qu'un danger. En science et en technologie un déviant, un marginal, peuvent avoir raison contre "l'establishment". La "majorité" peut être aussi plus sensible aux effets de mode. Ainsi il est probable que si un DELPHI avait été organisé sur les perspectives de la superconductivité immédiatement après la découverte des chercheurs d'IBM-Zurich, les pronostics d'application au transport de l'énergie électrique sans pertes, de la lévitation des trains et autres percées technologiques et industrielles, auraient manifesté un optimisme très excessif.

On signalera l'existence de procédures informatisées pour réaliser rapidement le traitement des informations des questionnaires et préparer automatiquement en fonction des réponses au précédent le questionnaire suivant. On peut ainsi en quelques heures, à condition que les participants disposent d'un équipement télématique, obtenir les résultats finaux. Cet avantage est compensé par un moindre temps de réflexion, pourtant utile pour des problèmes complexes.

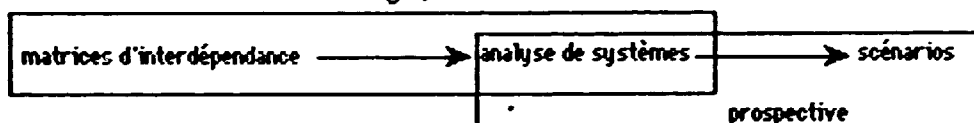
● les matrices d'interdépendance ont été conçues comme un prolongement critique de la méthode DELPHI. La critique principale qui était faite était que les prévisions qui en étaient issues étaient des points isolés dans l'espace, et

cet isolement affaiblissait grandement la confiance et l'intérêt qu'on pouvait retirer de ces prévisions. Un perfectionnement a donc été apporté pour éviter les biais dus à la non-indépendance des questions posées. Ce perfectionnement aboutit à un véritable changement qualitatif par rapport au DELPHI. En considérant des relations d'interdépendance, on renforce ou on affaiblit l'importance de certaines questions, en dégagant les variables essentielles qui influencent l'ensemble des questions posées. Les résultats obtenus en fin de consultation seront modifiés.

Le perfectionnement prend la forme de *matrices d'interdépendance* ou *"cross impact matrix"*.

Le principe est simple. Il se limite à étudier systématiquement toutes les relations pouvant exister entre les divers paramètres en examinant ceux-ci deux à deux. On dresse donc la liste de tous les paramètres pouvant intervenir dans un problème donné. Cet exercice peut être individuel ou collectif. Mais concernant des problèmes importants qui requièrent une grande compétence et qui ont une dimension sociale, l'exercice est le plus souvent collectif. Recenser les variables c'est s'efforcer de comprendre. *L'établissement de matrices d'interdépendance -dénommée aussi matrices structurelles- est déjà entré dans l'analyse de systèmes, fondement d'une prospective d'intention scientifique, dont les scénarios sont une des formes.*

Le cheminement méthodologique est alors le suivant:



On pointe les influences directes évidentes entre variables par une notation binaire dans les cases d'intersection du tableau carré de la matrice. Ou bien elles existent et on marque un signe, ou bien elles n'existent pas et on ne marque rien.

Le comptage des points d'intersection en colonne traduit l'influence globale d'un paramètre sur les autres. Réciproquement le comptage en lignes exprime sa dépendance. De ce double comptage deux notions se dégagent:

- ◊ la motricité qui indique combien de fois un paramètre peut influencer un système de manières différentes;
- ◊ la dépendance qui fournit une indication de la variété des influences qu'une variable peut subir de la part d'un système.

Les graphiques suivants montrent comment se présentent les matrices d'interdépendance. Le nuage des paramètres peut être divisé en 4 zones: celle où les variables sont fortement motrices et faiblement dépendantes (Z1), à l'opposé celle où elles sont faiblement motrices et fortement dépendantes (Z2), celle où elles sont à la fois faiblement motrices et dépendantes (Z3), celle où elles sont à la fois fortement motrices et dépendantes.

matrices structurales

matrice d'interdépendance								matrice d'interdépendance métricité et dépendance							
Influence de															
sur	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	dépendance
A	*							A	*						1
B		*						B	*	*	*	*	*	*	5
C			*					C	*	*					2
D				*				D	*		*	*			3
E					*			E	*		*				2
F						*		F	*	*	*	*	*	*	6
G							*	G	*	*	*	*	*	*	4
								métricité: 6 5 3 4 3 2 1 23							
zones de classement des variables								classement des variables							
Z1				Z4				A				B			
Z3				Z2				C				D			
								E				F			
												G			

Motricité et dépendance sont des mesures de *fréquence* et non *d'intensité*. Il est vrai que quand il s'agit de systèmes sociaux complexes, la plus grande difficulté est d'abord d'apprécier l'existence de relations et au mieux le sens de celles-ci. Dans ces conditions la quantification de leur intensité peut paraître illusoire. Les économètres n'ont parfois pas ces scrupules.....Mais dans bien des cas il est possible d'établir une échelle d'intensité. Cela ne change pas le principe, on compte le "poids" de l'influence des variables motrices sur les autres, et réciproquement celui des influences subies.

Un raffinement peut consister, dans le cas où la matrice contient de nombreuses variables, à rechercher les relations indirectes entre celles-ci et qui ne peuvent pas être détectées, par exemple, dans une analyse de graphes. En effet, outre les relations directes, il existe aussi des relations indirectes par des chaînes d'influence et des boucles de réaction (feedbacks). Une matrice courante comportant plusieurs dizaines de variables peut renfermer plusieurs millions d'interactions sous forme de chaînes et de boucles qu'il est impossible à l'esprit humain de se représenter. La méthode MICMAC⁶ permet d'étudier ces chemins et boucles. Son principe s'appuie sur les propriétés classiques des matrices booléennes. Un programme de multiplication matricielle appliqué à la matrice structurelle permet de déduire à chaque itération une nouvelle hiérarchie des variables classées cette fois en fonction des actions indirectes qu'elles exercent sur les autres. A partir d'une certaine puissance la hiérarchie reste stable, c'est elle qui est retenue dans le classement des variables.

Les *matrices structurelles courantes* (MSC) sont un outil de compréhension indispensable. Elles ont cependant de sérieuses limitations. En n'enregistrant pas le sens des relations, elles ne permettent pas l'étude des contradictions et des régulations au sein des systèmes. Or ce sont les phénomènes essentiels qui régissent l'évolution. Il faut donc compléter les matrices MSC par d'autres outils qui permettent de tenir compte des influences positives et négatives d'un système et de comptabiliser séparément celles-ci. Les *matrices négative-positif-neutre* (NPN) sont un progrès dans ce sens.¹¹ Une autre possibilité est de calculer les "variétés" positives et négatives qui vont s'exercer contradictoirement sur le système.⁷ Ces additifs ne sont pas des détails. Il n'est pas indifférent de savoir si une variable influe sur d'autres éléments dans un sens positif ou négatif. On sait en effet que le cumul des relations positives (type loi de croissance exponentielle) conduit quand le "plus" entraîne le "plus" à des phénomènes d'explosion, celui des relations négatives, quand le "moins" entraîne le "moins", à des phénomènes de blocage. Les rétroactions négatives aux relations positives, quand toute variation vers le "plus" entraîne une

¹¹ZHANG W. R. et al. " Pool 2, a generic system for cognitive map development and decision analysis" IEEE transactions on system, man, and cybernetics, jan.-feb. 1969.

correction vers le "moins", permettent des régulations et l'établissement d'équilibres. On pressent les implications de la prise en compte de la qualité des relations. Il devient ainsi possible d'identifier les contradictions dans les influences et dépendances de chacune des variables et du système tout entier. *Il faut donc introduire l'analyse des contradictions dans l'analyse de la dynamique du système* que la matrice MSC évacue. Car la contradiction est au cœur de la compréhension du système et de son évolution. Cette évidence n'est cependant pas passée dans la pratique de la prévision et de la prospective.

• **les scénarios** sont le développement de l'état actuel des matrices structurelles courantes (MSC)

On a vu qu'on peut toujours partager la matrice d'interdépendance en quatre zones, soit selon le rang des variables, soit par rapport aux moyennes de motricité et de dépendance. On a ainsi une première base pour extraire les variables essentielles du système considéré dont on se servira pour établir des scénarios.

Les zones ont une signification. Les variables "fortes", fortement motrices et faiblement dépendantes (Z1) ont une indépendance relative. Les variables "faibles", fortement dépendantes et faiblement motrices (Z2) sont en quelque sorte des résultats du système. Les variables à la fois faiblement dépendantes et motrices (Z3) sont quasi autonomes. Au contraire les variables à la fois fortement influencées et motrices sont des éléments sensibles du système, on a pu les appeler "variables relais". Ce sont les variables fortes et les variables relais qui vont jouer le rôle principal dans l'évolution du système considéré. C'est à partir d'elles que l'on formulera des *hypothèses d'évolution*

Les hypothèses d'évolution sont formulées en tenant compte de *la stratégie des acteurs* qui opèrent les variables essentielles. Le monde des scénarios n'est pas un théâtre d'ombre ni une économie régie par "l'invisible main". Il incorpore explicitement les relations de pouvoir dans la compréhension du passé et du présent et dans la réflexion sur le futur. La construction de la base du scénario comprend donc: la délimitation du système et éventuellement son découpage en sous-systèmes, l'analyse de son évolution passée et de son état présent, l'identification de ses facteurs d'évolution, les projets des acteurs.

Ensuite ces jeux d'hypothèses peuvent être probabilisés par différentes techniques. L'acte le plus important est de synthétiser ces hypothèses dans un ensemble cohérent. *Les scénarios diffèrent fondamentalement dans leur principe de la méthode DELPHI: celle-ci vise à la convergence des opinions, les scénarios à la cohérence des images résultantes du futur.*

DELPHI part d'une hypothèse et procure une image du futur assortie d'une date de réalisation, les scénarios sont construits à partir d'hypothèses déduites par l'analyse, la combinaison cohérente de celles-ci donnent *des images d'avenirs alternatifs*. Tous les futurs ne sont pas envisagés, mais seulement ceux qui ap-

paraissent *possibles*. Une technique consiste à élaborer un scénario tendanciel et de scénarios contrastés conduisant à des futurs différents. On essaye ensuite d'identifier à l'intérieur des scénarios possibles le plus *probable*. Celui-ci est à comparer avec le scénario *souhaitable*. La comparaison entre les deux fournit des indications sur les mesures à prendre pour que la réalité future soit le plus près possible du futur souhaité. Entre le ou les scénarios envisagés et l'état actuel on peut retracer un ou des *cheminements*, des itinéraires pour arriver au but recherché. Envisagé ainsi le scénario n'est plus seulement un instrument descriptif et passif mais un instrument actif, anti-fataliste, au service des projets et espérances.

Il faut dire que peu de scénarios obéissent à ces règles de construction, et que sous le nom abusif de scénario on baptise ce qui n'est le plus souvent que l'extrapolation d'une tendance. Cependant la méthode des scénarios, malgré son intérêt, présente des *faiblesses*. Ainsi le nombre de scénarios théoriquement concevables s'élève avec le nombre d'hypothèses considérées selon la formule 2^n . Avec 6 hypothèses il y a 64 scénarios envisageables. En conséquence la tendance est de réduire le nombre des hypothèses, souvent au prix d'une aggrégation de variables dont la justification théorique n'est pas toujours évidente et qui, au demeurant, peuvent contenir des contradictions masquées. On fait donc un travail intellectuel dans deux sens opposés, d'une part, on essaye d'accéder à la connaissance la plus approfondie du système avec l'élaboration des matrices d'interdépendance et leur traitement, d'autre part, on réduit drastiquement l'information par une compression non démontrée des variables et des évolutions du système. Sans nul doute il est nécessaire de mettre en œuvre un programme de R&D de cet outil primordial de la prospective. *Il n'en demeure pas moins que malgré leurs limites les scénarios constituent une voie de réflexion collective et de prise de conscience des problèmes, qui a des effets positifs plus par son processus d'élaboration que par ses résultats, plus par l'attitude anti-fatalité qu'elle engendre que par les décisions qu'elle suggère.*

Dans le domaine plus spécifique de la technologie la méthode est aussi une incitation à une analyse systémique plus approfondie à la fois des réalités "physiques" et "sociales" qui conditionnent la création et l'évolution de l'innovation et de sa diffusion.⁴

• La méthode des matrices de passage itératif "mission-technologie-science"

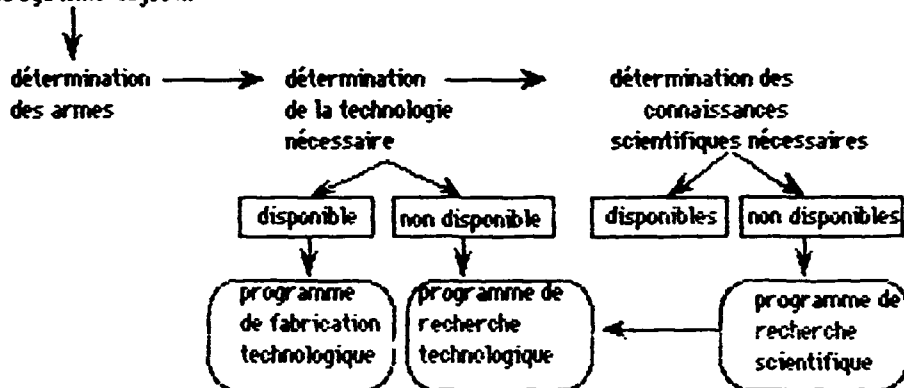
Des méthodes opérationnelles ont été mises au point par les militaires qui se rattachent à la prévision technologique en fonction des missions poursuivies, particulièrement pour définir de nouvelles armes.

La démarche peut être résumée comme suit. Etant donnée une mission à accomplir on détermine l'arme ou les armes qu'il conviendrait. On se pose ensuite la question si la technologie existe pour produire l'armement. Si elle

existe, il n'y a pas de problème. Si elle n'existe pas la question qui vient est alors si les connaissances existent pour créer cette technologie. Si elles existent on peut bâtir le programme technologique correspondant. Si elles n'existent pas et si on débouche sur l'absence ou l'insuffisance des connaissances scientifiques relevantes, il convient d'organiser le programme de recherche scientifique adéquat.

Ainsi on a la chaîne des séquences suivantes:

missions, détermination
du système-objectif



Les missions sont déterminées à l'aide d'un arbre de pertinence (semble-t-il utilisé pour la première fois par la société Honeywell dans le domaine militaire et spatial et ensuite dans le programme Apollo par la Nasa). Le passage d'une séquence à l'autre s'effectue ensuite par des matrices projet-technologie, technologie-science fondamentale, science fondamentale-projet. On notera que ces techniques sont parfaitement transposables dans le domaine civil et qu'elles seraient particulièrement utiles dans les pays en voie de développement pour l'organisation de la recherche science-technologie orientée vers la réalisation de projets liés à leurs besoins spécifiques.

La méthode est *téléologique*, elle part du but à atteindre pour remonter, le cas échéant à la science fondamentale à mobiliser. Elle va donc du futur vers le présent et de la base de l'édifice technologique vers son sommet.

● l'analyse morphologique est une méthode qui se distingue de toutes les autres.¹²

Il ne s'agit plus ici de faire évoluer des situations ou des systèmes au cours du temps, ni même de prévoir l'occurrence, l'apparition, d'un événement ponctuel, mais d'*imaginer* ce que pourrait être cet événement encore inconnu, faisant par là même tendre la prévision vers le domaine de l'*invention*.

La démarche est inductive. Mais cette démarche est fondée sur l'*analyse de la structure* du système technologique considéré. En biologie la morphologie est

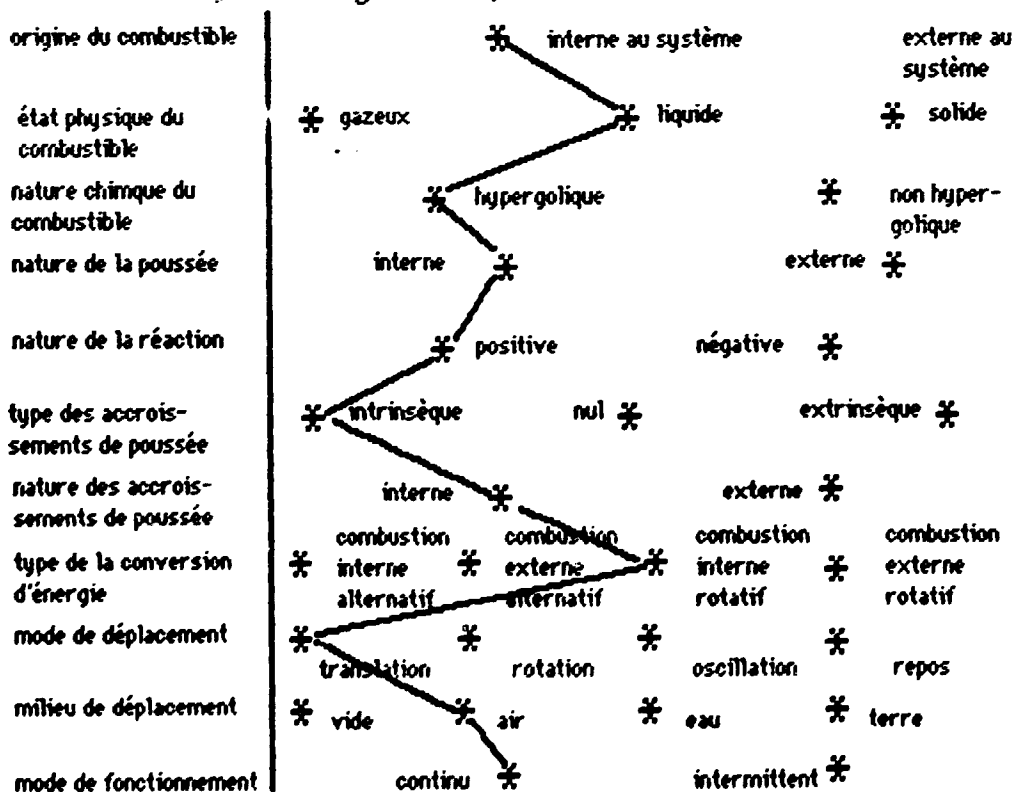
¹² la méthode a été conçue par le célèbre astronome ZWICKY qui découvrit l'existence des trous noirs dans l'espace, voir "morphology and nomenclature of jets engines", aeronautical engineering review, 1947

la science qui étudie la forme et la structure des êtres vivants. l'analyse "morphologique" part de la structure technologique pour imaginer d'autres combinaisons internes de l'être technique, d'autres agencements aboutissant à des changements de forme de celui-ci.

La méthode de l'analyse morphologique est donc d'essence *systemique*. Sa finalité est essentiellement exploratoire. Ce qui est recherché est une vision d'ensemble révélée d'un seul coup et non une approximation progressive assortie de probabilités.

L'analyse comprend deux temps: la décomposition des structures en niveaux, la recherche des solutions.

◊ la décomposition de la structure en niveaux Le graphique suivant illustre la pratique de l'analyse à travers l'exemple de la désagrégation de la structure d'un propulseur chimique considéré comme une structure de propulsion qui peut être représentée par plusieurs niveaux (colonne de gauche du graphique). Cette analyse présente des difficultés. Bien sûr elle demande une compétence technique, mais aussi un arbitrage dans le choix des niveaux à retenir: trop les multiplier rendrait leur analyse impossible, trop les restreindre risquerait de l'appauvrir et de lui faire perdre sa signification. En fait le compromis résultant à une grande portée: il permet de dégager la structure du système. *Avec l'identification de la structure il devient possible de mettre à jour toutes les combinaisons possibles issues de la combinatoire de ses constituants et de leurs relations, et ceci systématiquement*



On notera l'analogie de la méthode avec celle du "state of the art", mais ici on n'est plus dans un univers régi par la continuité, mais par les *discontinuités*, les ruptures, les mutations. L'analyse morphologique se transforme en matrice de découverte. L'imagination a ici pour base solide l'analyse de la structure et ce qu'elle implique, la vision globale, simultanée, des relations entre le tout et les parties.

Essentiellement exploratoire l'analyse morphologique n'en contient pas moins une normativité scientifique de la part de l'opérateur, une ligne directrice et une volonté d'aboutir.

◊ la recherche des solutions s'effectue par la sélection des modalités qui satisfont chaque niveau. On obtient ainsi un arbre dont chaque chemin sera déterminé par une modalité à chaque niveau et qui représentera une solution imaginable. Cette représentation fait penser aux "arbres de pertinence" et aux "graphes d'appui" utilisés dans la méthodologie de décision des choix des projets de recherche. Ils en diffèrent cependant par le fait que ces derniers ont toujours les mêmes niveaux alors que les niveaux de l'analyse morphologique varient selon les systèmes étudiés. Il n'y a pas un cadre standard, chaque structure a sa spécificité et doit être traitée comme telle. Il faut donc, cas par cas, non seulement trouver les "nœuds" du système -ses modalités- mais aussi reconstituer les niveaux caractéristiques propres. L'effort d'analyse est donc double puisqu'il est nécessaire à chaque fois de reconstruire une méthode sans éléments préétablis.

L'ensemble des modalités étant arrêté forme ce qu'on appelle "la boîte ou espace morphologique", on représente les solutions connues en joignant différents points de l'arbre par une ligne continue. Dans le graphique ci-dessous le turboréacteur a été figuré¹³. Il n'est qu'une solution parmi les 36864 imaginables ! (en effet la multiplication des modalités à chaque échelon est la suivante: $2 \times 3 \times 2 \times 2 \times 2 \times 3 \times 2 \times 4 \times 4 \times 4 \times 2 = 36864$). Parmi ces solutions imaginables certaines seront très proches de la solution connue, elles pourront, par exemple, n'en différer que d'une modalité. On dira alors qu'elles ont une "distance morphologique" d'une unité. L'ensemble des solutions proches formera un "voisinage morphologique". Cette notion est très intéressante, elle pourrait être utilisée dans les pays en développement notamment pour la recherche d'adaptations à la technologie importée, elle peut aussi être transposée plus généralement sur le plan de l'éducation technologique pour établir de nouveaux curricula et de nouvelles approches pédagogiques. La mise au point de la méthode n'est pas facile mais c'est une formidable machine intellectuelle mobilisant aussi bien la partie gauche du cerveau siège de l'analyse et de la rationalité que sa partie droite, siège de l'imagination et de la création.

¹³ d'après E. JANSTCH "la prévision technologique", OCDE, 1969.

□ le futur de la prévision technologique

Un phénomène intéressant, mais inquiétant, doit être souligné au terme de cette revue des méthodes de la prévision technologique: l'essentiel a été dit et écrit il y a une vingtaine d'années: Jantsch en 1967, Ayres en 1969, Saint Paul et Tenière-Buchot en 1974, Godet pour le Micmac en 1975. Sans négliger d'autres apports d'importance plus récents, tels ceux de Martino de 1985, analysés dans cette étude, force est de constater qu'aucune percée spectaculaire ne s'est produite. Tout aurait-il déjà été dit? On peut en douter. Pourtant jamais peut-être la variable technologique n'avait revêtu une telle importance, non-seulement pour les choix sociétaux de l'humanité, mais aussi pour les choix stratégiques des Etats et des entreprises. Il y a là une situation paradoxale. Mais qui n'est pas plus paradoxale que le fait qu'il n'existe pas une taxinomie de la technologie.

On peut chercher son explication d'abord dans les conditions générales de l'économie et de la prévision durant cette période. La période de croissance forte du cycle d'après guerre, l'euphorie de la vague d'innovations issues de la révolution scientifique et technique, n'incitaient pas à une grande rigueur prévisionnelle. La réalité allait plus vite. La crise économique du début des années 70, sa persistance, son extension aux pays en développement frappés de plein fouet, la crise économique, sociale et politique des pays de l'Europe de l'Est à la fin de la décennie 80, ont bouleversé le "temps des certitudes et des paradigmes heureux". La crise a pris de cours en Occident des générations d'économistes qui l'avaient exclue de leur vocabulaire et qui étaient intellectuellement mal préparés à la comprendre. Il a fallu pendant des années naviguer à vue et pratiquer un management de crise. Il s'en est suivi un discrédit pour la prévision, en général, qui n'a pas épargné la prospective, bien qu'elle soit différente de la prévision. Le résultat le plus clair a été l'arrêt de recherches d'envergure dans ces domaines. Cependant la crise perdurant et l'incertitude croissant, il a fallu, particulièrement pour les firmes multinationales, reprendre la réflexion sur l'avenir. Le corps de techniques d'analyse nommée "planification stratégique de l'entreprise" est la réponse des organisateurs à cette demande qui constitue un nouveau marché. C'est la tentative hâtive de transposition sur le plan de l'entreprise de l'approche prospective. Mais comme celle-ci n'a pu développer entre temps une nouvelle génération d'instruments, elle fait avec ceux qui sont disponibles et qui devraient être développés. *En définitive, les incidences de la crise, l'absence de programmes de R&D de la prospective expliquent en partie la situation de quasi stagnation méthodologique.*

Une autre explication peut tenir aux conditions internes de la prévision technologique durant cette période. Elle conduit à la question: "qui a été le centre actif de la pratique de la prévision technologique?" Sans aucun doute les

militaires qui sont à l'origine de méthodes qui ont été signalées dans cette étude. Mais la discrétion est ici de règle. Et si une percée méthodologique s'est produite, elle constitue une arme dont il n'y a pas intérêt à faire état. Probablement aussi les grandes entreprises ont développé leurs méthodes poussées par l'aiguillon de la concurrence. Mais il s'agit aussi d'une forme de guerre, qui bien que seulement économique marque du secret les avancées réalisées. De fait des travaux ont lieu, notamment dans le secteur du pétrole, dans celui de l'informatique, des biotechnologies, etc...soit directement par les compagnies, soit par des filiales d'études de banques, soit par les sociétés montant des entreprises de "capital risques" où l'exploration des avenir incertains est la partie essentielle de la prise de décision. Mais il va de soi que les informations sur ces activités ne sont pas du domaine public. *En définitive le secret militaire et celui des affaires pourraient dissimuler des progrès de la prévision technologique.* Avec cette réserve qu'il serait très surprenant que les méthodes susceptibles d'être utilisées marquent une percée conceptuelle décisive. Cela se saurait.

Or il ne semble pas que les raisons précédentes soient l'explication principale, bien qu'elles jouent un rôle certain. *Il faut chercher la cause dans la stagnation intellectuelle de la pensée prospective elle même.*

C'est à cette conclusion qu'arrive un des hommes qui a le plus apporté à la méthodologie et la pratique de la prévision technologique et qui concorde pleinement avec les vues développées par ailleurs par l'auteur de cette étude¹⁴. Dans un important article R.U. AYRES¹⁴, 20 ans après avoir écrit l'ouvrage qui reste le plus important en la matière, fait le point et envisage le futur de la prévision technologique.

Il pose d'abord différentes questions pour lesquelles nous avons besoin de meilleures méthodes de prévision, par exemple: " Est-ce que le taux et la direction du changement technique peut être prévu avec suffisamment de précision pour procurer un guide de décision pour les investissements et désinvestissements ? Est-ce le temps maintenant pour pousser les carburants synthétiques ? les cellules photovoltaïques ? les superconducteurs ? la fusion ? Y a-t-il une voie rationnelle pour décide de ces questions ?....." " Y a-t-il une longue vague ou un long cycle dans l'économie mondiale ? Si oui, est-il corrélé avec une grappe (clustering) d'innovations majeures durant cette période ? Pourquoi cette grappe se produit-elle ? A-t-elle lieu maintenant ? Est-ce que la réponse apporte quelques lueurs aux prévisionnistes de la technologie dans la situation présente ?....." D'autres questions ont été mieux traitées, en partie parce que les données existaient qui permettaient ue analyse. Par exemple: " l'estimation

¹⁴ R.U. AYRES "the future of technological forecasting", *Technological forecasting and social change* 36, 1989.

de l'importance relative comme déterminants du changement technologique des forces "push" versus "pull"; la mesure de la rentabilité des investissements en R&D; le changement des effets des prix relatifs du travail, du capital, de l'énergie sur l'innovation; la détermination de l'efficacité relative des petites entreprises versus les grandes compagnies comme innovateurs...." Mais il y a d'énormes lacunes et embarrassants dans nos connaissances. Particulièrement dans les données de "l'engineering". Cette lacune ne peut être comblée par les économistes. "Dans le contexte présent, (la remarque) est simplement que l'économie est une discipline trop étroite pour le problème du changement technologique" La mesure du changement technique est nécessaire pour une variété de décisions politiques, elle implique *l'interdisciplinarité, une meilleure théorie du changement technique, de nouvelles approches méthodologiques.*

R. AYRES note le biais introduit par les méthodes d'extrapolation et la faiblesse de la théorie: "la relative rareté des "time-séries" disponibles a obscurci le fait qu'il y a en principe un énorme choix possible de variables pour l'extrapolation ou la modélisation, et il n'y a virtuellement aucune théorie pour les sélectionner. En réalité le choix peut affecter la prévision de façon subtile. Il est vitalemment important de reconnaître que le choix des variables est une source potentielle de biais et de développer une approche systématique pour le compenser. (Incidentement ce choix peut seulement être fait par un analyste possédant une connaissance technologique- un des arguments pour des efforts interdisciplinaires impliquant engineers et économistes) " *En définitive le futur de la prévision technologique est fonction, d'une part, de percées ("breakthroughs") méthodologiques, d'autre part, de la suppression de certains goulets d'étranglement ("bottlenecks").*

Le "breakthrough" essentiel est le suivant: "il faut de meilleurs modèles causaux, basés sur des théories économiques plus sophistiquées... et pour développer de meilleurs modèles causaux de prévision, il est nécessaire de développer de meilleures explications du changement technologique au niveau micro-économique"

Les "bottlenecks" à supprimer sont: "la surcharge d'informations (information overload), la nécessité de filtres; la tour de babel linguistique en informatique qui empêche la communication entre ordinateurs; la complexité des machines et des systèmes; l'énergie renouvelable non polluante."

A cette analyse on peut ajouter ceci. Sans aucun doute les méthodes passées en revue dans ce document sont, à des titres divers, utiles, et, faute de mieux, peuvent éclairer en partie la prévision technologique. Mais il est plus clair après vingt ans de pratique étendue que son amélioration est subordonnée à une meilleure compréhension du système technique et de son évolution. La technologie est une création sociale. Elle est donc le produit matriciel des lois de

la nature et de celles de la société. Aborder son devenir par une seule de ses faces est voué à l'échec. Raisonner dans le cadre d'une conception intrinsèque de la technologie comme système fermé est passer à côté de ce qui constitue souvent l'essentiel: la formidable induction de la société, de ses besoins, régulations et relations de pouvoir sur la création technologique et sa diffusion. Envisager la technologie comme le seul produit d'une pensée économique, c'est faire une rationalisation a posteriori irréaliste, c'est réduire les lois de la société aux seules lois économiques, c'est évacuer les lois physiques de cette dernière, avec leurs contraintes, cohésion et cohérences. Le futur de la prévision technologique tient à la capacité d'articuler ces lois de la nature et de la société. Or dès lors que l'on reconnaît la nécessité d'incorporer ces dernières la problématique véritable de la prévision technologique est celle de la prospective, systémique et interdisciplinaire. La multitude des variables à considérer conduit aussi à faire appel aux moyens de l'informatique, en étant conscients que ceux-ci, malgré leur puissance ne sont que des moyens. Le mot de la fin reste la percée conceptuelle à opérer.