



Groupes Recherches Stratégiques

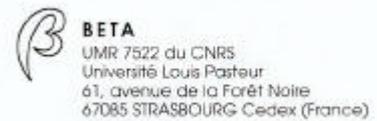
CHOIX D'INVESTISSEMENT DANS LES PROJETS DE RUPTURE TECHNOLOGIQUE ET FORMES ORGANISATIONNELLES

IMRI (Université Paris-Dauphine) - coordinateur
BETA (Université Louis Pasteur, Strasbourg)
ITEP-LEM (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne)

RAPPORT SCIENTIFIQUE FINAL

Mars 2001

Décision d'aide à la recherche N° 98 MT 07/2
PREDIT 1996-2000
Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement
Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques



Ce rapport présente les résultats de l'étude portant sur les "**choix d'investissement dans les projets de rupture technologique et formes organisationnelles**". Il a été rédigé par Dominique Foray sur la base d'un certain nombre de contributions écrites des équipes participantes au projet ; soit le BETA (Université Louis Pasteur de Strasbourg) : Stéphanie Danner Petey, Patrick Llérena, Eric Schenk, l'IMRI (Université Paris-Dauphine) : Emmanuel Boutron, Albert David, Dominique. Foray, Staffan Hulten, Corinne Saubesty, Sébastien Vernimmen, et le LEM/ITEP (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) : Francis-Luc Perret, Guillaume de Tilière.

Le rapport est accompagné de **six Documents de Travail**, qui reprennent ces contributions - études de cas et développement analytiques :

DT N°1 : "Incrémentalisme et rupture technologique : étude de cas à la SNCF",

par Corinne Saubesty et Sébastien Vernimmen (septembre 1999)

DT N°2 : "The Quest for Affordable High Speed Trains – high speed train development in Sweden",

par Staffan Hultén (décembre 1999)

DT N°3 : "Choix d'investissements dans les projets de rupture technologique – éléments d'analyse à partir du cas allemand",

par Stéphanie Danner Petey, Patrick Llerena et Eric Schenk (décembre 2000)

DT N°4 : "SWISSMETRO"

par Guillaume de Tilière et Francis-Luc Perret (janvier 2000)

DT N°5 : "Financement de projet : Swissmetro"

par Emmanuel Boutron et Guillaume de Tilière (novembre 2000)

DT N° 6 : "Technological Discontinuities and Disruptive Innovations in High Speed Train Development"

par Staffan Hultén (décembre 2000)

Cette étude réalisée de juin 1998 à décembre 2000 a été financée dans le cadre de la Décision d'aide à la recherche n° 98 MT 07/2 – PREDIT 1996-2000, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement – Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques.

L'IMRI tient particulièrement à remercier pour leurs participations et commentaires, les intervenants du séminaire final de présentation des résultats, qui s'est tenu le 07 décembre 2000 à l'Université Paris - Dauphine, (cf programme en annexe).

Nous remercions également Messieurs Bernadet, Brun, Frybourg et Yguel pour leur lecture attentive d'une première version de ce document. Leurs suggestions et remarques ont été prises en compte, dans la mesure du possible, pour établir cette version finale.

SOMMAIRE

PREMIÈRE PARTIE	p 7
OBJET DE LA RECHERCHE, QUESTIONS ET PROBLÉMATIQUE	
1 – Préliminaires	p 7
11) Il y a eu un âge d’or !	p 8
12) Age d’or révolu !	p 8
13) Un projet interdisciplinaire	p 9
2 - Anatomie d’une rupture technologique	p 11
21) Rupture et discontinuités	p 11
22) Rupture et innovations	p 14
23) Rupture et incertitude	p 17
24) L’importance des formes d’organisation	p 18
3 - Le cadre général d’analyse	p 22
31) La problématique de la tension entre transition et rupture	p 22
32) Le rôle des communautés professionnelles dans la rupture technologique	p 23
33) Le dilemme de l’apprentissage technologique	p 23
34) Projets de rupture et gestion de la connaissance	p 24
35) Financement	p 24
36) Evaluation	p 24
DEUXIÈME PARTIE	p 26
ENTRE TRANSITION ET RUPTURE, INCRÉMENTALISME ET RADICALITÉ	
1 – La tension entre la transition et la rupture	p 27
11) Les bonnes propriétés de la transition	p 27
12) L’arbitrage avec la recherche de performance	p 28
2 – La création d’une communauté épistémique	p 29
21) La constitution de la communauté épistémique	p 29

- 22) L'émergence d'instigateurs du changement dans chaque métier p 31
- 23) Des modèles institutionnels propices à l'émergence d'une communauté épistémique p 32

TROISIÈME PARTIE p 33
ANALYSE ÉCONOMIQUE DES APPRENTISSAGE TECHNOLOGIQUES
ET DE LA GESTION DES CONNAISSANCES

1 – Apprentissage, irréversibilité et option p 33

- 11) Cadrage conceptuel p 33
- 12) Application : Transrapid et ICE p 38

2 – Comment adoucir la tension entre apprentissage et irréversibilité p 40

- 21) La limitation des coûts de l'apprentissage p 41
- 22) La répartition des coûts de la préservation d'options p 45

3 - Rupture technologique et gestion de la connaissance p 46

- 31) Complexité organisationnelle p 46
- 32) Mémoire organisationnelle p 48

QUATRIÈME PARTIE p 51
FINANCEMENT ET ÉVALUATION

1 – Financement p 53

- 11) La phase initiale : comment financer de la R&D? p 53
- 12) La phase de construction : les spécificités des projets d'infrastructure ferroviaire p 54
- 13) La phase d'exploitation p 56
- 14) Des économies bien différentes qui impliquent une hiérarchie claire des sources de financement p 57
- 15) Les coûts d'agence p 58

2 – Evaluation et décision d'allocation des ressources p 59

- 21) L'évaluation technique : du critère de valeur actuelle nette au critère d'option

de croissance	p 59
22) L'évaluation institutionnelle : changer les critères	p 62
23) L'évaluation socio-économique : l'art du recodage	p 63
Conclusion	p 64
Bibliographie	p 67
Annexe	p 69

PREMIÈRE PARTIE

OBJET DE LA RECHERCHE, QUESTIONS ET PROBLÉMATIQUE

1 – Préliminaires

Depuis quelques années les grands projets de rupture technologique dans le domaine du transport ferroviaire ne vont pas bien. Swisstram, le Transrapid ou encore le MLX japonais – tous connaissent différentes sortes d'avatars : certains projets sont mis en sommeil ; d'autres sont fortement réorientés (notamment vers des objectifs de distance courte de type desserte d'aéroport). Qu'un projet de forte rupture connaisse quelques difficultés n'est bien sûr pas surprenant. En effet, une rupture technologique offre la perspective d'un projet incertain et risqué, qui entre en concurrence avec des systèmes existants, robustes et éprouvés. Elle engendre des discontinuités tant technologiques qu'économiques et sociales. Elle limite enfin grandement les possibilités de transposer des expériences et des pratiques passées. En outre, le domaine du transport ferroviaire est caractérisé par des échelles de projet très grandes – ce qui multiplie les risques et les incertitudes. Tous ces éléments concourent donc à faire de la gestion d'un projet de rupture un problème délicat.

Cependant, le passé récent est riche en exemples de grands projets de rupture réussis et menés à bien. Il y aurait donc eût un âge d'or ; celui-ci serait révolu ; la question étant de savoir quels types de nouvelles modalités de gestion et d'économie de ces grands projets pourraient permettre à ceux-ci d'être menés à bien dans ce contexte nouveau.

1.1) Il y a eu un âge d'or !

Nous pouvons décrire deux grandes conditions – très présentes durant la période de l'après-guerre jusqu'aux années 90 – qui nous semblent jouer un rôle important dans la capacité des sociétés de l'époque à mener à bien ces grands projets.

D'une part, les structures de politique technologique et industrielle, connues en France sous le terme de " Colbertisme industriel ", favorisaient le lancement et l'accomplissement de grands projets de rupture. Ces structures sont caractérisées par une relation forte et unique entre les pouvoirs publics, un opérateur, un (petit nombre) d'industriels et une institution de recherche. Elles facilitent la convergence des objectifs et permettent, pour le meilleur et pour le pire, l'engagement sans détour de tous ces acteurs dans le projet. Ces structures – élargies au système bancaire – tolèrent des projets techniquement brillants mais dont la rentabilité directe estimée peut rester faible.

D'autre part, la croyance en une certaine forme de progrès – typique des années 60 et 70 – permettait d'éviter le détour par le débat social. Par exemple " la très grande vitesse " est un objectif indiscutable, au service du bien être, auquel adhère l'ensemble des forces sociales. D'ailleurs, la catégorie " projet de rupture technologique " représente pour beaucoup à cette époque la quintessence de l'innovation. C'est ce qu'écrivait par exemple un penseur aussi averti que François Perroux: " on accordera que les innovations majeures, stratégiques, sont imputables aux Centres de recherche et aux grandes unités de l'Armement et des Industries nouvelles " (Perroux, 1979).

1.2) Age d'or révolu !

Les structures de politique technologique et industrielle se sont grandement complexifiées, sous les coups de la déréglementation du secteur des transports et de la privatisation de nombreux acteurs. L'engagement collectif d'un ensemble d'acteurs devient beaucoup plus difficile à obtenir ; ceci d'autant plus qu'un niveau de rentabilité faible n'est plus tolérable dans le contexte actuel de fonctionnement du système bancaire.

Par ailleurs, la croyance en une certaine forme de progrès, notamment le " toujours plus vite ", s'est érodée et ce type de " codage " ne suffit plus pour légitimer un projet et l'intégrer aux attentes

fondamentales de nos sociétés. Ainsi, les stratégies technologiques des compagnies ferroviaires semblent désormais privilégier la consolidation de leurs parts de marché (en axant leurs efforts d'innovation sur le confort et le marketing) plutôt que la recherche de ruptures.

Bien évidemment, on se gardera d'avoir une lecture nostalgique de ce changement d'époque. Les structures politiques de type Colbertisme industriel avaient de nombreux inconvénients dont l'analyse n'est pas l'objet de ce rapport. Avec l'irruption du débat public et la participation de plus en plus active des citoyens aux grands débats technologiques, scientifiques et industriels, c'est toute la démocratie qui s'en porte beaucoup mieux (Callon, 1997). La question n'est donc pas le retour à l'âge d'or mais bien plutôt la confection de nouvelles méthodes et de nouveaux outils pour permettre la gestion de grands projets de rupture – du lancement à la finalisation - dans les conditions nouvelles politiques, économiques et sociales.

1.3) Un projet interdisciplinaire

Face à ce constat d'un âge d'or perdu, notre questionnement révèle des difficultés presque insurmontables. Comment financer par le marché les phases initiales (de grande incertitude) d'un projet de rupture ? Comment assurer et maintenir le plus longtemps possible la diversité des options et des alternatives, pour permettre d'effectuer une sélection qui minimise la probabilité d'un mauvais choix, tout en assurant les apprentissages et expérimentations nécessaires à l'amélioration de notre connaissance des différentes variantes ? Comment construire la communauté de "croyants " ou de pionniers, qui ne doit pas seulement appartenir au cercle étroit des chercheurs scientifiques mais, qui doit nécessairement impliquer des industriels, des banquiers, des exploitants et des opérateurs, dont la plupart appartiennent désormais au secteur privé ? Comment provoquer la rupture, tout en insérant les nouveaux équipements dans les réseaux complexes déjà existants ? Comment évaluer de façon correcte et équitable une technologie encore incertaine et problématique face aux systèmes existants, robustes et éprouvés ?

Les conditions dites "de l'âge d'or " permettaient non pas de résoudre mais de négliger la plupart de ces problèmes. La disparition de ces conditions les révèle dans toute leur acuité et en fait les points nodaux du processus de gestion du projet. On se rend compte désormais que les projets de rupture technologique concentrent d'immenses difficultés, pas seulement scientifiques et technologiques mais

aussi socio-économiques et financières. Du registre unique de l'ingénieur - celui de " l'amour des techniques " (Latour, 1992) - on doit passer à des registres multiples.

Plus que jamais, il apparaît nécessaire de développer une économie des grands projets de rupture, sur la base de laquelle on pourra créer les dispositifs de gestion possédant certaines " bonnes propriétés ".

Le projet de recherche ainsi exposé est de nature interdisciplinaire. Il a mobilisé les efforts collectifs d'économistes (économie de l'innovation), de gestionnaires (gestion des organisations et gestion financière) et d'ingénieurs (transport, management et logistique). Son avancement a permis la création de conditions propices à un dialogue fructueux entre ces disciplines.

L'économie générale des grands projets de rupture dans le domaine des transports ferroviaires, qui est développée dans ce rapport, repose sur une analyse élémentaire des cas suivants (encart ci-dessous). Ces cas ont en outre été confrontés systématiquement aux théories en gestion de projet, gestion financière et économie de l'innovation.

Présentation des cas

Les études de cas ont été effectuées par pays:

France: projets pendulaires – étude présentée dans l'annexe DT N°1

Suède: TGV – étude présentée dans l'annexe DT N°2

Allemagne: ICE et Transrapid – étude présentée dans l'annexe DT N°3

Suisse: Swissmetro – étude présentée dans l'annexe DT N°4

2 - Anatomie d'une rupture technologique

En provoquant des discontinuités à différents niveaux, la rupture technologique soumet la gestion de projet à deux contraintes majeures : la contrainte de l'innovation et la contrainte de l'incertitude. Par là même, elle impose des formes d'organisation et des modes de gestion spécifiques.

2.1) Rupture et discontinuités

Une rupture technologique repose sur un changement de paradigme – ce qui change, c'est donc le mode d'opération technique communément accepté comme le moyen habituel d'accomplir une tâche technique. La rupture déclassé le système conventionnel tel qu'il est défini et accepté par la communauté des professionnels concernés. Elle détermine donc de nombreuses discontinuités. Il ne s'agit pas là d'un argument trivial à partir du moment où ces discontinuités sont identifiées et leurs implications sur la gestion de projet analysées. Nous distinguerons ci-dessous les discontinuités dans le domaine de la R&D et dans le domaine des usages. Bien d'autres formes de discontinuités, engendrées par une rupture technologique, pourraient être évoquées ; notamment celles qui concernent l'exploitation et l'administration du nouveau système technique.

Discontinuités dans le domaine de la R-D

Un projet de rupture technologique détermine par définition des discontinuités au niveau de l'infrastructure technologique. Nous définirons l'infrastructure technologique – propre à un secteur ou à un domaine – en suivant Tasse (1995). Celle-ci se compose de la base scientifique, des technologies génériques et des infratechnologies (voir glossaire ci-après).

Premièrement, un projet en rupture est un projet caractérisé par la faiblesse des apports potentiels des modèles scientifiques existants. Pour expliquer ce point, on peut reprendre la classification des processus d'investigation scientifique, selon quatre niveaux (Kline et Rosenberg, 1986) :

- au premier stade, le travail scientifique est uniquement descriptif ;
- à l'étape suivante, le travail de recherche devient taxonomique ;

- on passe ensuite à la formation de règles et d'hypothèses généralisables ;
- le travail de recherche aboutit enfin à la construction de modèles prédictifs.

Lorsqu'elle est située au niveau 4, l'investigation scientifique est immédiatement utilisable dans une perspective de concept analytique et d'innovation. Aux stades 1 et 2 en revanche, il n'y a pas d'autres alternatives que de développer l'innovation par la méthode la plus lente et la plus coûteuse du tâtonnement expérimental. Or, dans le domaine des technologies de rupture, le plus souvent, l'état de la science ne permet pas encore l'élaboration de modèles prédictifs.

Deuxièmement, un projet de rupture par définition ne permet pas de bénéficier fortement des indications provenant des concepts anciens. La rupture implique le risque que les résultats obtenus en deçà d'un certain seuil ne sont plus valables au delà. Certaines lois physico-chimiques peuvent s'inverser. Nous dirons que les " correspondances homotopiques " sont faibles (cf glossaire). Il y a donc une discontinuité importante qui rend impossible une politique d'évolution progressive du projet, sur la base d'investissements additionnels modestes en installations et en ressources humaines. Par ailleurs les transferts d'un domaine à un autre – dépendants de l'importance des liaisons analogiques (cf glossaire) sont limités. Au regard de la faiblesse des liaisons homotopiques et des liaisons analogiques, le projet de rupture aura une " compacité " élevée (cf glossaire), tant sur le plan matériel qu'informationnel ; ce qui affectera grandement les rendements économiques (cf glossaire).

En somme, la rupture technologique implique un déficit critique en " infratechnologies " et en " instrumentations ". En d'autres termes, il manque la base instrumentale des activités de R&D, qui devront être effectuées dans le cadre du nouveau paradigme. Un ingénieur remarquait dans le cas d'une rupture technologique en aéronautique : " Lot of things need to be measured that we don't know to measure " (cité in Foray et Gibbons, 1996). Les projets de rupture sont donc très souvent caractérisés par une phase initiale (c'est-à-dire avant même la phase proprement scientifique), à forte composante technologique, consistant en la production des infratechnologies et de l'instrumentation appropriées.

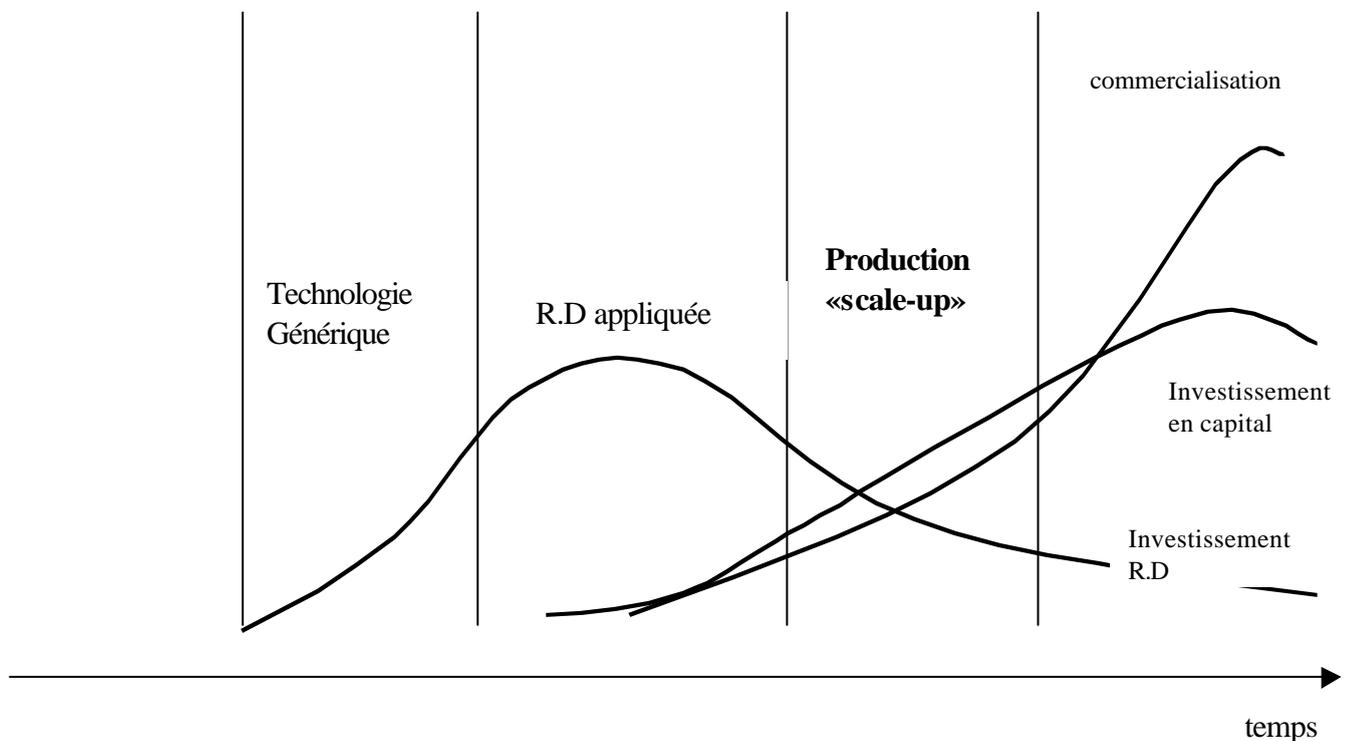
Glossaire : ruptures et discontinuités

- paradigme technologique : mode d'opération technique communément accepté, moyen habituel d'accomplir une tâche technique, système conventionnel tel qu'il est défini par la communauté des professionnels concernés. Un paradigme technologique n'est pas un simple dispositif ou procédé, c'est une analyse raisonnée, une pratique, une façon de procéder, une méthode, l'utilisation d'un ensemble d'instruments et une manière spécifique et commune de percevoir une certaine technologie (Constant, 1973);

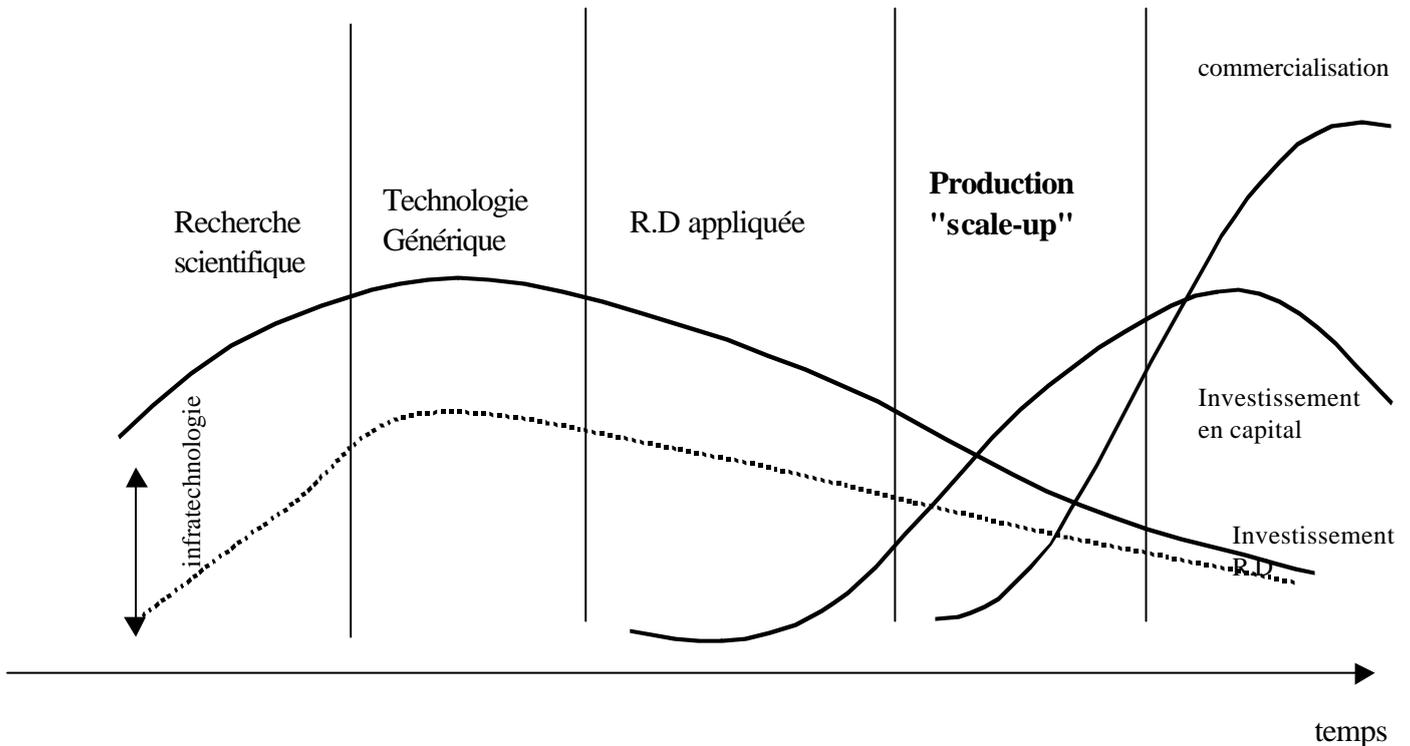
- technologie générique : ce sont les concepts de produit et de procédé depuis lesquels les applications commerciales seront développées grâce à des programmes lourds de R&D appliquée. Une technologie générique comprend le concept démontré en laboratoire mais non pas les produits et les procédés finalement développés (Tassey, 1995)
- infratechnologies : base instrumentale des activités de R&D (données scientifiques nécessaires aux opérations de mesure, test, contrôle et essai, méthodes et instruments de recherche, savoirs et savoir faire de recherche) (Tassey, 1995)
- correspondance homotopique : cette notion vient de la topologie. Deux correspondances seront dites homotopiques si l'une peut être déformée de manière continue au sein de l'autre. Ainsi en mécanique, une théorie prédisant la réaction d'un objet physique sollicité par une force externe sera vraie pour tout objet de masse plus importante. L'état des relations entre force et masse est donc considéré comme indifférent au changement du paramètre de masse (David, Mowery et Steinmueller, 1992) ;
- liaisons analogiques : la nature est conservatrice dans l'usage des concepts et des structures. Le concept de symétrie appliqué tant en mathématique et physique qu'en chimie et cristallographie est un bon exemple de liaison analogique, ayant permis l'extension de résultats théoriques depuis un domaine (David et al. op cit.) ;
- compacité (lumpiness) : la production de résultats nouveaux nécessite la résolution antérieure d'un plus ou moins grand nombre de sous-problèmes dans le domaine de la recherche. La compacité peut prendre à la fois une forme informationnelle (minimum de sous-problèmes à résoudre) et matérielle (minimum d'installations expérimentales nécessaires). Cette propriété est particulièrement prononcée là où les correspondances homotopiques sont faibles (David et al., op cit.).

Ces discontinuités dans le domaine de la R&D vont déterminer un profil d'investissement de R&D très particulier, dont les montants cumulés sont élevés et le phasage spécifique (cf figures ci-dessous). Ainsi, la figure 1b pourrait illustrer le cas de la technologie Maglev - développée depuis bientôt 30 ans - alors que les phases d'application commerciale n'ont pas encore commencé et les phases d'homologation sont en cours dans différents pays.

1b - Le cycle d'investissement pour un changement technologique " normal "



2b -Le cycle d'investissement pour une rupture technologique



- Discontinuités dans le domaine des usages

La rupture technologique détermine forcément des discontinuités dans l'usage du nouveau système, tant du point de vue des opérateurs que de celui des usagers finaux.

Du point de vue des opérateurs, les discontinuités apparaissent à de nombreux niveaux - par exemple à celui du personnel opérationnel et de maintenance, à celui de la fourniture du service, à celui de la tarification.

Quant à l'usage final qui sera fait du nouveau système, il est largement imprédictible si la nature même de la rupture technologique incite à l'adoption de nouveaux comportements (par exemple de nouveaux comportements de mobilité).

2.2) Rupture et innovations

Il serait peu utile voir même partiellement incorrect de considérer que la rupture technologique correspond à une innovation radicale. Ou bien alors c'est qu'il s'agit d'une notion abstraite et désincarnée d'innovation. Une meilleure façon de concevoir les rapports entre rupture technologique et innovation serait plutôt de dire que la rupture technologique et les processus qui l'opérationnalisent vont déterminer des centaines d'innovations. Cette multitude d'innovations est produite selon différentes logiques :

- des innovations résultant des avancées des théories scientifiques dans les domaines considérés. Il s'agit en règle générale d'une catégorie relativement marginale ; elle peut cependant prendre de l'importance dans le cas de projets de rupture fortement fondés sur la science ;
- des innovations résultant des contextes d'application (Foray et Gibbons, 1996). Il s'agit de la logique sans doute dominante : les tests et expérimentations font surgir de nouveaux problèmes et de nouvelles occasions d'innover ; et plus on se rapproche d'applications en grandeur nature et conditions d'exploitation commerciale, plus cette catégorie devient dominante ;
- des innovations résultant des interdépendances étroites et des rétroactions entre différentes parties du nouveau système technique, qui impliquent que tel changement introduit quelque part peut conduire à d'importants changements dans d'autres parties.

Bien évidemment, ces multitudes d'innovations ne concernent pas seulement l'axe technique, mais elles touchent également les dimensions d'organisation, d'usage, de financement et plus généralement d'économie.

Cette nouvelle manière de considérer les rapports entre rupture et innovation nous conduit à formuler quatre types de question, à bien des égards centrales pour notre investigation.

- les sources de l'innovation

Le système de recherche, les fabricants (système qui se décompose en donneurs d'ordre et sous-traitant, en intégrateurs de système et composants), les exploitants ainsi que l'utilisateur final sont les principales sources de l'innovation. Dans ce cadre, l'exploitant joue le rôle fondamental du "lead user" (von Hippel, 1988). Cette co-existence de multiples sources pose de nombreux problèmes pour la gestion du projet : des problèmes de coordination technologique (ajustements mutuels et de management

de la connaissance), des problèmes d'identification et de repérage d'innovations importantes et des problèmes d'acceptation et d'adoption de celles-ci par l'ensemble du système.

- multitude d'innovations et formes d'organisation

Selon N.Alter (1993, 1995), innovation et organisation sont deux phénomènes antinomiques. L'organisation vise à réduire l'incertitude en programmant, planifiant et standardisant les activités collectives de travail. Elle a donc pour objectif de prévoir et d'optimiser les ressources disponibles à un moment donné ; élaborant pour ce faire un "programme rationnel ". L'innovation, au contraire, se développe dans les espaces non programmés de l'entreprise ou autre institution. L'innovation se programme mal nous dit Alter car on ne peut prévoir à l'avance la manière dont elle va se dérouler. Or, à partir du moment où l'innovation est l'essence même de la rupture technologique et que les espaces non programmés du projet s'élargissent infiniment, on peut se demander quelle forme organisationnelle adéquate peut-on associer à un projet de rupture technologique. La gestion de l'innovation suppose la création de nouvelles règles d'organisation. Dans cette perspective, on va analyser les projets de rupture dans leurs capacités à susciter la création de ces règles. Le projet est en lui-même une forme de coordination qui peut offrir une certaine prise à des communautés détachées de leurs institutions d'origine pour s'articuler autour de quelque chose qui reste incertain, offre peu de règles et de normes stabilisés.

- reconnaître la nécessité de la diversité des innovations

Comme on l'a dit, les innovations suscitées par la rupture ne sont pas seulement techniques. Elles doivent être aussi organisationnelles, économiques, relatives à la façon dont le nouveau service sera offert (marketing, tarification, paquet de services), relatives aux usages. Il est possible de faire la conjecture qu'un projet de rupture, caractérisé par un profil d'innovation uniquement technique, aura des difficultés à déboucher sur une application opérationnelle. On comprend dès lors qu'il est intéressant de connaître le profil innovatif d'un projet de rupture (quel est l'espace de créativité qui est exploré par les acteurs, quels sont ceux qui sont négligés?) pour identifier les domaines où l'innovation est négligée. Si l'on définit quelques catégories d'innovation : i) procédé technique, ii) performance des produits et services, iii)

technique de livraison, iv) design, mode et présentation, v) technique de vente et de financement, on s'aperçoit que la tendance naturelle des participants initiaux est de se concentrer sur les procédés techniques et les performances d'ingénierie. Le codage initial d'un projet de rupture privilégiant le défi technologique, les acteurs surinvestissent dans une ou deux classes d'innovation relatives à la technologie et négligent d'autres espaces de créativité, cependant capitaux pour le futur du projet. Les économistes expliqueraient un tel phénomène en référence à la théorie des défaillances du marché, liées dans ce cas à des phénomènes de dépendance du sentier (Steinmueller, 1991).

- innovation et évaluation

L'évaluation d'un projet de rupture, base de la décision publique et privée, ne peut s'en tenir à l'évaluation de la rupture elle-même en tant qu'innovation radicale. Les mille innovations que la rupture va déterminer doivent être exprimées, probablement dans la colonne des bénéfices. Ce que les économistes appellent externalités de connaissance prend ici la forme particulière de cette multitude d'innovations. Ces externalités ne doivent donc pas échapper à l'évaluation, non plus que les formes organisationnelles, délibérément mises en place pour que ces innovations irriguent effectivement le reste de l'économie. En effet, on sait depuis bientôt 30 ans que le progrès technique n'est pas une manne tombée du ciel (autrement dit les innovations produites dans le cadre d'un projet de rupture ne vont pas automatiquement bénéficier à telle ou telle partie de l'économie). Il faut des réseaux, des médiateurs, des capacités d'absorption, sans doute des marchés.

23 - Rupture et incertitude

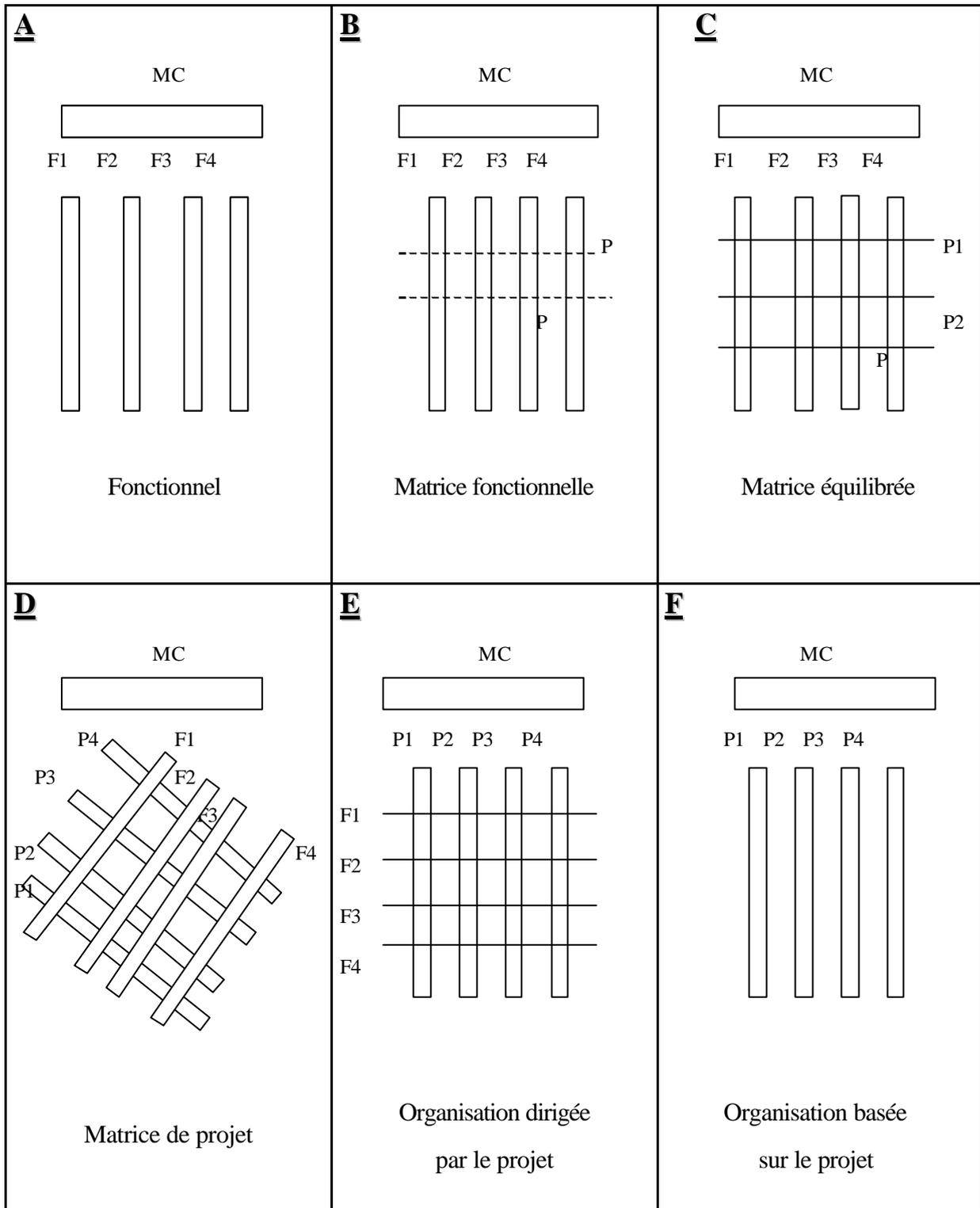
Discontinuités et innovations se conjuguent pour engendrer un contexte d'incertitude radicale. L'incertitude radicale touche à la fois le point d'arrivée - quelle sera la technologie ? quel sera le marché ? l'exploitation sera-t-elle un succès commercial - ainsi que le cheminement pour y parvenir ? C'est l'incertitude sur le point d'arrivée qui crée "le fossé de crédibilité" qui peut notamment dissuader les banques de soutenir le projet (cf quatrième partie). Quant à l'incertitude sur le cheminement, elle oblige à concevoir des formes d'organisation flexibles, capables de se transformer en cours de route.

24 - L'importance des formes d'organisation

Face à la double contrainte évoquée (innovation et incertitude), la recherche de formes d'organisation adéquates constitue en elle-même une question centrale.

L'importance de formes d'organisation spécifiques est par exemple très bien mise en évidence dans le cas de la genèse du TGV. À l'origine du succès de cette rupture, on trouve en effet une structure innovante étonnamment moderne (Klein, 2000) : le "service de la recherche", unité relativement légère, placée sous la dépendance directe de la Direction Générale et transversale aux Directions Techniques. Elle incorpore des ingénieurs plutôt jeunes, enthousiastes et aux compétences parfois totalement inédites dans le monde ferroviaire (ibid.).

À cet égard, on peut analyser le projet lui-même comme une forme de coordination ; sans doute la seule forme possible de coordination lorsque le projet de rupture concerne un ensemble technologique complexe ou une infrastructure. Cependant la notion même "d'organisation basée sur le projet" reste peu étudiée. Elle est habituellement utilisée en contrepoint d'une organisation fonctionnelle. Il est en effet possible de créer des matrices où les structures fonctionnelle et de projet se superposent ; l'une des deux déterminant la logique principale de l'organisation. D'où les 6 schémas suivants - qui vont d'une forme fonctionnelle pure à une forme de projet pure.



MC : management central - P : projet - F : fonction

Pour déterminer la forme appropriée à un grand projet de rupture technologique, il convient d'identifier les propriétés que l'organisation doit posséder dans ce cas particulier. Cette forme organisationnelle doit :

- i) définir les mécanismes de coordination entre de multiples sites et équipes afin de permettre les ajustements mutuels dans un cadre de très fortes interdépendances des actions ;
- ii) être adaptée à la gestion du risque et de l'incertitude et définir dans cette perspective des mécanismes d'allocation de ressource flexibles ;
- iii) susciter et absorber l'innovation en concevant des structures favorables à l'innovation (incitation, hiérarchie, autonomie), en possédant une certaine robustesse permettant au système dans son ensemble de tolérer les erreurs et échecs, inévitables dans un contexte d'expérimentations intenses, en assurant " le retour " des innovations, leur acceptation par l'ensemble des structures ;
- iv) incorporer dès le départ du projet l'utilisateur du système (à la fois l'opérateur et l'utilisateur final) considéré comme une source essentielle d'innovations et d'informations ;
- v) contribuer à l'acquisition par les équipes - travaillant sur les différents aspects du projet - d'une identité, d'une cohérence. Ici la qualité du leadership comme propriété de l'organisation joue un rôle essentiel ;
- vi) être capable de produire des stratégies organisationnelles et d'évaluer les performances du projet ;
- vii) last but not least, d'assurer des gains de productivité en dépit d'une économie peu propice à la réutilisation des ressources et aux économies d'échelle de toutes sortes. Les gains d'efficacité doivent donc venir d'autres sources que les effets d'échelle :
 - ré-allocation de ressources vers d'autres projets ou d'un sous-projet à un autre ;
 - gestion de la connaissance ;
 - optimisation de la conception et des apprentissages (voir troisième partie) ;

Cet ensemble de propriétés est vraisemblablement impossible à réunir dans une organisation trop marquée par des structures fonctionnelles (de la forme de A à C pour dire vite). Les organisations basées sur le projet sont celles qui peuvent permettre plus aisément un assemblage de ces propriétés.

3 – Le cadre général de l'analyse

L'économie générale des grands projets de rupture dans le domaine du transport ferroviaire est donc fondamentalement soumise aux contraintes d'innovation et d'incertitude. Ces contraintes sont encore renforcées par les spécificités du domaine - celui de l'infrastructure ferroviaire - dans lequel l'échelle des investissements est très grande. Enfin, c'est parce qu'émerge un nouveau contexte économique - lequel implique que l'on ne peut plus gérer ces projets de rupture comme on le faisait auparavant - que de nouvelles méthodes doivent être inventées.

Dans un tel nouveau contexte, les discontinuités engendrées par la rupture technologique sont meurtrières ! Elles s'expriment en termes d'ignorance cognitive dans les domaines de la R&D et des usages, de fossé de crédibilité pour les financiers, d'évaluation impossible en matière de décisions publiques ou encore de déconnexion complète du nouveau système par rapport au réseau existant. L'objet de notre projet (et le défi des nouveaux modes de gestion) revient donc à "fabriquer " de la continuité au-delà des discontinuités fondamentales.

Cette recherche d'éléments de continuité est effectuée selon six axes qui sont résumés ci-dessous. Il s'agit de six faits saillants – c'est-à-dire qu'ils apparaissent sous une forme ou une autre dans chacune des études de cas .Chacun de ces faits saillants sera ensuite longuement développé, dans le cadre des parties 2, 3 et 4 de ce rapport.

3.1) La problématique de la tension entre transition et rupture

Il s'agit d'un fait saillant pour chaque étude qui pose le problème du choix ou du compromis entre " performance et continuité ". Il est toujours plus facile d'obtenir des performances extraordinaires (par exemple rouler à 600 km/heure) lorsque l'on conçoit le projet de façon abstraite, c'est-à-dire en totale discontinuité avec le reste du système de transport et d'infrastructure. Il est beaucoup plus difficile d'élever les performances quand le projet est contraint par la nécessaire insertion du nouveau système dans l'infrastructure existante. Ce choix n'est pas binaire. Il y a bien évidemment un continuum de solutions entre discontinuité totale et continuité complète.

Ce premier fait saillant est fondamental. Il structure à bien des égards l'ensemble de l'économie du projet. Trouver un chemin de transition contraint fortement la recherche de performance mais réduit de

nombreux risques et incertitudes – tant sur le plan du financement que sur celui de l'évaluation, de l'apprentissage et des communautés professionnelles.

3.2) Le rôle des communautés professionnelles dans la rupture technologique

La gestion d'une rupture technologique dépend étroitement de la capacité d'une partie importante de la communauté professionnelle concernée à changer de direction et de référence pour adopter une approche nouvelle.

Tout le problème d'un projet de rupture technologique de ce point de vue est donc de permettre l'émergence d'une communauté de "croyants ". La question est d'autant plus difficile que, dans le cas d'une technologie complexe, de nombreuses institutions sont concernées : Science et recherche de base, industrie produisant les biens d'infrastructure, exploitant, système bancaire, administration publique. Précisons qu'il est capital que l'exploitant, en tant que "lead user " (Von Hippel, 1988) soit "contaminé" très tôt par les nouvelles croyances. Ainsi, la communauté d'instigateurs du changement, qui doit émerger, doit être composée de représentant de chacune de ces institutions.

3.3) Le dilemme de l'apprentissage technologique

L'idée générale est que la situation de rupture technologique est caractérisée par un contexte d'incertitude importante. Cette incertitude porte notamment sur les options technologiques à développer pour aller vers les objectifs de performance qui ont été plus ou moins identifiés. Il revient alors à l'apprentissage technologique de réduire cette incertitude et de permettre une qualification progressive des options. On retrouve alors le fameux dilemme entre l'objectif de produire des informations sur une option et l'objectif de conserver de la flexibilité. Il y a dilemme à partir du moment où la production d'information suppose l'engagement d'activités (expérimentation) dont les coûts fixes sont importants. Ainsi, " au début tout est possible, mais on ne sait que faire ; à la fin du projet, on sait, mais on ne peut plus rien ". Il est crucial de développer les outils pour surmonter ce dilemme : " learning without doing ", nouvelles méthodes de production de la connaissance permettant de minimiser les coûts d'expérimentation (simulation), méthodes d'optimisation des apprentissages (en parallèle, successif),

transferts et synergies. Il est aussi capital de définir un enchaînement optimal de phases (exploration et exploitation) qui correspond aussi à une évolution des formes d'organisation.

3.4) Projets de rupture et gestion de la connaissance

Un projet de rupture technologique est un projet de long terme, caractérisé par la dispersion des sites de recherche et d'application. C'est un projet qui risque de connaître "une histoire mouvementée" : changement de personne, révision de choix.

C'est un projet enfin, qui ne coïncide pas avec les frontières d'une firme. Cet ensemble de caractéristiques rendent le stock de savoir accumulé, particulièrement fragile et vulnérable. Des méthodes explicites de gestion de la connaissance sont aussi nécessaires, par exemples pour préserver " la mémoire du projet ".

3.5) Financement

La phase initiale d'un projet de rupture pose des problèmes de financement très difficiles, qui d'une certaine façon échappent aux formes classiques de financement. Vu la grande incertitude de cette première phase, le capital-risque devrait être concerné au premier plan ; ce qui n'a pas été le cas en Europe jusqu'à présent.

Ce n'est qu'au terme de cette phase de R&D, lorsque commence la phase de construction qu'un mode de financement classique peut être conçu. Tout au long des phases de construction et d'exploitation subsiste une incertitude qui, cependant, change de nature. Elle devient plus socio-économique que purement technique.

Ce qui frappe en étudiant les modalités de financement de projet est la succession de problématiques économiques extrêmement différentes ; lesquelles déterminent des logiques de financement bien distinctes. Nous distinguons la problématique de la rupture technologique (première phase) et la problématique de construction et exploitation de l'infrastructure (deuxième et troisième phases). Cependant la phase intermédiaire est à bien des égards la plus délicate dans la mesure où les deux problématiques se superposent.

3.6) Evaluation

La capacité d'évaluation d'un projet dans un cadre pertinent et à l'aide de critères qui ne biaisent la comparaison entre les performances du système existant, robuste et éprouvé, et celles du système nouveau, est fondamentale. Nous distinguerons trois niveaux :

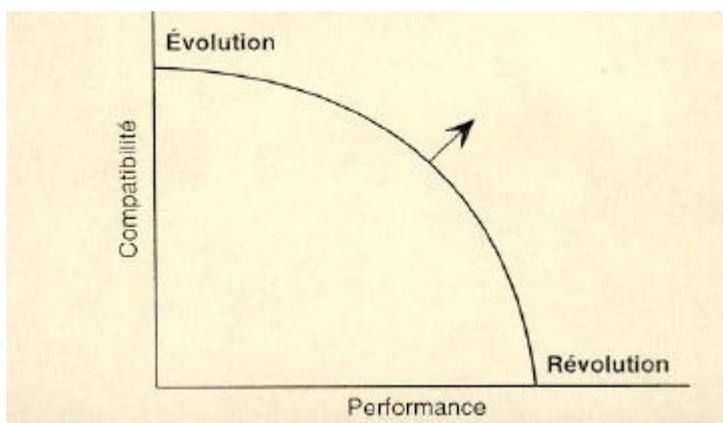
- méthodes et techniques: coût - bénéfice (VAN, TIR, DRCI), valeur d'option, méthode d'évaluation de projets caractérisés par des coûts concentrés et des bénéfices diffus ; problème de mesure des bénéfices de long terme et des externalités positives ;
- dimension institutionnelle : les évaluations sont dépendantes du contexte, de la nature de l'institution, missionnaire ou conservatrice ; les évaluations sont marquées par le paradigme précédent ;
- dimension politique : l'évaluation fait référence à une certaine notion de progrès ; au delà de la vitesse, de la mobilité, quel projet socio-politique ; quelle démarche permet de " recoder " un projet pour en consolider la légitimité et l'assise sociale ; comment rechercher des contextes futurs voir futuristes qui font que le projet apparaît comme un impératif.

DEUXIÈME PARTIE -

ENTRE TRANSITION ET RUPTURE, INCREMENTALISME ET RADICALITÉ

1 - La tension entre la transition et la rupture

Il est possible de classer tous projets de rupture technologique dans un espace défini par les axes de "performance" et de "transition" (sur le graphique : "comptabilité").



source : Shapiro et Varian, 1999

Par définition, la nécessité de définir des chemins de transition entre systèmes technologiques (par exemple de permettre au nouveau matériel roulant d'emprunter l'infrastructure existante ou de permettre à l'ancien matériel roulant d'utiliser les nouvelles infrastructures) contraint la quête de la performance. Il est plus aisé d'obtenir une performance exceptionnelle si le projet est conçu en totale discontinuité avec le reste du système.

Il y a donc un conflit entre transition et performance. Ce conflit peut être résolu de plusieurs façons : soit en choisissant de privilégier l'un des deux termes ; soit en dépassant ce conflit grâce à des innovations

révolutionnaires dans la conception des systèmes ; soit en privilégiant des stratégies d'incrémentations continues.

1.1) Les bonnes propriétés de la transition

Déterminer un chemin de transition possède de nombreux avantages du point de vue de la gestion du projet. La notion de transition est liée à celle de compatibilité technique. Trouver un chemin de transition c'est maintenir un certain niveau de compatibilité entre le nouveau système et l'ancien. Si l'on s'inspire de la littérature spécialisée sur le sujet (David et Bunn, 1991), on considérera la compatibilité comme le fait d'obtenir le fonctionnement conjoint d'éléments qui satisfassent à certains critères minimaux de performance. Trouver un chemin de transition vise donc, dans le cas des ruptures technologiques de transport ferroviaire, à obtenir le fonctionnement conjoint du matériel roulant et du réseau ferré - chacun appartenant à un système technique différent. Ainsi, le projet TGV peut être caractérisé par cette notion de chemin de transition, tandis que les systèmes Maglev sont des projets non compatibles avec les systèmes existants.

Le fait de définir un chemin de transition détermine le grand avantage suivant :

- il est possible de procéder au développement incrémental de l'infrastructure, en dépit de l'existence " d'externalités d'infrastructure " (dans le domaine ferroviaire, la valeur économique de la technologie est croissante avec l'importance du réseau d'infrastructure associé). Autrement dit, on peut commencer l'exploitation commerciale dès l'achèvement d'un segment, même minime du réseau : avec seulement 100 ou 200 kilomètres de nouvelles lignes, le TGV reliera tout de même Lyon à Paris grâce à la compatibilité entre les nouveaux véhicules et l'ancienne infrastructure. La réorientation actuelle de certains grands projets vers des distances commerciales courtes (type desserte d'un aéroport dans le cas du projet Maglev de Pittsburg aux Etats Unis) montre en creux l'avantage d'un chemin de transition, qui permet de procéder à un développement incrémental.
- ce premier avantage en détermine toute une série d'autres: le fait de pouvoir procéder à un développement incrémental et donc de ne pas attendre pour l'exploitation commerciale la construction d'un réseau complet réduit de fait l'échelle du projet ainsi que l'horizon temporel d'exploitation et

diminue donc de nombreux risques et incertitudes : le fossé de crédibilité, comme disent les financiers (voir section 1 de la quatrième partie) est considérablement réduit.

Les bonnes propriétés de la transition sont à rechercher du côté de ce développement incrémental qui diminue risque et incertitude plutôt que de celui de la minimisation des coûts ; lesquels au bout du compte peuvent être aussi élevés que dans le cas d'une rupture totale. (Ce point est parfaitement établi par l'étude de cas sur le train rapide en Suède, cf DT N°2). La question n'est donc pas tant celle des dépenses cumulées que celle de la plus grande précocité de l'ouverture de la fenêtre d'opportunité d'exploitation commerciale. C'est en somme la gestion temporelle du projet qui est facilitée ; ce qui risque d'augmenter fortement la valeur actualisée des bénéfices futurs et donc permet une analyse Coût / Bénéfice, donnant des résultats plus favorables.

1.2) L'arbitrage avec la recherche de performance

Pourquoi, dès lors, tous les projets ne recherchent-ils pas un chemin de transition ? C'est évidemment parce qu'assurer une transition revient à contraindre fortement la recherche de performance. Or si les contraintes sont trop fortes, c'est dès lors l'utilité même du projet qui est remise en question. Pourquoi consentir de lourds investissements si le résultat final n'améliore que marginalement les performances que l'on obtient avec les systèmes existants (systèmes existants qui peuvent eux mêmes grandement s'améliorer sous le coup de la menace potentielle de la nouvelle technologie; phénomène connu par les historiens des techniques sous l'expression de "l'effet bateau à voile "). C'est par exemple le cas du projet rail 2000 en Suisse, qui engage des coûts extrêmement importants pour des gains mineurs (de l'ordre de 5 minutes) dans les liaisons intercity.

Il y a ici un risque évident de dérive incrémentaliste. Privilégiant la recherche de transition, on parvient à un résultat qui au bout du compte ne change que très marginalement les performances. "Qu'avez-vous fait de la rupture ? " pourrait-on demander aux promoteurs d'un projet trop prudent. On perçoit très bien ces effets de dérive incrémentaliste par la sanction économique du marché quand le différentiel de performance est insuffisant pour séduire les usagers potentiels.

C'est donc bien d'un arbitrage qu'il s'agit entre la compatibilité parfaite et la discontinuité totale.

2 - La création d'une communauté épistémique

Une rupture technologique, un changement de paradigme impliquent fortement les communautés professionnelles attachées aux champs technologiques concernés.

Si l'on définit le paradigme technologique comme un mode d'opération technique communément accepté en tant que moyen habituel d'accomplir une fonction (analyse raisonnée, méthode, façon de procéder, manière spécifique et commune de percevoir une certaine technologie), le changement de paradigme, la rupture ne peuvent intervenir que lorsqu'une partie importante de la communauté change de direction et de référence pour adopter une approche nouvelle.

2.1) La constitution de la communauté épistémique

Tandis qu'à chaque métier peut être associée une communauté professionnelle, la communauté qui doit émerger dans le cas d'une rupture technologique doit traverser chacun de ces métiers et se constituer autour du projet de rupture. Dans ce contexte, une communauté épistémique peut être définie comme un groupe partageant des objectifs communs dans un certain cadre d'autorité procédurale; laquelle assume la responsabilité de médiation et d'arbitrage dans le cas de désaccord et de conflit et, en outre, valide et confirme les progrès vers l'objectif commun (cf. Cowan, David et Foray, 2000). L'existence d'une autorité procédurale est en fait très importante puisque cette communauté n'est pas fondée sur un système de pratiques codifiées et de références professionnelles.

Evidemment, l'émergence d'une communauté épistémique ne peut se déclencher que s'il existe des pionniers, des instigateurs du changement, à la fois compétents sur la technologie normale et détachés d'elle (prêts à changer de " croyance ").

Etre détaché de la technologie normale ne va pas de soi. Un facteur important ici réside dans la prégnance du passé technologique du pays ou de l'institution dans le domaine considéré. Par exemple, certains pays au passé ferroviaire peu important seront plus ouverts à la rupture technologique ou auront au moins une neutralité bienveillante envers celle-ci (cas de la Chine, des Etats Unis). Mais au delà de l'héritage technologique comme élément de conservatisme (Rosenberg, 1986), la perception que le

système ne pourra plus fonctionner dans les conditions prévues à terme joue un rôle décisif dans l'émergence d'instigateurs du changement.

- L'importance de l'anomalie par présomption, comme facteur déclencheur

Comme le montre bien Constant (1973), toute technologie est en elle-même imparfaite. Tout procédé ou dispositif technique peut être amélioré et devenir plus rapide, plus sûr, plus efficace. Ce "malaise" général de la technologie favorise le progrès par la technologie "normale" (celle qui se situe à l'intérieur du paradigme conventionnel), de même qu'il conduit aux changements de rupture. L'anomalie technologique qui provoque le changement révolutionnaire résulte généralement d'un échec fonctionnel : le paradigme existant s'avère inadapté à des conditions nouvelles ou plus strictes. Il faut que le système existant "s'essouffle" pour que le nouveau ait une chance. Mais l'échec fonctionnel n'est pas l'unique source possible de la recherche de rupture. Il peut se produire ce que Constant appelle une "anomalie par présomption", lorsque certaines hypothèses ou connaissances scientifiques font dire que, dans telles ou telles conditions à venir, le système conventionnel cessera de fonctionner (ou fonctionnera mal) ou qu'un paradigme radicalement nouveau exécutera la même tâche beaucoup mieux, ou fera quelque chose d'entièrement différent. Dans ce dernier cas, il n'y a pas d'échec fonctionnel (le système en cours fonctionne toujours très bien) mais on présume l'existence d'une anomalie ; d'où le terme d'anomalie par présomption.

Il est clair que l'anomalie par présomption doit être telle que l'on puisse dire si oui ou non le nouveau système proposé offre une solution satisfaisante. Étant donné la résistance intrinsèque et nécessaire des communautés technologiques aux changements paradigmatiques, tout paradigme nouveau qui ne s'appuierait pas sur des éléments quantitatifs, n'aurait guère de chances d'être adopté – si brillant qu'il puisse se révéler par la suite.

Ainsi, les éléments quantitatifs sur lesquels s'appuient les projets Maglev sont indiscutables :

- vitesses commerciales nettement plus élevées que celles des systèmes roue /rail /caténaires ;
- coûts de maintenance beaucoup plus faibles ;
- performances énergétiques supérieures.

- Une communauté transversale

Tout le problème d'un projet de rupture technologique de ce point de vue est donc de permettre l'émergence d'une communauté de "croyants", traversant l'ensemble des métiers concernés et situés à un niveau fonctionnel et hiérarchique suffisamment élevé. La question est d'autant plus difficile que, dans le cas d'une technologie complexe, de nombreuses institutions sont concernées : Science et recherche de base, industrie produisant les biens d'infrastructure, exploitant, système bancaire, administration publique. Précisons qu'il est capital que l'exploitant, en tant que "lead user" (Von Hippel, 1988) soit touché très tôt par les nouvelles croyances. Ainsi, la communauté d'instigateurs du changement, qui doit émerger, doit être composée de représentant de chacune de ces institutions. Les questions qui surgissent alors sont de deux ordres :

- Quels sont les facteurs favorables/défavorables à l'émergence d'instigateurs du changement dans chacune des institutions ?
- Quels sont les modèles institutionnels les plus propices à l'émergence d'une communauté professionnelle transversale croyant au nouveau paradigme ?

2.2) L'émergence d'instigateurs du changement dans chaque métier

Sur la première question, il est clair que les facteurs varient selon les institutions :

- Science et recherche de base : c'est dans ce domaine que l'on recrutera le plus facilement des instigateurs du changement ; c'est en effet la nature et l'intérêt du travail scientifique que d'explorer de nouvelles options et de se situer à la frontière des connaissances.
- Industrie de biens d'infrastructure : le biais est plutôt en défaveur ; sans pression des exploitants et/ou de la concurrence, il y a peu de chance que des instigateurs du changement apparaissent spontanément, à l'exception du cas de nouveaux entrants à la recherche de niches de marché.
- Exploitants ferroviaires existant : le biais est plutôt en défaveur à l'exception du cas où une nouvelle technologie crédible apparaît et semble être en mesure de déclasser la technologie dominante de l'exploitant (cas de la SNCF confrontée à l'aérotrain). Mais l'émergence d'une technologie de rupture peut donner lieu à la constitution d'une société sur mesure, détachée de l'exploitant existant.
- Système bancaire : le biais est clairement en défaveur (comme on le verra plus loin, du point de vue du banquier, "un bon projet est un projet sans rupture technologique") ;

- Administration publique : il est difficile de généraliser; l'attitude face à la rupture dépend des domaines de compétences (recherche, transport, industrie, économie) et du niveau d'agrégation (Europe, national, régional). On peut ainsi penser que l'on trouvera assez aisément des instigateurs de changement chez les administrateurs des programmes de recherche de Bruxelles et beaucoup moins facilement au ministère des finances, national ou régional !

2.3) Des modèles institutionnels propices à l'émergence d'une communauté épistémique

Au sujet de la seconde question, sur les modèles institutionnels les plus propices à la constitution et à la consolidation d'une communauté professionnelle, plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- un modèle dans lequel existent de claires relations hiérarchiques entre un pôle dominant (l'exploitant & l'administration publique) et un pôle exécutant (recherche de base & industrie) est un modèle qui peut avoir certaines vertus de notre point de vue : grâce à ces "blocs institutionnels", il suffit que l'exploitant soit convaincu par le nouveau paradigme pour que les nouvelles croyances se propagent rapidement dans les autres institutions (exemple du TGV français). Mais ce modèle a aussi de nombreux défauts : il ne protège pas contre les "government failures" car il n'y a pas véritablement de processus de sélection des projets et l'exploitant peut aussi avoir un effet bloquant.
- Un modèle dans lequel il n'existe pas de relations hiérarchiques (ou peu), sans qu'il y ait non plus concurrence (entre exploitants, entre industriels) est un modèle qui peut rester longtemps bloqué dans une situation d'excès d'inertie car aucun effet d'entraînement ne peut se déclencher.
- Il est donc utile de penser à de nouveaux modèles plus propices ; et notamment celui composé de sorte de blocs institutionnels (exploitant + industriel) reconfigurables, en fonction des stratégies et des éventuels blocages des uns ou des autres.

Enfin le cas des banques est intéressant. La recommandation faite en conclusion de l'étude "financement" qui consiste à développer des spécialisations technologiques pour les banques est certainement un point clé pour susciter l'émergence d'instigateurs du changement au sein des communautés bancaires.

TROISIÈME PARTIE -

ANALYSE ÉCONOMIQUE DES APPRENTISSAGES TECHNOLOGIQUES ET DE LA GESTION DES CONNAISSANCES

1 - Apprentissage, irréversibilité et option¹

1.1) Cadrage conceptuel :

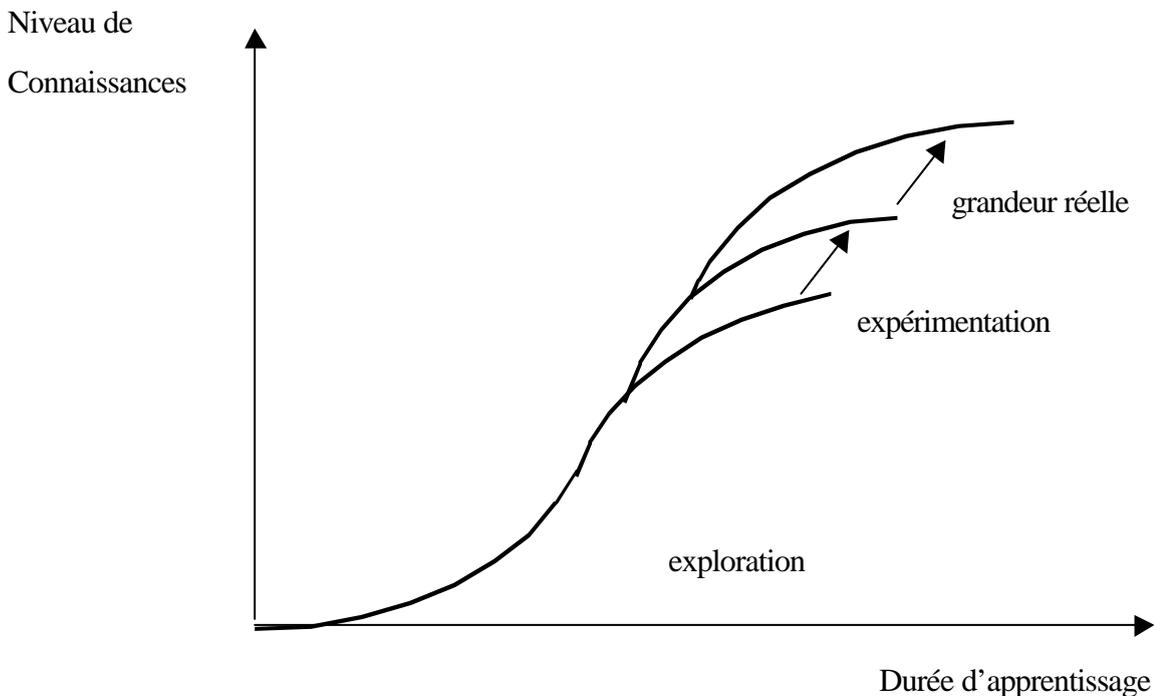
La gestion des ruptures technologiques nécessite la prise en compte de l'existence et de la nature des processus d'apprentissage. Les technologies de rupture sont plus que toutes autres sujettes à des phénomènes d'apprentissage.

Concernant le cas des trains rapides allemands, il paraît pertinent de distinguer deux formes d'apprentissage, c'est-à-dire l'apprentissage par exploration et l'apprentissage par exploitation (cf. March, 1991). *L'apprentissage par exploration* concerne essentiellement la recherche de solutions technologiques adéquates, dans un ensemble de possibles dont les limites ne sont pas encore clairement précisées. En fait ce processus participe autant à la définition des limites de l'ensemble des options disponibles qu'au choix de l'une d'entre elles. Par conséquent cette forme d'apprentissage se caractérise notamment par une méconnaissance des technologies en concurrence. *L'apprentissage par exploitation* succède à l'exploitation et se réfère à un processus de perfectionnement de la solution technique particulière finalement sélectionnée. L'innovation qui en découle a un caractère essentiellement incrémental.

¹ - Cette partie est basée sur les documents de travail du BETA : DT N°3, annexes C&D

La distinction entre apprentissage par exploration et par exploitation présente un intérêt particulier du fait de leur caractère partiellement antinomique : la première requiert une certaine forme de préservation de la diversité, tandis que la seconde est associée à une concentration des efforts sur une solution particulière. Etant donné cette antinomie, la présence d'une séquentialité dans les deux formes d'apprentissage (l'exploitation succède à l'exploration) paraît naturelle. Dans cette optique, la détermination du moment où on change de mode d'apprentissage paraît cruciale (cf. Cowan, 1991) à plusieurs égards. En effet, les phénomènes d'apprentissage présentent des phases de rendements croissants puis décroissants. L'entrée dans une phase d'exploitation est un moyen de répondre au problème des rendements décroissants de la phase d'exploration. Nous distinguons de plus, deux formes d'apprentissage par exploitation: une première où l'exploitation se réalise par 'expérimentation', notamment sur une ligne d'essais ; une seconde où l'exploitation s'effectue en grandeur réelle, par une exploitation commerciale, même partielle ou localisée. Comme nous le verrons ultérieurement, le retard dans le passage d'une phase d'apprentissage à l'autre induit des irréversibilités et des biais dans la concurrence entre technologies.

Apprentissage par séquences successives



encart

la problématique des deux régimes d'apprentissage et du changement optimal

(source, Foray, 1996)

Le lancement d'un projet de rupture détermine une phase d'exploration extensive et d'expérimentation de l'ensemble du spectre des variantes possibles. Ces variantes sont testées. L'apprentissage sur les caractéristiques de la population et l'évaluation des qualités des différentes variantes possibles permettent de diminuer l'incertitude sur les performances relatives des différentes variantes et d'identifier progressivement "la meilleure variante", susceptible d'être sélectionnée. Au terme de cette phase d'apprentissage par la diversité, on disposera d'une information satisfaisante sur la distribution des performances de la technologie générique, selon ses différentes variantes. Il est clair qu'il n'y a pas une distribution unique et que selon les critères de performance privilégiés, la distribution aura plusieurs formes. Par exemple, une recherche de type civil (privilégiant l'objectif de minimisation des coûts) et une recherche de type militaire (recherchant des objectifs de résistance à des milieux extrêmes) aboutiraient à des formes de distribution différentes.

Au terme de cette phase d'apprentissage, il devient donc possible de sélectionner une (ou un petit nombre de) variantes et de procéder à l'amélioration intensive de celle-ci par un usage répété. L'usage répété et la standardisation permettent en effet d'identifier les irrégularités structurelles, qui seront à la source de nouvelles investigations. Il ne faut surtout pas sous-estimer l'importance économique de cette seconde phase d'apprentissage. La plus grande partie des gains de productivité sont en effet obtenus par la voie de l'usage répété et de la standardisation.

Nous avons donc un modèle comprenant deux phases d'apprentissage; l'apprentissage par la diversité et l'apprentissage par la standardisation. Dans ce modèle, le changement technique engendre fondamentalement une perte de diversité, combinée à une élévation de l'efficacité technique.

Chacune des deux formes d'apprentissage possède une valeur économique spécifique.

Concernant l'apprentissage par la diversité, il s'agit de la valeur de l'identification de la meilleure voie de développement. On perd en efficacité immédiate, en sacrifiant en particulier des économies d'échelle, mais ce sacrifice permet d'élever la probabilité de sélectionner plus tard le "meilleur standard".

Concernant l'apprentissage par la standardisation, il s'agit plus classiquement de la valeur d'obtention de gains d'efficacité statique. A certains moments et sous certaines conditions, l'existence d'un standard unique représente un meilleur résultat que la persistance de multiples variantes différentes. Autrement dit, les bénéfices sociaux dérivés de l'exploitation d'un standard unique excéderont la somme des bénéfices engendrés par l'exploitation de plusieurs standards qui coexistent. Les conditions de cette supériorité tiennent en particulier à la façon dont la sélection aura été effectuée.

On devine que le changement de régime d'apprentissage est un moment crucial, moment du choix qui peut arriver trop tôt ou trop tard et qui engagera un ensemble d'agents dans une trajectoire plus ou moins pertinente. Tout le problème de gestion des différentes phases d'apprentissage est d'une part de maintenir l'expérimentation suffisamment longtemps pour amasser les connaissances nécessaires, et d'autre part de déclencher à un moment déterminé la sélection et la phase de standardisation (donc de sacrifier certains projets) en vue d'exploiter les économies d'échelle potentielles en faveur de la variante, qui a été sélectionnée.

Ainsi, la sélection peut intervenir trop rapidement (ou de manière fortuite; ce qui revient au même). Introduire un standard trop tôt revient à clore prématurément la période d'expérimentation et élever la probabilité de choisir la mauvaise technologie. Les coûts de cette standardisation prématurée sont très élevés: allocation de ressources et embarquement collectif sur une "mauvaise" variante; perte précoce du potentiel d'évolution de la technologie: certains développements possibles sont irrémédiablement perdus.

La sélection trop rapide est un événement très courant dans les processus de marché. Elle résulte d'un phénomène très simple, bien exploré par Cowan (1991): premièrement, dans une situation caractérisée par deux variantes [A et B] aussi incertaines l'une que l'autre, toute expérimentation accomplie sur A permet de réduire l'incertitude sur A et d'élever A sur sa courbe d'apprentissage; si bien que l'exploitation de A (qui a bénéficié d'une expérimentation) est maintenant plus profitable que celle de B (qui n'a encore jamais été expérimentée). Deuxièmement, un agent privé survenant ensuite et ayant à choisir entre A et B effectuera un calcul très simple: en choisissant B, il devra supporter un coût correspondant au différentiel de rendement entre A et B mais il produira "généreusement" de l'information sur

les caractéristiques de B pour les agents suivants, qui pourront effectuer des choix dans un contexte de moindre incertitude sur les caractéristiques de la population des variantes. Notre agent aura contribué ainsi à l'élévation de la valeur sociale du processus de sélection. En choisissant A en revanche, il bénéficie des expérimentations précédentes sur A et il évite de produire de l'information sur B pour les agents suivants; ce qui ne lui aurait de toute façon rien apporté. Evidemment, il choisit A de même que le suivant et ainsi de suite. Un phénomène de sélection et de standardisation spontanée apparaît, lié à ce que le marché sous-investit en expérimentations. Quand bien même nous n'avons pas tenu compte ici des problèmes d'appropriation de l'information produite (l'agent peut ne pas divulguer les connaissances produites), nous venons de saisir un mécanisme puissant, qui est au cœur du phénomène de l'émergence spontanée d'un standard. Les processus dynamiques qui sous-tendent ce mécanisme -- les rendements croissants et les rétroactions positives -- sont des forces économiques qui, lorsqu'elles ne sont pas contrôlées poussent irrésistiblement à la sélection brutale, la perte précoce de diversité et la standardisation spontanée et non contrôlée. Mais la sélection peut intervenir aussi trop tardivement -- ceci étant un phénomène plus rarement analysé. Une trop longue période d'expérimentations, l'exploration trop approfondie d'un grand nombre de directions possibles conduit les agents à former leur propres anticipations sur les chances de développement de telle ou telle variante et à engager des ressources importantes sur leur développement. Le système ne peut plus basculer vers la standardisation. L'excès de diversité qui découle de cette incapacité à sélectionner entraîne un risque de pertes d'efficacité en empêchant l'exploitation des économies d'échelle et en bloquant la réduction des coûts qui serait obtenue grâce à un apprentissage intensif sur une option particulière. La situation particulière des trains à grande vitesse en Europe aujourd'hui peut être décrite de manière stylisée par cette notion d'excès de diversité. Quelque soit les facteurs à l'origine de cette situation, nous nous trouvons face à un système bloqué dans un excès de diversité, dont il sera très difficile de sortir et qui a aujourd'hui un coût faramineux.

Le problème de timing qui vient d'être évoqué -- trop rapide ou trop tardif -- est d'autant plus crucial que les situations qui découlent de la sélection sont irréversibles. Lorsqu'une technologie est sélectionnée, elle progressera de plus en plus vite sur sa courbe d'apprentissage, atteignant très vite la portion supérieure de celle-ci -- puisque le rythme de la répétition de l'usage lui-même s'accélère au fur et à mesure que les agents adoptent en masse cette variante. Le coût du changement de technologie devient donc très vite extrêmement élevé.

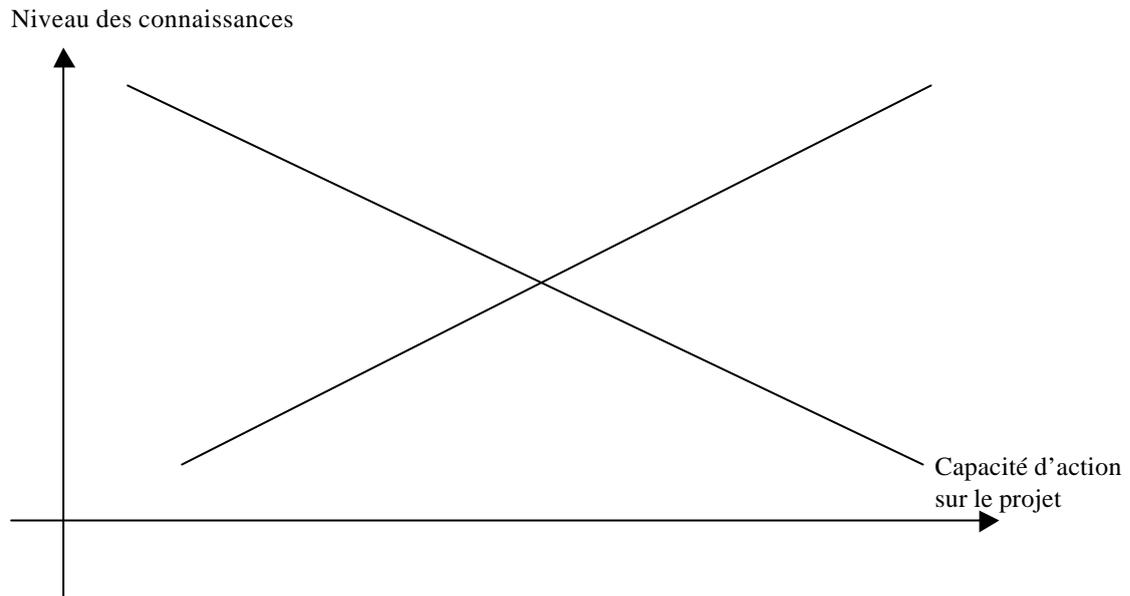
Lorsque, au contraire, un ensemble de variantes ont été expérimentées et développées longuement, la formation d'anticipations différentes sur les caractéristiques futures du standard empêche (rend très coûteuse) toute élimination ultérieure de telle ou telle variante.

Ainsi, un agent central dont l'objectif est de favoriser la sélection du "bon" standard doit soutenir les expérimentations et préserver la diversité pour réduire l'incertitude sur les caractéristiques de la population des variantes. Mais à un certain moment, la diversité devient coûteuse tandis que suffisamment d'informations ont été produites sur les qualités respectives des technologies. L'agent central doit alors enclencher le processus de sélection.

- Apprentissage et irréversibilités

La prise en compte des processus d'apprentissage doit également se compléter par une analyse de la dynamique de l'activité projet (ECOSIP 1993 ; Midler, 1991). En effet, la dynamique des projets est particulière : d'une part, la capacité d'action sur le projet diminue lors de son développement (" au début les degrés de liberté sont nombreux, puis, du fait de l'irréversibilité des décisions prises, la capacité d'action sur le projet se réduit ", (ECOSIP, p. 20)), et cela au fur et à mesure que le degré de certitude (ou d'information) sur le projet croît. Ainsi, " au début tout est possible, mais on ne sait que faire ; à la fin du projet, on sait, mais on ne peut plus rien ". Une bonne illustration est fournie par le cas du MLX-01,

dont les coûts d'exploitation apparaissent a posteriori comme beaucoup trop importants pour la commercialisation du système.



Les stratégies qui deviennent alors pertinentes, et doivent donc être examinées et instrumentées sont de deux types:

- premièrement, les stratégies qui permettent de retarder le " gel " du design (c'est-à-dire d'irréversibilisation des choix), ou de maintenir des options ouvertes ;
- et deuxièmement, celles qui permettent de réduire plus rapidement l'incertitude sur les alternatives disponibles. Dans certains types de projet, caractérisés par des phases lourdes et indivisibles de R&D - l'intégration entre la R&D et l'expérimentation est essentielle. Des rétroactions nombreuses et rapides peuvent permettre d'éviter l'accumulation de recherches sur des voies non pertinentes. Dans cette perspective, l'approche incrémentaliste trouve toute sa pertinence. Cette approche ne fait pas référence à un type d'innovations (qui seraient mineures par rapport aux innovations majeures) mais à un mode d'organisation. Celui-ci est conçu pour favoriser les évaluations fréquentes d'une technologie en développement. L'objectif d'une telle approche est d'éviter de surinvestir dans un certain nombre de variantes, qui au bout du compte ne donneraient rien.

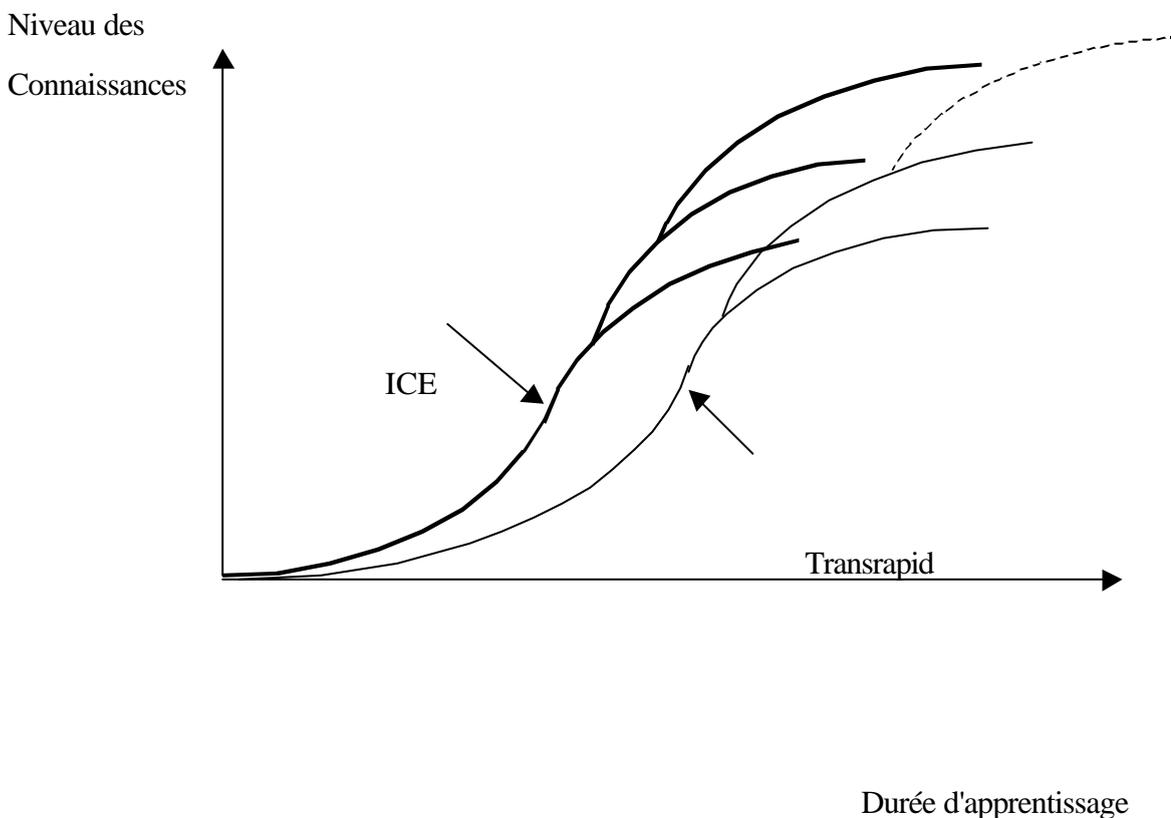
Il est essentiel de développer un cadre d'analyse intégrant simultanément irréversibilité et apprentissage.

- Apprentissage, irréversibilité et option

La théorie de la valeur d'option se prête de façon particulièrement pertinente à ce contexte : elle intègre l'espérance d'une information croissante sur les options ou l'environnement futurs des projets considérés et l'existence de formes d'irréversibilité dans les choix. Ainsi ce type de modélisation de la décision repose sur l'idée suivante : si l'incertitude inhérente aux projets de rupture technologiques se traduit par un risque d'échec élevé, ceci a pour corollaire l'ouverture d'opportunités futures (options de croissance). Ainsi l'investissement se justifie dès lors que les décideurs valorisent l'émergence de ces options. De même, l'abandon d'une option technologique particulière induit la disparition irréversible d'options futures, et donc doit être évalué comme tel (options d'abandon). (Voir DT N°3 – "options de croissance dans les projets de rupture technologique", Stéphanie Petey)

12) Applications : Transrapid et ICE

Apprentissage séquentiel sur les technologies Maglev et R/R



Le schéma représente la succession des apprentissages : exploration, exploitation par "expérimentation" et par "exploitation commerciale", respectivement dans le cas de l'ICE, et dans le cas du TRANSRAPID. Il indique comment une bonne coordination de la séquence des apprentissages permet au programme ICE d'écourter au maximum la période d'apprentissage pour une exploitation réelle de la technologie. Dans le cas du Transrapid, le programme n'arrive pas à sortir de la phase d'essais (exploitation par expérimentation). La dernière tentative d'une exploitation commerciale sur la ligne Hamburg-Berlin a également échoué, mettant le projet dans la nécessité de redéfinir ses caractéristiques, c'est-à-dire de procéder à un nouvel "encodage". L'absence d'une séquence complète d'apprentissages dans le cas du Transrapid (et donc l'impossibilité d'évaluer avec certitude l'effectivité de cette technologie) empêche la détermination des avantages comparatifs des deux technologies à connaissance équivalente.

- Exploration et options

Alors que le développement de l'ICE apparaît comme une réaction face à la concurrence, le développement de la technologie Maglev est lié au fait que celle-ci est perçue comme une technologie d'avenir (cf. notamment Büllingen, 1997). La théorie des options réelles concerne deux niveaux distinctifs dans le développement de la technologie Maglev. Entre 1970 et 1977, la politique du BMFT (*Ministère Fédéral pour la Recherche et la Technologie*), (cf. DT N°3), traduit une volonté de préservation d'options. Dans un contexte où les alternatives techniques sont encore peu connues, la préservation d'options technologiques permet un accroissement du niveau d'information disponible et un report du choix à une date ultérieure.

Cette conception en termes d'option ne s'applique plus après 1977, puisque le BMFT engage un choix technologique en faveur de la technologie EMS (*système électromagnétique*), annulant par là même les perspectives de développement des autres orientations techniques. Le processus d'innovation dans le système Maglev entre alors dans une phase de d'exploitation, c'est-à-dire d'optimisation de la technologie (Transrapid) qui a été retenue. Tout comme l'exploration, l'exploitation de la technologie Maglev a bénéficié d'un soutien important de la part du BMFT, puisque ce dernier a financé la totalité des coûts liés à la ligne d'essais TVE (*Transrapid Versuchsanlage Emsland*) à Emsland. La théorie des options réelles permet d'expliquer l'implication du BMFT dans cette phase d'apprentissage.

La décision de construire un train rapide utilisant le système R/R étant prise (1982), on peut s'interroger quant aux raisons qui ont conduit à la poursuite des études concernant la technologie Maglev. Tout d'abord, rappelons qu'en 1977, le BMFT a exprimé la volonté de voir le système Maglev être commercialisé à court terme. Nous pouvons naturellement y voir un souci d'image de la part du BMFT : le Transrapid constitue une vitrine technologique, tout comme le Concorde, le TGV ou l'industrie nucléaire en France. La position du BMFT s'inscrit également dans une volonté de soutien à une technologie perçue comme intrinsèquement supérieure au R/R. Les limites technico-économiques du R/R sont connues : le R/R permet d'atteindre des vitesses supérieures à 500 km/h, mais cela est excessivement coûteux, de sorte que des vitesses commerciales supérieures à 300 km/h ne sont pas envisagées en Allemagne.

Le soutien à la technologie Maglev face à un ICE existant s'interprète donc comme une préservation d'options de croissance à moyen terme. L'optimisme concernant les perspectives d'exportation du Transrapid semble confirmer cet argument : les retombées économiques d'une commercialisation du Transrapid sont perçues comme élevées. Signalons que cet optimisme est lié au fait que la technologie Maglev allemande possède pour seuls concurrents les systèmes R/R dont les limites sont établies.

La même analyse s'appliquerait au cas Japonais où on observe le développement conjoint des nouvelles rames du Shinkansen et du Maglev.

2 - Comment adoucir la tension entre apprentissage et irréversibilité?

L'apprentissage possède donc une nature ambivalente :

D'un côté, il crée de la connaissance. En effet, l'apprentissage et l'expérimentation en matière de choix technologiques consistent en une procédure de révélation et de résolution de problèmes, qui apparaissent progressivement au cours des différents stades d'expérimentation (recherche-développement) puis d'exploitation (apprentissage par l'usage).

D'un autre côté, il crée de l'irréversibilité ; cela de deux façons: d'une part en engendrant des coûts, et d'autre part en produisant des connaissances localisées; c'est à dire des connaissances qui ne bénéficient qu'à la variante effectivement expérimentée. Les autres variantes, qui n'ont pas été encore expérimentées, prennent du retard et risquent d'être progressivement éliminées si les résultats

préliminaires de l'apprentissage sur la première variante sont bons (on aura alors tendance à continuer l'expérimentation sur cette variante, sans donner leur chance aux autres variantes).

Pour limiter la création d'irréversibilité, on peut donc jouer sur les coûts, d'une part et sur le maintien des options d'autre part. Cependant les contraintes sont fortes des deux côtés.

2.1) La limitation des coûts de l'apprentissage

C'est la représentativité de l'environnement qui conditionne la capacité du processus d'apprentissage à révéler les problèmes. Dans un monde fictif, une reproduction complète des variabilités de l'environnement de la technologie ferait apparaître tous les problèmes possibles, qui pourraient donc tous être résolus en amont. Von Hippel et Tyre (1995) notent: "methods for reducing the likelihood of unanticipated field problems include simulating the use environment in the lab more completely : if the simulation is totally complete and accurate, one can cause all unanticipated failures to occur in the test lab instead of in the field " (p.9).

Cependant, plus on cherche à obtenir une représentativité parfaite de l'environnement afin de reproduire les situations réelles, plus les coûts seront élevés et l'élévation du coût marginal doit être comparée avec le gain marginal issu de l'accroissement de la représentativité

Cette limite est exprimée dans la figure suivante de l'article de Pisano (1996) :

Représentativité du contexte réel (ou coût)	Contexte d'apprentissage
Elevé	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="732 1429 1118 1458">Exploitation/production commerciale <li data-bbox="732 1525 1161 1554">Exploitation/production pilote sur le site <li data-bbox="732 1621 1222 1650">Exploitation/production pilote en site de R&D <li data-bbox="732 1718 852 1747">Laboratoire <li data-bbox="732 1814 1098 1843">Simulation assistée par ordinateur

Les différents lieux d'expérimentation correspondent à différents degrés de représentativité de l'environnement. Plus on va vers des formes parfaites de représentativité de l'environnement - dont la forme ultime est l'exploitation commerciale à échelle " normale " - plus la probabilité de faire émerger les problèmes est grande, plus l'apprentissage est coûteux. Il y a donc un calcul coût-bénéfice. On voit très bien que pour certains types de technologie, il faudra aller très haut dans la représentativité de l'environnement (démonstrateur, usage quasi-commercial) car le coût de la non identification des problèmes peut être très élevé (désastre, catastrophe). Dans d'autres situations, on se contentera d'une représentativité faible car les coûts seraient très élevés pour des bénéfices modestes. C'est par exemple le cas des progiciels.

Il convient donc de trouver un bon compromis entre la représentativité de l'environnement et les coûts. La nature du compromis dépend notamment de la structure de la connaissance. L'état de la connaissance dans un domaine (grâce aux théories scientifiques ou à des expérimentations passées) peut permettre de réaliser des prédictions sur des performances particulières du bien à partir des résultats d'expérimentations à petite échelle. Si par exemple, on sait que l'augmentation de la vitesse d'un engin volant par un facteur 2 réduit de 10% la résistance de certains matériaux, on peut faire des prédictions sur les performances dans les conditions réelles (cela sans construire une soufflerie géante). En principe, la possibilité de raisonner par analogie et par homotopie permet ce type de prédiction.

Les solutions, compte tenu de la contrainte de représentativité de l'environnement, sont de divers ordres. Mais elles procèdent toutes d'une stratégie de réduction des coûts :

- Usage de la simulation. La simulation réduit les coûts des expérimentations " réelles " en réduisant l'espace des paramètres à tester. Sur le schéma de Pisano, c'est le stade le moins représentatif de l'environnement; ce qui est vrai dans un sens; mais la simulation va être un outil qui peut accompagner les expérimentations à tous les autres stades. Elle peut permettre d'identifier les parties de l'espace des états du système où il faut réaliser des expérimentations réelles et donc réduire les coûts de celles-ci.

- Transfert d'expériences quand la génération précédente est proche de la nouvelle génération (mais on n'est sans doute pas alors dans un contexte de rupture), ou quand on peut utiliser des résultats de recherche obtenus sur d'autres systèmes.
- Usage de modèles ; c'est-à-dire des versions simplifiées à la fois de l'objet à tester et de l'environnement. La disposition de modèle permet de réduire les coûts de l'expérimentation en négligeant les aspects de la réalité qui ne sont pas pertinents pour le test (par exemple l'intérieur d'un avion dans le cas de test en soufflerie). Elle permet aussi de contrôler certains aspects de la réalité, qui peuvent affecter l'expérience.
- Accroissement de la robustesse des biens ; ce qui permet de rendre ceux-ci moins dépendants de la variabilité de l'environnement (exemple des marges de sécurité ou d'erreur dans la conception des ouvrages d'art, ordinateurs qui tolèrent des erreurs de la part des utilisateurs)

Une classe particulière de solutions réside dans la mise en place de principes d'optimisation des apprentissages.

Prenons l'exemple de processus répétés d'expérimentation de type essai/erreur conçus pour générer et tester des alternatives ou variantes technologiques. Par exemple, la recherche d'un nouveau type d'airbag passe par le test d'un premier prototype. Si le test réussit, le prototype est adopté ; s'il échoue, on génère une deuxième alternative, qui est testée à son tour. Les modifications apportées pour le deuxième tour peuvent concerner le design, les conditions mêmes de l'expérimentation, la nature de la solution finale (les résultats du test peuvent amener à réfléchir sur l'usage final du produit).

Le papier de Thomke et al. (1998) développe un cadre très stimulant. L'objectif est de générer et tester des alternatives afin de retenir la meilleure.

On peut imaginer deux formes organisationnelles selon que les informations des tests précédents sont utilisées ou non pour la génération des nouvelles options à tester. L'arbitrage se fait sur le double plan du coût et de la vitesse de l'apprentissage. On distingue donc :

- l'apprentissage en parallèle

Toutes les alternatives sont générées en même temps et les tests sont effectués selon un plan qui n'est pas modifié par d'éventuels résultats d'autres tests. Les expérimentations ont lieu en parallèle. Dans ce premier cas, la vitesse d'apprentissage est élevée mais le coût est très important.

- l'apprentissage sériel

Ici les alternatives sont générées successivement et le test précédent aide à la génération de l'alternative suivante; ce qui permet d'incorporer les apprentissages effectués lors de périodes précédentes pour améliorer l'efficacité de l'apprentissage en cours ; mais la vitesse à laquelle on parviendra à une solution est faible. Il y a deux formes d'apprentissage sériel : l'apprentissage minimal où l'on se borne à éliminer l'option qui n'a pas passé le test avant de choisir aléatoirement une nouvelle option à tester. Dans ce premier cas, l'espace de recherche des options ne se réduit que lentement; d'une unité après chaque expérimentation. Dans une formule d'apprentissage rapide, le résultat d'un test donne aussi une indication sur le sous-domaine dans lequel il faut chercher. Exemple: les n expérimentations sont localisées sur une échelle linéaire (n différentes pressions); après chaque expérimentation sur un niveau donné, on sait si il faut rechercher une pression supérieure ou inférieure. On réduit ainsi l'espace de recherche de 50% après chaque expérimentation.

Le tableau suivant montre les différentes caractéristiques des apprentissages sériels et parallèles, du point de la recherche d'un arbitrage optimal entre coût et vitesse. Il distingue notamment entre un apprentissage sériel minimal – dans lequel le résultat du test sert simplement à éliminer une variante après l'autre – et un apprentissage sériel rapide - dans lequel le résultat du test sert à resserrer l'espace de choix des alternatives - .

	apprentissage parallèle	apprentissage sériel (rapide)	apprentissage sériel (minimal)
description	alternatives: (1, 2, 3,..n) test sur 1..n fin	alternative (k) test sur k oui - fin non - autre alternative	alternative (k) test sur k oui - fin non - autre alternative
apprentissage entre les périodes	non	oui - important (on resserre le domaine dans lequel on génère de nouvelles alternatives)	oui - faible (on élimine l'alternative qui a échoué pour le prochain test)
nombre de périodes attendues	1	$\log_2 n$	$\frac{n+1}{2}$
nombre de tests par période	n	1	1
nombre de tests attendus	n	$\log_2 n$	$\frac{n+1}{2}$
caractéristiques	coût élevé, vitesse rapide	coût faible, vitesse moyenne	coût moyen, vitesse faible

On peut penser que selon le niveau d'observation, l'apprentissage sera plutôt sériel (niveau de la firme ou du consortium) ou plutôt parallèle (niveau du marché composé de plusieurs consortiums industriels en concurrence).

2.2) La répartition des coûts de la préservation d'options

Nous venons de voir que l'apprentissage en parallèle était une méthode très coûteuse. On peut donc envisager un mécanisme de répartition des coûts des options entre un grand nombre d'agents (par exemple entre différents consortiums).

Un bon exemple nous a été fourni dans un autre domaine que celui des transports; le domaine de la télévision à haute définition. Aux Etats-Unis, un ensemble de projets de développement décentralisés ont été définis - chacun animé par un consortium de firmes et de centres de recherche. Après deux années de travaux, un comité technique a entrepris d'évaluer les qualités respectives des solutions présentées,

avant de procéder à la sélection. Cependant la sélection d'un seul projet est un problème si délicat que la tendance à opérer un compromis entre tous les projets est souvent la plus forte (ce fût d'ailleurs le cas dans l'exemple ci-dessus). Pour réduire ce problème, il faut prévoir des mécanismes de compensation financière pour les projets non-sélectionnés. Une autre difficulté tient à ce que pour que la diversité des expérimentations soit effectivement valorisée, il faut que les informations engendrées dans les différents projets circulent librement entre ceux-ci ; permettant que les expériences accomplies d'un côté réduisent les incertitudes d'un autre côté. Les projets étant eux mêmes en concurrence, il sera sans doute difficile d'obtenir un accès libre et en temps voulu aux stocks de connaissances produites. En outre, en transformant toutes les informations en bien public, on encourage les comportements de free riding.

3- Rupture technologique et gestion de la connaissance

Un projet de rupture technologique est un projet de longue haleine, incluant de nombreux sites de recherche et d'application, souvent dispersés. La réussite de ce genre de projet est donc dépendante fondamentalement de la mise en place de procédures efficaces de gestion de la connaissance. Premièrement, il s'agit généralement de projets caractérisés par des sites multiples d'expérimentation et d'innovation. Dans la mesure où les transferts d'information et de connaissance d'un site à un autre sont malaisés (la connaissance est tacite, elle est donc "sticky " ou " collée " pour reprendre l'expression imagée de von Hippel, 1994), l'organisation de la collaboration entre les sites devient un élément décisif. Deuxièmement, la nécessité de développer et maintenir une " mémoire organisationnelle " est essentielle et doit impliquer le choix d'une stratégie délibérée de gestion de la connaissance.

3.1) Complexité organisationnelle

Pour résoudre un problème posé par une innovation, l'information technologique et les capacités de résolution de problème doivent être réunies, physiquement ou virtuellement, dans un lieu unique. La nécessité de transférer l'information de son point d'origine vers un site spécifique de résolution de problème n'affectera pas la localisation de l'activité innovatrice si cette information peut être transférée facilement (les économistes diront: "à coûts nuls "). En revanche, quand l'information est coûteuse à

transférer (si il y a une forte adhérence entre l'information technologique et le lieu où elle a été produite), la localisation de l'activité d'innovation peut être affectée de différentes façons (von Hippel, 1994).

Il y a plusieurs raisons possibles, qui font qu'une information technique n'est pas aisément transférable. Premièrement, la connaissance technologique possède une forte dimension tacite (elle "adhère " donc aux personnes qui la possèdent) ; deuxièmement, un grand nombre d'informations supplémentaires est nécessaire pour effectuer le travail d'innovation (indivisibilité ou compacité).

Lorsque les coûts de transfert de l'information technologique sont élevés, on peut prédire, toute chose égale par ailleurs, une tendance à effectuer l'activité d'innovations sur le lieu d'origine de l'information (de la même façon qu'une firme localisera son lieu de production de telle sorte que les coûts de transport soient minimisés).

Cependant un projet de rupture technologique sera basé typiquement sur des ensembles d'informations technologiques localisés dans de nombreux sites (laboratoire de recherche, équipementier, ...). Dans la mesure où les connaissances technologiques restent le plus souvent "adhésives ", il est impossible de rassembler l'ensemble de ces connaissances technologiques en un seul lieu afin de résoudre l'ensemble des problèmes qui se posent. Il est donc fréquent de recourir à des procédures d'itérations successives entre les différents sites. Autrement dit, lorsque la solution d'un problème requiert l'accès à des connaissances "adhésives ", situées sur deux (ou plus) sites, l'activité de résolution de problèmes se déplacera de façon itérative d'un lieu à un autre. Ce modèle d'itération sera moins coûteux que le transfert de l'ensemble des connaissances adhésives sur un seul lieu de résolution de problèmes. Les méthodes de prototypage rapide sont d'ailleurs conçues explicitement pour faciliter les interactions répétées entre acheteur et fournisseur. Dans une méthode de prototypage rapide pour le développement de logiciel, le fournisseur répond aux besoins initiaux formulés par l'acheteur en développant rapidement un prototype peu coûteux et aisément modifiable, qui simule les fonctionnalités du logiciel. L'acheteur apprend alors à utiliser le prototype dans le contexte de son environnement spécifique et détermine de nouvelles spécifications auxquelles le fournisseur tentera de répondre, et ainsi de suite.

Cependant, quand de nombreux sites sont concernés, le processus d'itération peut lui même être extrêmement coûteux. Dès lors la solution organisationnelle réside moins dans l'optimisation des processus d'itération que dans la partition du problème général en sous-tâches – chacune pouvant être

exécutée sur un lieu unique Dans ce cas, les activités d'innovation qui requièrent l'accès à de multiples lieux d'informations non transférables peuvent être partitionnées en sous-problèmes ; chacun d'entre eux pouvant être résolu dans un lieu unique d'informations. Dans la mesure où il y a de multiples partitions possibles d'un problème complexe, la sélection d'une partition particulière aura un effet important sur l'organisation d'ensemble et sur le coût global de transferts d'information ou d'itérations successives.

Mais l'adhérence des informations technologiques n'est pas forcément un caractère immuable et intransformable, propre à cette information. On peut réduire l'adhérence d'un corpus critique de connaissances en investissant dans des processus de conversion de cette expertise de son état tacite en un état plus explicite et plus aisément transférable (Cowan et Foray, 1998).

Une autre source de complexité organisationnelle est liée au caractère séquentiel du processus de développement. Telle brique technologique est développée en t dans un laboratoire de recherche. Puis, en t+3, elle sera intégrée dans un équipement, chez un industriel. On retrouve ici un niveau élevé de complexité organisationnelle, lié à la mobilisation de lieux multiples et à la nature adhésive des connaissances; la question étant d'assurer la "sortie " de la brique de l'institut de recherche puis son traitement chez l'industriel. Or un tel processus se heurte souvent à l'obstacle bien connu sous l'expression "Non Invented Here ", qui reflète simplement la difficulté à assembler des compétences et des connaissances, engendrées et mises en œuvre dans des sites différents.

3.2) Mémoire organisationnelle

Les questions associées à la mémoire organisationnelle et au partage des savoirs sont particulièrement importantes pour la gestion du projet de rupture (Steinmueller, 2000). Le fait de ne pas engager de stratégies délibérées de la gestion de connaissances peut entraîner des pertes importantes, liées notamment à la redondance des actions, répétition des erreurs et faible cumulativité des connaissances. Si les procédures de résolution de problème sont effectuées exclusivement au niveau local, elles vont certes bénéficier du contact direct au problème qu'il convient de résoudre. Mais d'un autre côté, la résolution de problème au niveau local accroît le risque d'élaboration de solutions spécifiques, qui ignorent les expériences passées ; lesquelles seraient potentiellement de valeur face au problème

considéré. Les petites organisations, caractérisées par une certaine stabilité de l'emploi, peuvent surmonter ce problème en développant des réseaux personnels performants.

Les grandes organisations sont confrontées à des difficultés plus grandes dans le domaine de la réutilisation de connaissances déjà existantes pour résoudre des problèmes déjà rencontrés. Il y a au moins trois obstacles (Steinmueller, 2000) :

- premièrement, il convient d'identifier les faits saillants (" salient feature ") d'un problème particulier, qui le rend " similaire " à des problèmes que l'organisation a rencontré dans le passé ;
- deuxièmement, il convient de localiser la source d'information pertinente (c'est à dire, les acteurs qui avaient su résoudre ce même type de problème) ;
- troisièmement, dans le cas où il est impossible de retrouver l'individu ayant les connaissances, il convient de retrouver l'information par d'autres biais.

Ces trois difficultés – être capable d'identifier dans un problème "nouveau " ce qui le rapproche de problèmes déjà rencontrés ; être capable de retrouver les individus ayant résolu des problèmes de même nature ; être capable de retrouver l'information sans le recours aux individus – constituent les problèmes de " mémoire organisationnelle " les plus courants que les grandes organisations doivent affronter. Il s'agit là de défis majeurs pour des projets dont l'accomplissement prendra plusieurs décennies et dont les formes d'organisation n'offrent que peu de résistance à la volatilité des compétences et à la mobilité des personnes (cas typique de Swissmetro).

Les organisations ont le choix entre deux grandes stratégies (Hansen et al., 1999). Soit, *la connaissance est codifiée de façon systématique*, de sorte qu'il soit possible de la stocker dans des bases de données. Celles-ci sont accessibles et exploitables facilement par tous les employés. Soit, *la connaissance reste tacite*, elle est fortement liée à la personne qui l'a développée et est partagée grâce aux contacts directs entre les employés.

Selon le premier modèle dit de " *codification* ", les organisations développent des méthodes de codification, stockage et réutilisation de la connaissance, à travers une approche de type "personne-vers-document ". La connaissance est extraite de la personne qui l'a développée, elle est rendue indépendante de cette personne, classée et réutilisée. Cette approche permet à de nombreux employés

de rechercher et retrouver la connaissance emmagasinée, sans avoir à contacter la personne qui l'a initialement développée. Ce modèle est particulièrement intéressant pour les organisations qui sont confrontées en permanence au même type de problème et d'attente de la part de leur clientèle et dont l'objectif est de fournir un service rapide et bon marché. La réutilisation efficace de la connaissance codifiée est un dispositif essentiel au service de la stratégie générale de l'entreprise.

Selon le second modèle dit de "*personnalisation*", les organisations privilégient le dialogue entre les individus plutôt que le stockage des connaissances dans les bases de données. Pour que ce modèle fonctionne, il convient d'investir fortement dans les réseaux interpersonnels et de développer une culture de la mobilité et de la relation directe entre les personnes. Ce modèle sera plutôt choisi par les organisations qui sont le plus souvent confrontées à des problèmes et des attentes uniques, pour lesquels la connaissance mobilisée est par définition nouvelle. Les services fournis sont coûteux et demandent un certain délai. On est dans une logique d'expertise plutôt que de réutilisation de connaissances standardisées.

Bien évidemment chaque organisation s'efforce de combiner les deux stratégies mais les meilleures organisations semblent plutôt privilégier l'une d'entre elles, utilisant l'autre de façon marginale. Il est clair que les différents aspects de la gestion de la connaissance auront certaines particularités selon que l'organisation se situe dans le modèle de la codification ou dans celui de la personnalisation.

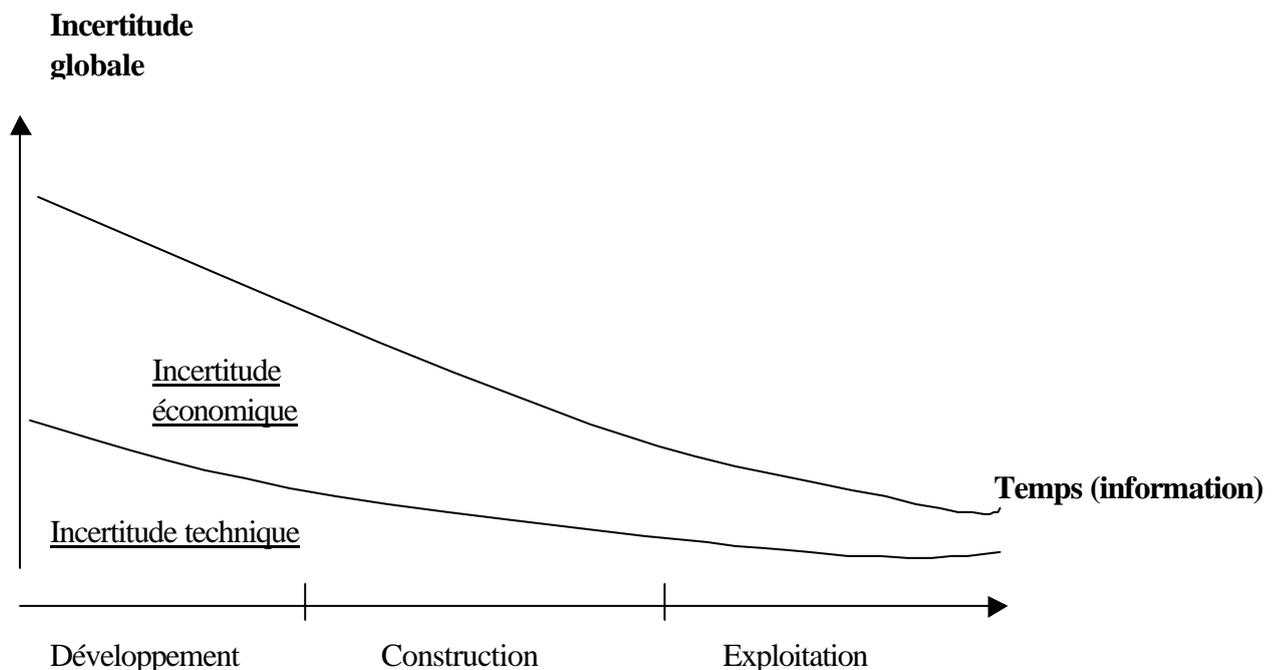
On peut penser qu'un projet de rupture technologique sera plutôt proche du second modèle car les connaissances mobilisées sont par définition nouvelles. On est donc dans une logique de l'expertise, qui implique un investissement fort dans les réseaux interpersonnels et la mobilité des gens et l'utilisation de la codification en tant que support et non pas en tant qu'objectif.

QUATRIÈME PARTIE -

FINANCEMENT ET ÉVALUATION

1 - Financement²

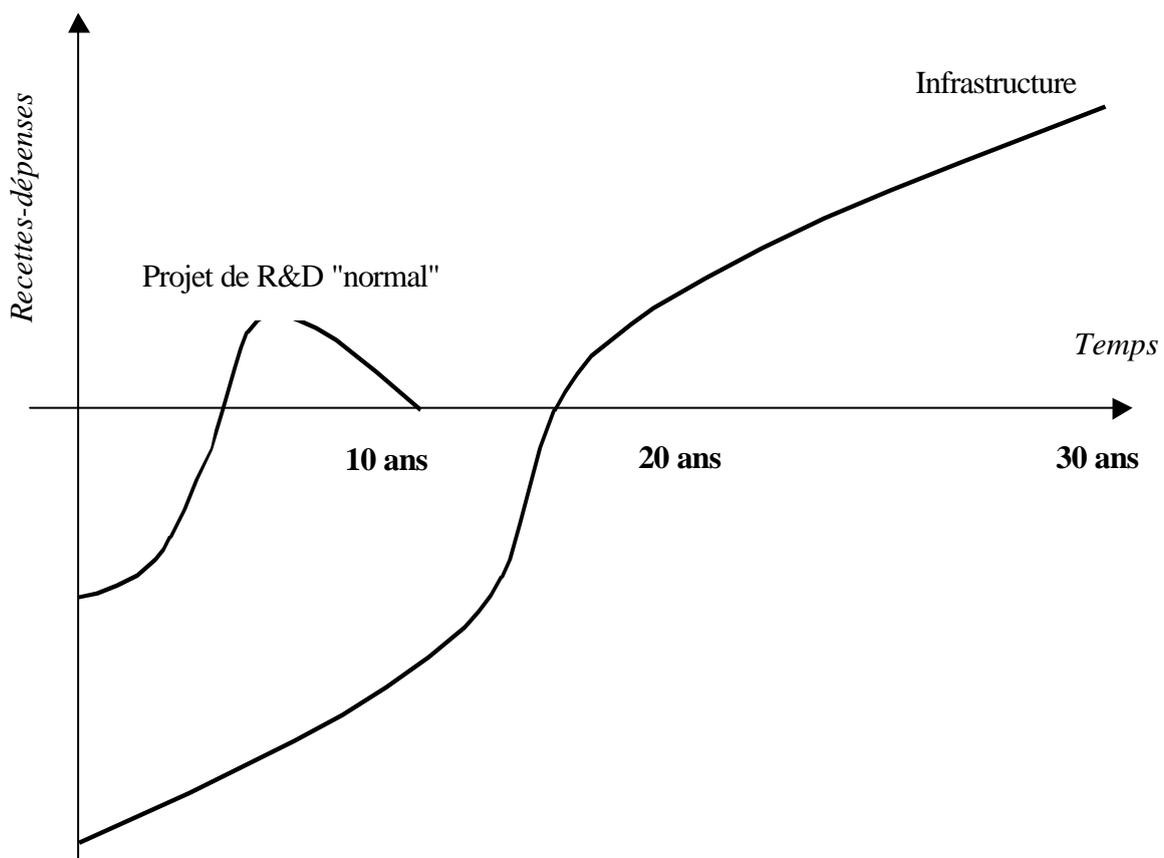
Il est intéressant de sérier les problèmes de financement à partir d'un phasage du projet en trois phases : développement, construction, exploitation. Ce phasage est essentiellement basé sur la question de l'incertitude, qui est très grande au départ puis diminue au fil du temps. Ce phasage correspond à ce que les financiers appellent la diminution du " fossé de crédibilité " du projet. La phase initiale pose des problèmes très difficiles, qui d'une certaine façon échappent aux formes classiques de financement. Ce n'est qu'au terme de cette phase de R&D, lorsque commence la phase de construction qu'un mode de financement classique peut être conçu. Tout au long des phases de construction et d'exploitation subsiste une incertitude qui, cependant, change de nature. Elle devient plus socio-économique que purement technique.



² - Cette partie repose sur le document IMRI: DT N°5

A ces incertitudes et risques s'ajoute le poids particulier des investissements nécessaires pour tout projet d'infrastructure ferroviaire. L'évolution du profil temporel des coûts et des recettes du projet d'infrastructure est très particulière.

Profils temporels des flux de dépenses et de recettes



Enfin une dernière particularité des projets d'infrastructure de transport renvoie à ce que le projet débouche le plus souvent sur une concession de service public et que l'Etat est, à cet égard, un

partenaire incontournable (qu'il participe financièrement ou non au projet). Cette dimension supplémentaire peut faciliter ou au contraire accroître la complexité du processus décisionnel par l'aide apportée ou les exigences imposées.

On retrouve ces trois caractéristiques dans le projet Swissmetro : c'est un projet dont la technique utilisée n'a pas encore totalement fait ses preuves ; c'est un projet d'infrastructure et c'est un projet impliquant une demande de concession auprès du ministère des transports selon la loi sur les chemins de fer.

1.1) La phase initiale : comment financer de la R&D ?

Du point de vue de l'économie du financement d'un projet de rupture technologique, la phase initiale de R&D pose un problème quasi-insoluble. L'incertitude est très grande ; on vient de voir que de nombreux problèmes ne risquent d'apparaître qu'une fois achevée la construction de l'infrastructure ; c'est à dire après les périodes d'expérimentation en laboratoire voire même sur site. Cette phase d'incertitude très grande et en outre très éloignée de la période où l'on pourra commencer le remboursement des emprunts par les cash flows d'exploitation n'est tout simplement pas prévue dans les "textbooks". Nevitt et Fabozzi (1995) soulignent qu'un des facteurs d'échec en financement de projet est l'utilisation des nouvelles technologies !

Le financement de nouvelles technologies est habituellement assuré par le marché du capital risque mais bien évidemment un tel système ne convient pas à des projets dont l'échelle de temps est très grande. Le financement ne peut donc être assuré que par les fonds propres internes des promoteurs du projet qui supporteront le risque d'échec de la nouvelle technologie.

Les formes de l'intervention des promoteurs sont diverses : financement par actions (en rémunération ou non des services effectués), par dettes subordonnées (quasi fonds propres), par intervention de l'Etat sous forme de subvention ou en nature. C'est le cas du financement du développement initial des technologies pour les projets Maglev (Japon , Allemagne, Suisse et Etats Unis, mais dans une moindre mesure pour ces deux derniers pays). Les technologies ont été développées grâce aux aides substantielles des pouvoirs publics.

Le fossé de crédibilité est tel que l'appel à des fonds externes est voué à l'échec : l'appel public à l'épargne sous la forme d'un emprunt ne serait pas souscrit en raison du risque de défaut mais en outre, placerait la société-projet dans une situation d'investissement sous-optimal décrite par Myers (1977) ; l'émission de titres représentatifs de parts du capital serait trop coûteuse pour les actionnaires existants (transfert de richesse) et engendrerait une dilution du contrôle de la société-projet.

La société - projet est donc une structure fermée et le financement est assuré en interne. Cette phase s'achève par la réalisation d'un test grandeur nature (voir section précédente) en vue de réduire l'incertitude technologique. Si les conditions le permettent et afin de minimiser les coûts, la réalisation de prototype doit coïncider avec le projet commercial : proposer que le tronçon pilote soit en partie réutilisable pour l'infrastructure et que le matériel roulant serve de matériel de première génération.

On comprend mieux la signification de l'âge d'or du point de vue du financement des projets. Ce dernier correspond à une période où l'Etat dispose d'une capacité d'endettement, qui plus est à des taux faibles, permettant de financer des projets insuffisamment rentables pour être réalisés par le secteur privé. L'Etat par l'intermédiaire du Trésor Public dispose de plusieurs sources de financement: 1) la Caisse des Dépôts et Consignations dont 80% des ressources provenaient des Caisses d'Epargne (livret A), 2) les Chèques Postaux avec les dépôts à vue de la clientèle, 3) l'émission de bons du Trésor (à 1, 2, 5 ans), 4) l'émission d'emprunt à moyen et long terme garantis par l'Etat, 5) la Banque de France.

Par la garantie de remboursement qu'il offre et la faible exigence de rendement de certains produits d'épargne (livret A), ce circuit monétaire "protégé " favorise le financement d'un plus grand nombre de projets qui ne pourraient être financés en faisant appel à des banques ou des investisseurs privés.

Face à l'évolution des statuts des partenaires anciens (La Poste et les Caisses d'Epargne), ainsi qu'aux modifications du rôle de la banque de France (1993) liées à l'intégration européenne, les sources de financement de l'Etat s'amointrissent et les exigences de rendement de ces mêmes partenaires s'accroissent notablement.

1.2) La phase de construction : les spécificités des projets d'infrastructure ferroviaire

Pendant cette phase, la superposition des techniques entraîne une complexité importante à l'origine de l'incertitude sur la capacité opérationnelle des infrastructures.

Les risques spécifiques de construction d'infrastructure sont les suivants :

- en raison de l'échelle des travaux et de la complexité de l'ingénierie, le risque de non achèvement des travaux est élevé. Ce risque est supporté par le pool des constructeurs, qui peuvent s'appuyer sur leurs sous-traitants pour répartir les risques.

- Ces mêmes difficultés engendrent des risques de dépassement des coûts et des délais. C'est l'exemple du projet TGV à Taiwan pour lequel le contrat fût annulé (et réaccordé au Shinkansen) car le consortium français avait réévalué son projet d'environ 50%.

Outre le risque technique - qui n'a pas été totalement annulé au terme de la phase initiale - des réorientations de projet peuvent conduire à ces problèmes de dépassement. Ces réorientations ont des causes internes (erreur de conception) ou externes (changement de réglementation sur la sécurité, l'environnement).

Surcoûts et retard d'achèvement ont une triple-conséquence : l'augmentation des intérêts capitalisés accroît le besoin de financement, le dépassement des budgets compromet les engagements vis-à-vis du syndicat bancaire, enfin le retard constitue un manque à gagner pour l'exploitant. C'est l'exemple du tunnel sous la Manche dont l'ouverture au public s'est faite après la saison touristique.

Pour se prémunir des conséquences d'une augmentation des coûts ou d'un dépassement des délais, il faut toujours rechercher, quand cela est possible, des contrats où la date d'achèvement, le prix des travaux, ainsi qu'un taux d'utilisation des équipements sont fixés au moment de la signature. Le pool bancaire exigera de la part des autres parties prenantes et notamment des constructeurs la mise en place de lignes actions et/ou de lignes de crédit, susceptibles de couvrir tout ou partie du surcoût. Le pool de construction peut également assurer une partie des risques auprès des compagnies d'assurance.

C'est au cours de cette phase que le prêt à la construction est mis en place: généralement il s'agit d'un prêt à recours limité ou total jusqu'aux tests d'achèvement. Bien que les banquiers et plus généralement le syndicat bancaire "assument " une partie du risque industriel au vu du poids de la dette dans le financement, ils exigent de la part des sponsors un certain nombre de garanties leur permettant de sécuriser au maximum leur placement ; d'où la possibilité de recours sur les actifs du projet ou sur les acteurs liés au projet.

Une fois la convention de crédit signée, la sous-évaluation potentielle de titres en capital est réduite, le projet voit sa crédibilité augmenter auprès des nouveaux investisseurs et une ouverture du capital avec introduction en bourse est possible.

1.3) La phase d'exploitation

On distinguera les risques liés à la taille du marché et à l'évolution de la demande. Il faut bien comprendre qu'un projet de transport public a pour client direct le citoyen (l'utilisateur de l'autoroute, par exemple) alors qu'une société d'exploitation d'un champ pétrolifère aura comme cliente une compagnie pétrolière. Par conséquent certains contrats types, utilisés pour garantir les cash flows ne peuvent être utilisés. La concurrence d'autres modes de transport, l'interconnexion de l'infrastructure nouvelle avec le réseau existant et l'autonomie de gestion de l'exploitant sont les facteurs-clés.

En résumé, les revenus des projets d'infrastructure de transport sont dits, soit " market-led ", auquel cas aucune assurance ne peut être donnée aux prêteurs car les paiements sont fonction du marché, soit " contract tied " auquel cas le risque lié à l'incertitude de la demande est reportée sur l'exploitant par l'intermédiaire d'un contrat d'utilisation.

La seconde catégorie de risque économique renvoie au dépassement des coûts d'exploitation (incluant les coûts de maintenance). A cette occasion, des conflits entre constructeurs et exploitants peuvent survenir. Comme dans la phase précédente, ce risque peut être limité par des arrangements contractuels.

Au cours de cette phase, l'emprunt contracté lors de la construction est converti en un emprunt sans recours et la société-projet le rembourse par l'intermédiaire des cash-flows d'exploitation. Seuls l'incertitude et le risque économique jouent un rôle. L'incertitude est là encore étroitement liée à la nature infrastructurelle du projet.

De nouveaux emprunts peuvent être contractés pour le financement de l'exploitation mais tout nouveau seuil de croissance ou de risque nécessitera le recours à une augmentation de capital.

1.4) Des économies bien différentes qui impliquent une hiérarchie claire des sources de financement

Ce qui frappe, en étudiant les modalités de financement de projet, est la succession de problématiques économiques extrêmement différentes ; lesquelles déterminent des logiques de financement bien distinctes. On peut distinguer la problématique de la rupture technologique (première phase) et la problématique de l'infrastructure (deuxième et troisième phase). Cependant la phase intermédiaire est à bien des égards la plus délicate dans la mesure où les deux problématiques se superposent : le risque technologique n'est pas annulé loin de là tandis que les contraintes d'infrastructure sont déjà fortement prégnantes.

Un tel phasage permet de bien mettre en évidence une hiérarchie des financements, auxquels peut faire appel la société-projet.

Le premier échelon – correspondant à la phase initiale de R&D – est celui de l'appel aux liquidités internes. Pendant cette étape, la société-projet est capitalisée et financée par les différentes parties prenantes (constructeurs, exploitant, Etat).

Il n'est pas souhaitable de passer ensuite directement de cet échelon à celui de la mise en bourse pour lever des capitaux et entamer la construction des infrastructures. En effet, vu la grande incertitude qui caractérise la phase de construction, les actionnaires potentiels exigeraient un tel discount que s'opéreraient des transferts de richesse entre actionnaires nouveaux et les actionnaires initiaux. Il y aurait en outre un risque de perte de contrôle de la société-projet. Il convient donc de passer par des échelons intermédiaires – dette obligataire classique puis dette financière hybride – avant la mise en bourse. Enfin, la dernière phase, celle d'exploitation, doit pouvoir être financée par le cash flow d'exploitation. Cette phase de transition crédibilise le projet aux yeux des investisseurs : elle limite le nombre de titres à émettre ainsi que la sous-évaluation nécessaire des titres pour attirer les investisseurs ; par conséquent le transfert de richesse et le risque lié au contrôle de la structure supportant le projet d'infrastructure s'en

trouvent réduits. Le dernier échelon est constitué par une émission de titres en capital. La phase d'exploitation de la structure doit pouvoir être financée par le cash flow d'exploitation.

Il convient donc de gravir l'échelle des financements, échelon par échelon, pour réduire non seulement le risque d'une politique d'investissement sous-optimale, mais aussi la sous-évaluation des actions (transfert de richesse), et leur nombre (dilution précoce du contrôle).

L'illustration numérique présentée dans l'annexe " financement de projet " montre clairement que la capacité de financement interne du projet en ce qui concerne la première phase (par exemple, subvention publique) accroît grandement les probabilités d'achèvement du projet. L'absence de liquidités internes produit le résultat inverse.

Echelle des financements

4° échelon (phase de construction) :	Augmentation de capital
3° échelon (phase de construction) :	Dettes financières hybrides (obligation convertible en actions ou à bons de souscription d'actions)
2° échelon (phase de construction)	Dettes obligataires classiques
1° échelon (phase initiale et d'exploitation) :	Liquidités internes

On ne peut s'interroger sur la politique de financement sans évoquer l'arbitrage entre économies fiscales et coûts de faillite liés à l'utilisation de la dette.

Le recours massif à la dette, lors des périodes de construction et d'exploitation permet de profiter de la déductibilité des intérêts de la dette du résultat imposable (Modigliani et Miller, 1958, 1963). Au cours de la phase initiale de R&D, le peu de dette employée s'explique davantage par le fait qu'au cours de

cette phase, la forte probabilité d'échec induit un risque qui ne peut être supporté que par les actionnaires. Tout appel à la dette augmenterait le risque technologique du risque de faillite.

1.5) Les coûts d'agence

Selon Jensen et Meckling (1976), le choix de financement qui incluent des actionnaires actifs et des actionnaires passif d'une part, et des actionnaires et des obligataires d'autre part, est à l'origine de conflits d'agence, liés aux asymétries d'information entre les différentes parties prenantes. Ces conflits sont particulièrement aigus lorsque l'incertitude est grande et que les sources de financement sont diversifiées. C'est typiquement le cas de la phase de construction, qui réunit ces deux caractéristiques. Dans la phase de rupture technologique, il y a une grande incertitude mais une seule classe d'acteurs (les dirigeants), tandis que dans la phase d'exploitation, l'incertitude a été grandement réduite. C'est donc à nouveau la phase de construction qui cristallise les problèmes et qui peut donc souffrir de coûts directs (transfert de richesses et sous-investissement) et de coûts indirects (liés à l'élaboration d'un système de contrôle pour réduire les asymétries informationnelles).

2 - Evaluation et décision d'allocation des ressources

L'approche générale d'allocation de ressources dans le domaine des grands projets est la suivante : elle part de la définition, par exemple à travers un processus législatif, d'un certain nombre de missions ou de domaines d'exploration. Ayant défini ces missions, la question économique principale est celle de l'évaluation des coûts des voies alternatives pour remplir ces missions. Cette approche est rendue difficile par le manque de précision et de spécificité qui caractérise la définition des missions et par l'incertitude sur les coûts et méthodes alternatives. La capacité d'évaluation correcte du projet de rupture est donc un élément décisif, qui inclue un ensemble de questions complexes. On peut définir trois niveaux d'évaluation pour formuler ces questions :

2.1) L'évaluation technique : du critère de valeur actuelle nette au critère d'option de croissance

L'analyse coût/bénéfice peut être utilisée soit en complément soit en substitution de l'approche générale. Il s'agit d'une méthode arithmétique permettant d'évaluer un flux de coûts et de bénéfices d'un investissement public (ou privé), en termes de valeur économique présente. La technique coût/bénéfice est basée sur le fait que l'unité d'une ressource reçue aujourd'hui a une valeur économique plus importante qu'une unité de ressources reçues l'an prochain. De même l'unité d'une ressource dépensée aujourd'hui est plus coûteuse que l'unité dépensée demain. Un facteur commun – " le taux d'actualisation " - est utilisé pour déflater les quantités d'argent reçues ou dépensées dans le futur afin de les évaluer à leur valeur présente. Ce taux représente la préférence sociale pour une consommation présente par rapport à une consommation future. Le but de l'analyse est d'évaluer ex ante si la valeur des bénéfices futurs du projet excède la valeur actuelle des coûts. La technique arithmétique de l'actualisation fournit une mesure unique - la valeur actuelle nette - de ce ratio coût-bénéfice. On peut comprendre que les administrations publiques apprécient la possibilité d'étendre au domaine des projets de rupture le calcul économique public, que semble offrir l'analyse coût/bénéfice. De nombreuses nuances doivent cependant être apportées.

Les principales difficultés renvoient aux techniques utilisées : les inconvénients d'une valeur actuelle nette en tant que mesure du bien être social ; le problème de la définition des frontières appropriées d'un projet, ce qui renvoie à la question de la dynamique des bénéfices et des externalités positives de recherche ; l'attribution des coûts et des bénéfices à une source " unique " alors que ces projets impliquent le plus souvent des investissements complémentaires substantiels pour la construction et l'exploitation. En outre, la rupture technologique produit des effets cumulatifs. Notre aptitude présente à réaliser telle technologie dépend des investissements qui ont été effectués dans le passé. L'analyse coût/bénéfice ignore explicitement cette caractéristique fondamentale en limitant l'évaluation à un projet unique. L'implication pratique de cette critique est que d'éventuelles rationalisations budgétaires, effectuées sur cette base méthodologique, conduiront à des coupes plus fortes que si elles avaient été menées selon une méthode qui internaliserait les caractères interdépendant et cumulatif des projets de rupture.

En résumé, l'analyse coût/bénéfice semble accroître à première vue l'attention des décideurs envers les besoins sociaux, puisque son objectif est d'offrir un moyen d'établir la valeur sociale nette des projets de recherche. Mais l'ensemble des difficultés exprimées ci-dessus rend très aléatoire l'accomplissement d'un tel objectif. Le tableau ci-après exprime l'ensemble des coûts et des bénéfices, dont il faudrait calculer la valeur actuelle nette, pour parvenir à une décision équitable.

<p>l'aspect bénéfice – valeur commerciale :</p> <ul style="list-style-type: none"> - bénéfices directs - bénéfices indirects à travers des développements technologiques complémentaires - essaimage - valeur d'option - impact sur l'emploi, sur la collectivité 	<p>l'aspect coût :</p> <ul style="list-style-type: none"> - estimation des coûts - coûts d'opportunité - coûts fiscal - coûts de capacité
<p>l'aspect bénéfice - dynamique (centré sur la technologie) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rendements croissants - dynamique de la science - structure homotopique - liens analogiques 	

Commentaire du tableau

Sur les bénéfices

Les notions de structures homotopiques et liens analogiques (définies dans le glossaire de la première partie, section 2) font référence aux possibilités de transfert de technologie et de connaissance depuis le domaine du projet vers d'autres domaines par analogie de structures et de problèmes et/ou correspondances homotopiques.

Sur les coûts

Le coût d'opportunité est le coût, pour la société, de faire ce projet plutôt qu'un autre. Le coût d'opportunité est net et inclue la notion de bénéfice net. Si mon projet supprime le vôtre, le coût d'opportunité de mon projet devra inclure les bénéfices nets auxquels la société renoncera en renonçant à l'autre projet.

Le coût fiscal : les investissements publics doivent être financés par l'impôt ou la création de crédit. Dans tous les cas, un accroissement d'investissement public introduit une distorsion dans les choix de dépenses des consommateurs et en conséquence réduit leur bien être économique net. C'est un coût d'opportunité.

Face à un projet de rupture technologique, dont les coûts sont immédiats et localisés et les bénéfices sont futurs, incertains et diffus, toutes les méthodes traditionnelles visant à prendre une décision sur la base de comparaison entre coût et bénéfice sont nécessairement biaisées. Même en prenant des taux d'actualisation élevés, la valeur présente de bénéfices incertains sera inférieure à la valeur présente des coûts. En un sens la méthode des taux d'actualisation permet de résoudre le problème du report dans le temps mais ne résout pas celui de l'incertitude.

2.2) L'évaluation institutionnelle : changer les critères

De nombreux exemples historiques montrent que les évaluations portant sur une nouvelle technologie sont en réalité non pertinentes car elles se basent sur les critères d'évaluation dominant ; eux mêmes forgés en référence aux points forts de la technologie existante. Il est difficile de convenir que la radicalité même du changement devrait conduire à changer les critères mêmes. Un exemple classique est l'évaluation des nouveaux matériaux pour l'industrie automobile, qui sont initialement comparés aux matériaux métalliques en termes de soudabilité, aptitude à l'usinage - autant de critères éminemment favorables au métal, alors que la reconception totale de l'automobile permise par ces nouveaux matériaux ferait disparaître ces critères. Ainsi toute comparaison entre l'existant et le nouveau est faussée. D'une certaine façon, le fait que Swissmetro, en tant que projet d'infrastructure et de transport, doit formuler une demande de concession auprès du ministère des transports selon la loi sur les chemins de fer, est une illustration de ce problème.

La rupture technologique demande donc une rupture des méthodes d'évaluation. De ce point de vue, la manière dont les institutions peuvent se libérer des critères du passé est essentielle. Le rôle de la communauté épistémique - détachée de la technologie existante - est bien évidemment centrale.

Présumer l'existence d'anomalies pour l'ancien système

Par ailleurs, les comparaisons s'effectuent entre un système existant, robuste et éprouvé, et un système qui n'existe pas encore. A cet égard, une clé pour démontrer la supériorité du nouveau système consiste à présumer l'existence d'une anomalie au cours du fonctionnement futur du système existant (anomalie par présomption) : on présume par exemple qu'un TGV ne pourra jamais rouler à 400 km/heure en vitesse commerciale, ou encore que les coûts d'exploitation en terme de consommation énergétique ne permettraient plus de satisfaire les contraintes nouvelles en matière de développement durable. Face à ces objectifs, le paradigme existant ne fonctionne plus.

2.3) L'évaluation socio-économique : l'art du recodage

Un grand projet de rupture technologique fait toujours référence à une certaine notion de progrès (par exemple la grande vitesse ou encore plus généralement la mobilité). Le lancement d'un projet de rupture dans le domaine ferroviaire est donc associé à la valeur positive que l'on accorde à la mobilité des gens (hypermobilité dans le cas de Swissmetro ou du Transrapid). Or dans ce cadre, le projet est mis en concurrence - notamment d'un point de vue budgétaire - avec d'autres projets, qui visent aussi à accroître la mobilité. Swissmetro souffre ainsi des dépenses publiques énormes affectées au Suisse au programme des voies transalpines (projet ferroviaire des transversales Alpines, NLFA). Il peut donc être nécessaire de "recoder " le projet afin que celui-ci renouvelle à son profit les conditions de la concurrence.

Le "recodage " des grands projets est par exemple une spécialité de la NASA. Soit il faut industrialiser l'exploitation de l'espace (recodage "économique "), soit il est possible que l'on trouve des traces de vie sur Mars (recodage de type " aventure "), soit les retombées du projet sont très importantes (recodage de type " technologique ").

L'art du recodage consiste en une démarche active visant à concevoir des contextes futurs dans lesquels le projet apparaît comme un impératif et est sans concurrent.

Conclusion générale

La question principale que nous avons traitée porte sur les méthodes et les modes de gestion des projets de rupture technologique dans un contexte socio-économique plutôt défavorable à ce type d'investissements (si on le compare au contexte des années 60 et 70). Les conditions des années 60 et 70 permettaient "d'ignorer" un certain nombre de problèmes (par exemple le financement de projets dont la rentabilité directe estimée est faible). La disparition de ces conditions révèle ces problèmes dans toute leur acuité. On se rend compte désormais que les projets de rupture technologique concentrent d'immenses difficultés. Il s'est donc avéré nécessaire de construire les bases d'une nouvelle économie des grands projets de rupture.

L'écriture de ce rapport interdisciplinaire a mobilisé les efforts collectifs d'économistes (économie de l'innovation), de gestionnaires (gestion des organisations, gestion financière) et d'ingénieurs (transport, logistique). Le développement de la recherche a consisté essentiellement en quatre études de cas concernant des projets de rupture (Suisse, France, Suède et Allemagne), en confrontation de ces études avec un certain nombre d'outils théoriques formels (exemple: théorie de la hiérarchie des financements, celle portant sur l'optimisation des apprentissages technologiques ou encore théorie des valeurs d'option) ou plus qualitatifs (exemple: théorie de l'incrementalisme et théorie de la gestion des connaissances). Cette confrontation entre étude empirique et apport théorique, réalisée dans un cadre de dialogue interdisciplinaire a permis de faire ressortir un certain nombre de "bonnes propriétés" concernant les processus de gestion des projets de rupture.

Les résultats obtenus peuvent être regroupés dans deux grandes perspectives

Il n'y a pas de formes d'organisation « sur étagère » (permettant de résoudre l'ensemble des problèmes posés) – c'est le projet lui même qui s'impose à la fois comme objectif de rupture et principe d'organisation

Le projet doit être considéré lui même comme la forme d'organisation adéquate à son propre développement. Prenons les trois problèmes suivants, évoqués dans ce rapport.

- En tant que rupture technologique, les projets étudiés possèdent une richesse essentielle, le stock de savoir accumulé par les phases incessantes de recherche, apprentissage et expérimentations virtuelles et réelles. Or, paradoxalement, la nature socio-économique du projet rend ce stock de savoir extrêmement fragile, sans cesse menacé d'éclatement ou d'oubli. En effet, un projet de rupture technologique est un projet de long terme, qui connaîtra de nombreux changements de personnes et d'importantes révisions de choix. Il ne peut, en outre, s'abriter à l'intérieur des frontières protectrices d'une entreprise. La mémoire du projet est donc fragile. Ceci implique nécessairement que le projet fonctionne lui même fournisse en tant que processus de mémorisation et de transmission des savoirs.

- La rupture technologique ne peut être réduite à une innovation unique et essentielle. C'est une multitude d'innovations de toute nature, engendrées en permanence par les processus de recherche et d'opérationnalisation. Dès lors les « espaces non programmés » du projet s'étendent à l'infini ; ce qui complique grandement la coordination entre les agents et entre les objectifs. Seul le projet lui même peut fournir une rationalité organisationnelle adaptée à cette forme d'innovation permanente : le projet est un espace d'apprentissage, dans lequel les objectifs sont progressivement découverts.

- La gestion de la rupture technologique dépend étroitement de la mobilisation des communautés professionnelles et en particulier d'un certain nombre d'instigateurs du changement, à la fois compétents sur la technologie normale et détachés d'elle. La capacité de mobilisation du projet est dès lors essentielle. Il faut mobiliser les membres importants de ces communautés et seul le projet peut fournir les instruments de cette mobilisation. L'enjeu sera alors de rendre le nouveau défi séduisant à leurs yeux (la dimension excitante de tout esprit), tout en tenant compte de leurs besoins de s'autojustifier (en prenant appui sur des critères socio-économiques) et en édifiant des défenses contre ce qu'ils perçoivent, dans ce détachement de la technologie normale et peut être de leur organisation initiale, comme menaçant leur sécurité professionnelle.

De ces trois points surgit fondamentalement l'argument qu'il n'y a pas de formes d'organisation «sur étagère », capable de remplir ces rôles et que le projet apparaît lui même comme le principe d'organisation permettant d'assurer cette capacité de mobilisation, de construire une rationalité de « non programmation » et de définir les conditions de la capitalisation des savoirs.

Gérer la rupture c'est fabriquer de la continuité dans toutes les dimensions du projet

Les discontinuités créées par la rupture technologique sont nombreuses et représentent des obstacles importants au démarrage, au développement et à la réussite d'un tel projet. Ces ruptures s'expriment en termes d'ignorance cognitive dans les domaines de la R&D, des usages sociaux et des pratiques de gestion du nouveau système. Elles s'expriment aussi en termes de fossé de crédibilité pour les financiers, en termes d'impossibilité d'évaluer correctement les coûts et les bénéfices, en termes d'une déconnection du nouveau système par rapport au réseau existant. Un mode de gestion pertinent revient alors à fabriquer de la continuité au delà de ces discontinuités fondamentales, tant au niveau des apprentissages technologiques, qu'à ceux des modalités de financement, de l'évaluation ou encore de la transition entre système ancien et système nouveau. A tous ces niveaux, notre rapport met en évidence la façon de construire ces continuités en dépit du caractère de rupture imprimé par la technologie.

Bibliographie

- N.Alter, 1993, "Innovation et organisation: deux légitimités en concurrence", Revue Française de Sociologie, Avril-Juin
- N.Alter, 1995, "Peut-on programmer l'innovation ?", Revue Française de gestion, Mars/Avril/Mai
- F.Büllingen, 1997, "Die genese der magnetbahn Transrapid", Deutscher Universitäts Verlag, Wiesbaden
- M.Callon, 1997, "The role of lay people in the production and dissemination of scientific knowledge", CSI, Ecole des Mines de Paris
- E.Constant, 1973, "Un changement de paradigme technologique", Culture Technique
- R.Cowan, 1991, "Rendements croissants d'adoption et politique technologique", in J.deBandt et D.Foray, "L'évaluation de la recherche et du changement technique", Ed.CNRS
- R.Cowan et D.Foray, 1998, "L'économie de la codification et de la diffusion des connaissances", in Pascal Petit (ed.), L'économie de l'information, La Découverte
- R.Cowan, P.David et D.Foray, 2000, "The explicit economics of knowledge codification and tacitness", Industrial and Corporate Change, vol9, n°2
- P.David et J.Bunn, 1991, "L'économie des passerelles technologiques et l'évolution des réseaux", Flux, Avril-Juin
- P.David, D.Mowery, et E.W. Steinmueller, 1992, "Analysing the economic payoffs from basic research", Economics of Innovation and New Technology, vol.2, 1
- ECOSIP, 1993, "Pilotage de projet et entreprises : densités et convergences", Economica, Paris
- D.Foray, 1996, "Diversité, sélection et standardisation: les nouveaux modes de gestion du changement technique", Revue d'Economie Industrielle, n°75
- D.Foray, et M.Gibbons, 1996, "Discovery in the context of application", Technological Forecasting and Social Change
- M.Hansen, N.Nohria et T.Tierney, 1999, "What's your strategy for managing knowledge?", Harvard Business Review, Mars-Avril
- E. von Hippel, 1988, The sources of innovation, Oxford University Press
- E.von Hippel, 1994, "Sticky information and the locus of problem solving: implications for innovation, Management Science, vol.40, 4.

E.von Hippel, M.Tyre, 1995, "How learning by doing is done: problem identification in novel process equipment", *Research Policy*, 24

M.Hobday, 2000, "The project-based organisation: an ideal form for managing complex products and systems?", *Research Policy*, 29

M.C.Jensen, W.H.Meckling, 1976, "Theory of the firm: managerial behavior, agency costs and ownership structure", *Journal of Financial Economics*, vol.3

O.Klein, 2000, *La genèse du TGV: une innovation contemporaine de l'épuisement du Fordisme*, document de travail, LET-ENTPE

J.Kline et N.Rosenberg, 1986, "An overview of innovation", in N.Rosenberg et R.Landau, *The positive sum strategy*, National Academy of Science

B.Latour, 1992, *Aramis ou l'amour des techniciens*, Editions La Découverte

J. March, 1991, "Exploration and exploitation in organizational learning", *Organization Science*, vol10, n°1, pp;71-87

C. Midler, 1991, "L'apprentissage de la gestion par projet dans l'industrie automobile", *Annales des Mines, Série Réalités Industrielles*, octobre

F.Modigliani et M.H.Miller, 1958, "The costs of capital, corporation finance, and the theory of investment", *American Economic Review*, Juin

F.Modigliani et M.H.Miller, 1963, "Corporate income taxes and the cost of capital: a correction", *American Economic Review*, Juin

S.C.Myers, 1977, "Determinants of corporate borrowing", *Journal of Financial Economics*, vol.5

F.Perroux, 1979, "Politique de la science, analyse de l'innovation et de sa propagation", *Economies et Sociétés, cahier de l'ISMEA, série HS, n°23*

G.Pisano, 1996, "Learning-before-doing in the development of new process technology", *Research Policy*, 25

C.Shapiro et A.Varian, 1999, *Economie de l'information*, De Boeck Université

E.Steinmueller, 1991, "The economics of alternative integrated circuit manufacturing technology: a framework and an appraisal", CEPR working paper, 253, Stanford University

E.Steinmueller, 2000, "Learning in the knowledge-based economy: the future viewed from the past", *Conférence en l'honneur de Paul David*, Turin

G.Tassey, 1995, Technology infrastructure and competitive position, Kluwer Academic Publishers

S.Thomke, E.von Hippel, R.Franke, 1998, "Modes of experimentation: an innovation process-and competitive-variable, Research Policy, 27

Annexe

**Programme du séminaire final de présentation des résultats :
07 décembre 2000, à l'Université Paris Dauphine**



SEMINAIRE

Présentation et analyse des résultats du projet de recherche (*)

"CHOIX D'INVESTISSEMENT DANS LES PROJETS DE RUPTURE TECHNOLOGIQUE ET
FORMES ORGANISATIONNELLES :

Le cas des trains à grande vitesse "

Jeudi 07 décembre 2000
de 13h 00 à 17h 30

à l'Université Paris-Dauphine
salle A709 - Bâtiment A

organisé par

l'IMRI, Institut pour le Management de la Recherche et de l'Innovation,
Université Paris-Dauphine

dans le cadre du

Programme PREDIT 1996-2000

(*) : Etude financée dans le cadre du **Programme PREDIT 1996-2000, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, DRAST (Décision d'aide à la Recherche n°98 MT 07)** et réalisée par **l'IMRI (Université Paris-Dauphine) : E. Boutron, A. David, D. Foray, S. Hulten, C. Saubesty, S. Vernimmen, le BETA (Université Louis Pasteur) : P. Liérena, E. Schenk, S. Danner Petey et l'ITEP-LEM (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) : F.-L. Perret, G. de Tilière.**

PROGRAMME

13h 00 Accueil et introduction par **Michel POIX**, *Vice-Président*, Université Paris Dauphine et *Directeur*, IMRI
Dominique FORAY, *Directeur de Recherches-CNRS*, IMRI, Université Paris-Dauphine,
Francis YGUEL, *Conseiller Scientifique*, Secrétariat Permanent PREDIT.

13H15-14H 30 SESSION 1

" Economie des projets de rupture technologique "

Exposé introductif par **Patrick LLERENA**, *Professeur*, BETA, Université Louis Pasteur et
Eric SCHENK, *Maître de Conférences*, ENST Bretagne

Commentaires et analyse par :

- **Franck AGGERI**, *Maître-assistant*, CGS, Ecole des Mines de Paris
- **Yves CROZET**, *Professeur, Directeur du LET*, Université Lyon II

14h 30-15h 45 SESSION 2

"Méthodes de financement et outils d'évaluation des projets de rupture technologique"

Exposé introductif par **Emmanuel BOUTRON**, *Maître de Conférences*, Université Paris X Nanterre, **Guillaume de TILIÈRE**, *chercheur*, ITEP, EPFL et détaché à ITS/UC Berkeley, **Dominique FORAY**, *Directeur de Recherches* au CNRS, IMRI, Université Paris-Dauphine

Commentaires et analyse par :

Patrick COHENDET, *Professeur*, BETA, Université Louis Pasteur

Michele MOSSI, *Dr. Ing. Directeur opérationnel* du projet Swissmetro, GESTE

15h 45-16h00 Pause

16H 00- 17H 30 TABLE-RONDE

« Enjeux et Perspectives de la gestion de projets de rupture technologique »

introduite et animée par **Albert DAVID**, *Professeur*, Université d'Evry -Val d'Essonne
et CGS /Ecole des Mines de Paris

avec : - **Norbert ALTER**, *Professeur, Directeur* du CERSO, Université Paris Dauphine

- **Michel CORNIL**, *Conseiller du Président*, SNCF

- **Bernard FROIS**, *Directeur* du Département ETERN, Direction de la Technologie, M.R.T.

- **Michel FRYBOURG**, *Président* de l'axe de Pertinence socio-économique des nouvelles technologies
- temporalités de l'innovation, Groupe Recherches Stratégiques du PREDIT.

- **Jean Pierre GIBLIN**, *Président* de la 3^{ème} section du Conseil Général des Ponts et Chaussées

- **Jean-Claude RAOUL**, *Directeur Technique*, ALSTOM TRANSPORT

- **Pierre ROSSEL**, *Professeur*, EPFL

