

Record Number:

Author, Monographic: Lefebvre, Y.//Sasseville, J. L.//Crowley, M.

Author Role:

Title, Monographic: Freins et stimulants opérationnels à l'initiative de valorisation
technologique de la biomasse : raisonnements technologiques et choix des
investissements

Translated Title:

Reprint Status:

Edition:

Author, Subsidiary:

Author Role:

Place of Publication: Québec

Publisher Name: INRS-Eau

Date of Publication: 1987

Original Publication Date: Mars 1987

Volume Identification:

Extent of Work: vii, 85

Packaging Method: pages incluait un annexe

Series Editor:

Series Editor Role:

Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche

Series Volume ID: 218

Location/URL:

ISBN: 2-89146-216-5

Notes: Rapport annuel 1986-1987

Abstract: Rapport rédigé pour le Centre québécois de valorisation de la biomasse (CQVB)
15.00\$

Call Number: R000218

Keywords: rapport/ ok/ dl

**FREINS ET STIMULANTS OPÉRATIONNELS
À L'INITIATIVE DE VALORISATION TECHNOLOGIQUE DE LA
BIOMASSE:
RAISONNEMENTS TECHNOLOGIQUES ET CHOIX DES INVESTISSEMENTS**

ÉTUDE RÉALISÉE POUR LE COMPTE DU
CENTRE QUÉBÉCOIS DE VALORISATION DE LA BIOMASSE

INRS-EAU
Rapport scientifique No 218

INRS-Eau
C.P. 7500
Sainte-Foy (Québec)
G1V 4C7

Mars 1987

Yves Lefebvre
Jean-Louis Sasseville
Michel Crowley

Éditeurs: Jean-Louis Sasseville et Michel Crowley, INRS-Eau

**RAPPORTS PUBLIÉS DANS LE CADRE
DE L'ÉTUDE
SUR LES FREINS ET STIMULANTS À L'INITIATIVE TECHNOLOGIQUE
DE VALORISATION DE LA BIOMASSE**

1. "L'environnement économique des initiatives de valorisation de la biomasse: raisonnements économiques et choix des investissements". L. Gauthier, J.L. Sasseville et B. Vermot-Desroches, "INRS-EAU, rapport scientifique No 213".
2. "Les freins et stimulants à l'initiative de la valorisation technologique de la biomasse: le cas de certaines entreprises québécoises". S. Leith, J.L. Sasseville et B. Vermot-Desroches, "INRS-EAU, rapport scientifique No 217".
3. "L'environnement institutionnel de l'initiative technologique de valorisation de la biomasse". V. Boucher et J.L. Sasseville, "INRS-EAU, rapport scientifique No 216".
4. "Freins et stimulants opérationnels à l'initiative de valorisation technologique de la biomasse: raisonnements technologiques et choix des investissements". Y. Lefebvre, J.L. Sasseville et M. Crowley, "INRS-EAU, rapport scientifique No 218".
5. "Politique d'innovation et réussite technologique: un modèle d'organisation des raisonnements dans les choix stratégiques en matière de valorisation technologique de la biomasse". J.L. Sasseville et B. Vermot-Desroches, "INRS-EAU, rapport scientifique No 219".

Étude dirigée par Jean-Louis Sasseville, Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau), et Bernard Vermot-Desroches, Université du Québec à Trois-Rivières (Département d'administration et d'économie).

Editeurs: Jean-Louis Sasseville et Michel Crowley, INRS-Eau.

**FREINS ET STIMULANTS OPÉRATIONNELS
À L'INITIATIVE DE VALORISATION TECHNOLOGIQUE DE LA
BIOMASSE:
RAISONNEMENTS TECHNOLOGIQUES ET CHOIX DES INVESTISSEMENTS**

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 La gestion du processus d'innovation	7
1.1 Le contexte de l'innovation	7
1.2 Les problèmes de choix dans le processus d'innovation	10
1.3 Paramètres de l'innovation et faisabilité technologique	20
1.4 Faisabilité technologique et maîtrise du processus de R.D.	24
CHAPITRE 2 Les grands domaines de difficultés technologiques de la valorisation industrielle de la biomasse ..	33
2.1 Caractérisation générale des contraintes qui déterminent la faisabilité technologique ...	33
2.2 Exemple de la mise à l'échelle d'un procédé de biotransformation	40
2.3 Les grands domaines de difficultés techno- logiques propres à la valorisation de la biomasse	51
2.4 L'exploitation des biotechnologies et les problèmes environnementaux	57
2.4.1 Survol des domaines d'application des biotechnologies	59
2.4.2 Les facteurs associés à la production d'altéragènes environnementaux pouvant augmenter l'incertitude technologique d'un projet	61
Les besoins en information sur les organismes modifiés génétiquement.	61
Les conséquences écologiques poten- tielles du rejet d'un produit bio- technologique	63
Exemple d'un impact potentiel sur l'environnement de l'introduction d'un organisme modifié généti- quement	65
DISCUSSION	71
RÉFÉRENCES	77
ANNEXE - Présentation sommaire de quelques techniques applicables en aval d'un processus de fermentation .	A1

RÉSUMÉ

Ce rapport scientifique est le fruit de l'analyse technologique réalisée dans le cadre d'une étude portant sur la mise en évidence de freins et stimulants opérationnels à l'initiative de valorisation de la biomasse. L'objectif principal de cette analyse consiste à tenter d'évaluer le niveau d'importance qu'il faut attribuer à l'évaluation technologique lors de la sélection des différents projets de valorisation de la biomasse. L'approche méthodologique utilisée pour réaliser cette portion de l'étude consiste en l'élaboration d'une revue de la littérature pertinente au développement technologique de la valorisation et à la gestion du processus de l'innovation technologique. Les principaux thèmes abordés dans ce rapport sont: 1- le contexte difficile de l'innovation technologique, du processus et des instruments de gestion de la Recherche et Développement; 2- la présentation d'un modèle conceptuel pour la caractérisation des difficultés technologiques se manifestant lors du développement d'un procédé; 3- l'identification des difficultés technologiques qui peuvent se présenter lors de la solution de problèmes techniques imposés par le contrôle des processus impliqués dans la valorisation de la biomasse et 4- les contraintes environnementales à l'exploitation de produits issus de biotechnologies.

SOMMAIRE ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Cette réflexion sur la problématique des difficultés technologiques et des choix d'investissements nous a permis de dégager les conclusions générales suivantes.

- 1- La réduction de l'incertitude commerciale et de l'incertitude technologique est essentielle au moment d'engager de fortes sommes dans le processus d'innovation: ceci reflète bien la relation de réciprocité entre les paramètres qui définissent le succès commercial et ceux qui sont associés au succès technologique.
- 2- La faisabilité commerciale et la faisabilité technologique définies par un ensemble de paramètres de l'innovation imposés par les forces du marché constituent les éléments les plus critiques dans le cheminement décisionnel des investisseurs. On retrouve parmi les paramètres de l'innovation le montant maximal de l'investissement, la durée de l'effort de mise au point du produit, les caractéristiques du produit, les exigences en terme de performance, durabilité, complexité et maîtrise du procédé, ...
- 3- L'inquiétude plus grande de l'investisseur en regard de la faisabilité commerciale plutôt qu'en regard de la faisabilité technologique entraîne un déséquilibre entre l'importance attribuée au rôle des forces du marché dans la réussite technologique par rapport à celui des pressions technologiques: ceci conduit à une sous-estimation des difficultés technologiques qu'il faut surmonter pour la réussite commerciale de l'innovation.

- 4- Considérant que moins de 2% des propositions initiales que l'on engage dans le processus de développement de nouveaux produits deviennent des succès commerciaux, la diminution des risques d'investissement devient alors une contrainte importante pour les gestionnaires du processus de développement. Un moyen efficace pour réduire les risques d'investissement consiste donc à effectuer une sélection prudente de projet.
- 5- Le démarrage et la conduite de tout processus de R & D engendrent irrémédiablement des problèmes décisionnels nécessitant une bonne connaissance de facteurs d'ordre technique. L'importance des facteurs techniques comme éléments cruciaux déterminant le succès technologique de l'innovation a été souligné à maintes reprises.
- 6- Certaines conséquences sur le niveau d'incertitude technologique d'un projet sont attribuables à des paramètres de l'innovation, imposés par les conditions susceptibles d'entraîner le succès commercial du produit.
- 7- Plusieurs auteurs affirment que les intervenants dans la R & D ont souvent tendance à sous-estimer les délais et les coûts ainsi qu'à surestimer le niveau de performance du produit de l'innovation en vertu de l'importance des préjugés optimistes qu'ils arborent au moment de l'évaluation des difficultés associées au développement des technologies.
- 8- Le modèle conceptuel que nous proposons pour la caractérisation des difficultés technologiques se manifestant au cours du développement d'un procédé semble représenter adéquatement les interactions entre les difficultés technologiques et le processus d'innovation. Les difficultés technologiques sont issues de la conjugaison des contraintes contextuelles et des ontraintes d'ordre technique.

- 9- L'exemple de la mise à l'échelle d'un procédé de fermentation par la compagnie ICI a soulevé l'importance capitale que revêt pour l'entrepreneur technologique l'intégration d'une approche de mise à l'échelle qui soit multidisciplinaire, fortement interactive et qui puisse réagir avec souplesse lorsque confrontée à un verrou technologique. De plus, cette expérience nous a révélé l'éventualité de l'apparition en cascades de nouvelles difficultés technologiques interdépendantes provenant de la résolution d'une première difficulté.
- 10- Nous avons identifié une gamme de contraintes d'ordre technique qui engendrent différentes difficultés technologiques lors du développement d'un projet. Quelques-unes des causes de perturbations du procédé sont: l'acquisition de certains champs de connaissances théoriques et empiriques, la récupération des produits de fermentation, la recirculation du milieu de culture, etc.
- 11- Parmi les contraintes contextuelles comme les caractéristiques et la gestion des substrats, produits et résidus ou les exigences à la commercialisation du produit, celles qui nous apparaissent les plus insidieuses sont celles reliées aux retombées environnementales potentielles de l'exploitation industrielle des biotechnologies.

INTRODUCTION

La mise au point de nouvelles technologies ou de nouveaux produits peut être perçue comme un long processus heuristique et socio-technique de réduction de l'incertitude sur leur faisabilité commerciale et technique. La réduction de l'incertitude commerciale est une recherche des conditions et caractéristiques du produit ou de la technologie qui assureront un retour sur l'investissement qui tienne compte du niveau de risque, c'est-à-dire du niveau de difficultés technologiques et de commercialisation associé à la mise au point du produit de l'innovation (la technologie ou le produit) et de son insertion réussie (sa compétitivité) sur le marché pour une période correspondante au cycle de rentabilisation. De son côté, la réduction de l'incertitude technologique consiste en un développement systématisé de connaissances théoriques et empiriques sur les processus et phénomènes critiques dans un procédé et sur le contrôle de ces phénomènes à l'intérieur des paramètres imposés par le contexte commercial et les possibilités technologiques.

Ce processus de réduction de l'incertitude est représenté à la figure 1. Bien que constituant une simplification du processus de développement d'une technologie ou d'un produit commercial, ce schéma de réduction de l'incertitude que l'on doit à Scott et Szonyi (1979), illustre assez bien la relation de réciprocité entre les paramètres qui définissent le succès commercial et ceux qui définissent le succès technologique:

(FAISABILITÉ COMMERCIALE)

Ensemble des conditions socio-économiques définissant les paramètres de conception du produit ou de la technologie

(FAISABILITÉ TECHNOLOGIQUE)

Ensemble des phénomènes et processus imposant les paramètres d'harmonisation et de contrôle du procédé

ÉTAPE DE L'ÉVALUATION

ÉTAPE DE L'ÉVALUATION

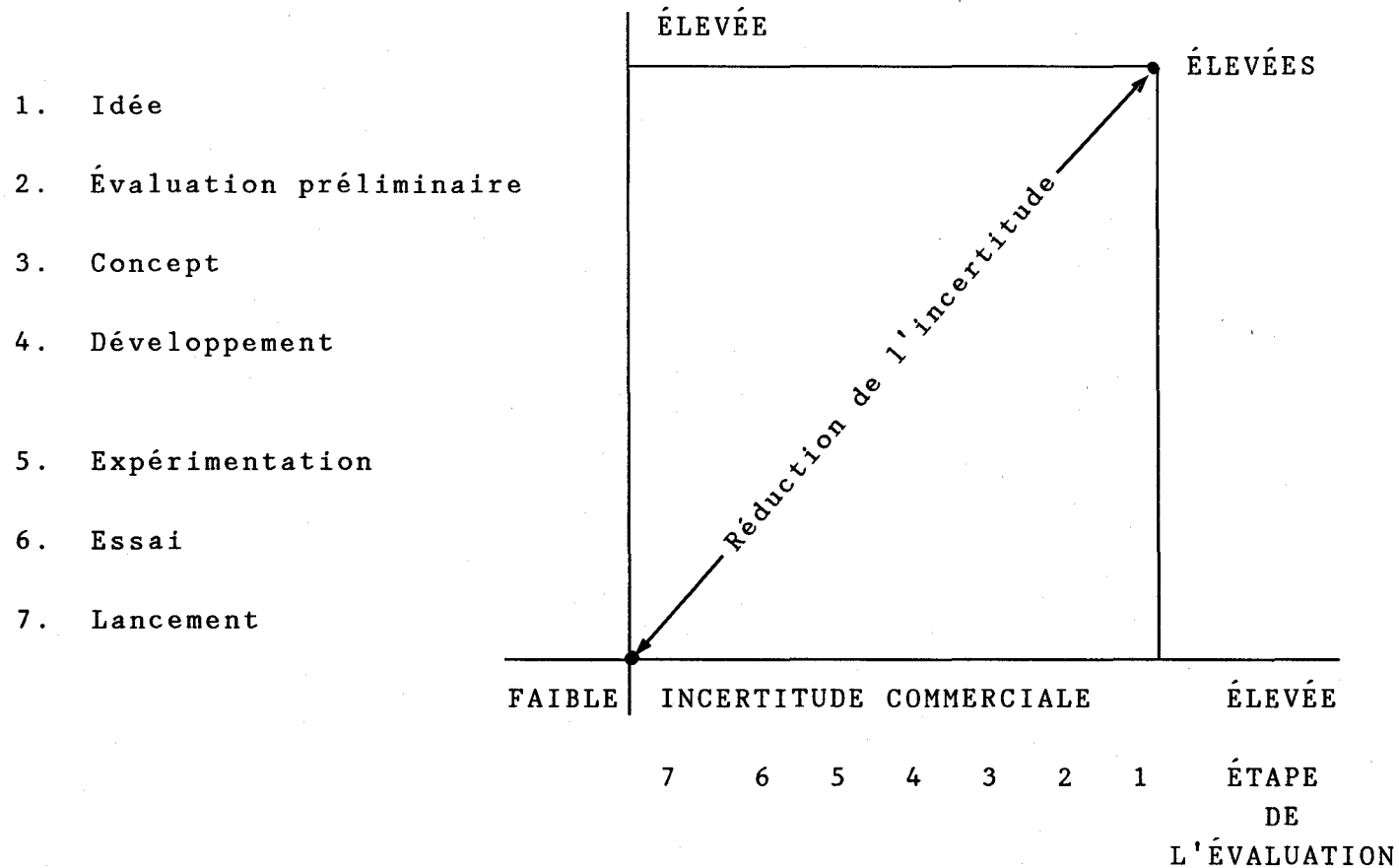


Figure 1. Processus de réduction de l'incertitude commerciale et technologique (Martin, 1984; Scott et Szonyi, 1979)

L'effort de réduction de l'incertitude commerciale dans la phase constitutive de l'investissement entraîne une connaissance approfondie des conditions qui "garantissent" le succès du produit de l'innovation telles, par exemple, l'absence de difficultés de commercialisation liées au concept, un avantage réel sur les produits concurrents, la correspondance à un besoin exprimé sur le marché et la capacité de satisfaire la clientèle (Cooper, 1982). D'ailleurs, en pratique, on retrouve au nombre des innovations réussies beaucoup plus d'innovations engendrées par les besoins du marché (market pull) que des innovations issues d'un concept purement technologique (technological push): dans une étude sur 567 innovations réussies, Myers et Marquis (1969) ont mis en évidence que 79% d'entre elles originaient d'un besoin reconnu sur le marché. Ces résultats ne sont guère surprenants puisqu'il y a prépondérance de la rationalité économique sur la rationalité technologique (l'information, les connaissances et les raisonnements conduisant au succès commercial versus le succès technologique), au moment de s'engager à investir de fortes sommes dans le processus d'innovation.

Le déséquilibre entre l'importance attribuée au rôle des forces du marché dans la réussite technologique par rapport à celui des pressions technologiques entraîne souvent une sous-estimation des difficultés technologiques qu'il faut surmonter pour la réussite commerciale de l'innovation; l'inquiétude plus grande de l'investisseur en regard de la faisabilité commerciale qu'en regard de la faisabilité technologique est peut être explicable par le fait que l'on juge généralement qu'il y a 3 fois plus de chances qu'un nouveau produit échoue à cause des forces du marché, qu'à cause de difficultés technologiques (Cooper, 82). Cependant, une proportion appréciable de produits ne voient pas le jour à cause de l'échec technologique du processus d'innovation, c'est-à-dire à cause de l'incapacité de résoudre dans des délais et à l'intérieur de coûts

raisonnables les difficultés techniques qui se posent, qu'elles soient dues aux phénomènes que l'on veut exploiter, aux processus que l'on tente d'asservir ou encore, aux exigences techniques imposées par les forces du marché ou par la réglementation. Ainsi, par exemple, outre la reconnaissance du marché comme facteur du succès du processus d'innovation, certaines études ont montré que les innovations radicales sont souvent dominées par des facteurs technologiques et organisationnels internes tels l'appréhension de l'opportunité technique, la qualité de la gestion du processus de R.D., des fonds de développement suffisants, des qualités d'entrepreneurship technique et une bonne planification opérationnelle (Globe et al., 1973; Cooper, 1982). Pour ce type d'innovation, la réduction de l'incertitude technologique est donc tout aussi critique pour le succès du processus que la réduction de l'incertitude commerciale et ne peut être considérée comme acquise au moment de l'investissement.

Dans ce rapport, nous allons tenter de mettre en évidence certains types de problèmes qui peuvent maintenir l'incertitude technologique à un niveau élevé dans le processus d'innovation et s'avérer ainsi porteurs d'échecs technologiques. Après avoir introduit le contexte difficile de l'innovation technologique et discuté du processus et des instruments de gestion de la R.D., nous allons traiter des difficultés qui peuvent se rencontrer dans la solution des problèmes techniques imposés par le contrôle des processus physiques, physico-chimiques et biochimiques impliqué dans les technologies de valorisation de la biomasse ainsi que par la réglementation environnementale qui pose des contraintes aux choix technologiques. Nous espérons ainsi être en mesure de juger de l'importance qu'il faut accorder à l'évaluation technologique au moment de choisir certaines filières de valorisation et de susciter des investissements privés ou publics en matière d'innovation.

CHAPITRE 1

LA GESTION DU PROCESSUS D'INNOVATION

1. LA GESTION DU PROCESSUS D'INNOVATION

Dans ce chapitre, on tentera de situer l'importance que revêt la réussite du processus de recherche et développement dans le contexte de l'innovation technologique: après avoir mis en évidence les éléments qui sont importants dans la réussite technologique, on traitera des modes et des instruments de gestion de la R.D., particulièrement au niveau de l'évaluation, du choix et de la planification de l'entreprise de recherche et développement.

1.1 LE CONTEXTE DE L'INNOVATION

Plusieurs entreprises reconnaissent l'importance du développement d'un nouveau produit comme voie menant à la profitabilité. En effet, si l'on considère qu'environ 2% du produit national brut (PNB) des Etats-Unis est consacré au secteur de la recherche et du développement (R&D), et qu'une forte proportion de cette masse monétaire est consacrée à la création de nouveaux produits, on est forcé de constater l'ampleur de l'activité recherche et développement déployée afin d'assurer la survie des entreprises, d'autant plus que le poste budgétaire R&D n'inclut pas les coûts liés à la commercialisation des nouveaux produits. Certains pays comme la République Fédérale d'Allemagne (RFA) et le Japon consacrent une fraction encore plus élevée de leur PNB à leurs activités en R&D.

Une enquête auprès de l'exécutif de plusieurs firmes menée par le "Conference Board" des Etats-Unis (1980) a mis en évidence qu'environ 15% de leurs ventes était attribuable à un nouveau produit majeur qu'elles commercialisaient depuis moins de 5 ans. Au Canada, à la même époque, une étude du Centre d'Innovation Industrielle de Montréal indiquait que tout nouveau produit, majeur ou mineur, comptait pour 32% des ventes de formes industrielles.

Par ailleurs, l'étude du Conference Board a mis en évidence un gain de confiance des entrepreneurs envers les nouveaux produits. En effet, 71% des administrateurs déclarèrent que leur compagnie serait plus dépendante des nouveaux produits au cours des cinq années suivantes, 21% exprimèrent le même niveau de confiance tandis qu'à peine 8% croyaient que les nouveaux produits deviendraient moins importants dans la réalisation des objectifs de vente de leur compagnie.

Le développement et la commercialisation de nouveaux produits, quoique jugés critiques quant à la rentabilité de plusieurs firmes, sont confrontés aux incertitudes commerciales et technologiques. Hopkins (1980) rapporte que pour chaque ensemble de 100 projets de nouveaux produits industriels lancés sur le marché, environ 39,5 s'avèreront un échec. Crawford (1979) quant à lui évalue à environ 35% le taux d'échec d'un nouveau produit. Une autre étude, menée par Cooper en 1982, estime que pour 100 nouveaux produits industriels (majeurs ou mineurs) pleinement développés, 60 deviendront un succès commercial, 20 seront abandonnés avant le lancement et 20 seront un échec commercial. Ce que ces taux de succès ne mettent pas en évidence, ce sont les nombreux projets de nouveaux produits qui ont avortés au cours du développement ou avant, et qui n'ont jamais progressé vers l'étape de la commercialisation. Ce profil de taux d'échec minimise la valeur des ressources mal affectées, c'est-à-dire les ressources consacrées à des échecs, dans les programmes de développement de nouveaux produits. Booz, Allen et Hamilton (1968) évaluent qu'environ 70% des ressources de l'industrie américaine engagée dans le développement de nouveaux produits sont gaspillées pour des produits voués à l'échec ou à l'abandon. D'autre part, l'étude de Cooper affirme que pour chaque 58 idées de nouveaux produits qui sont considérées par les entreprises, une seule parviendra au succès commercial. En effet, de cet ensemble d'idées de nouveaux produits qui s'engage dans le processus de développement:

- 78% sont abandonnées à l'étape de sélection de projets;
- du reste, 46% sont rejetées au cours de l'analyse commerciale en laissant ainsi 54% entrer dans le développement;

- de ceux-ci, un autre 43% avortent;
- des produits émergeant du développement, 50% sont abandonnés avant le lancement;
- de ceux qui sont lancés, environ 50% deviendront des succès commerciaux.

Globalement, moins de 2% des propositions initiales que l'on engage dans le processus de développement de nouveaux produits deviennent des succès commerciaux.

Le taux élevé d'échecs technologiques ou d'extinction (l'"attrition rate") associés au développement de nouveaux produits crée un dilemme pour les gestionnaires en innovation qui occupent une place de plus en plus stratégique dans les corporations modernes. En effet, considérant d'une part que le développement de produits est perçu comme essentiel par plusieurs entreprises pour leur croissance et leur survie, ce à cause des retombées résultant d'innovations atteignant la réussite et, d'autre part, que les coûts associés au développement de produits peuvent fluctuer énormément, on est forcé de constater que l'incertitude technologique engendre des conditions précaires pour les entreprises dans les marchés à haute valeur technologique ajoutée, ceci exigeant une maîtrise plus grande du processus d'innovation dans un cadre où la faisabilité technologique est de moins en moins assurée.

La diminution des risques d'investissement dans le secteur de la création de produit devient ainsi une contrainte importante pour les gestionnaires du processus de développement de nouveaux produits. Inversement, si une entreprise désire profiter d'un programme de nouveaux produits couronné de succès, il faudra évidemment éliminer certaines incertitudes commerciales liées au développement de produits. Ainsi, par exemple, une sélection prudente de projets s'avère être un moyen efficace pour diminuer les risques en permettant d'identifier à l'avance les nouveaux produits potentiellement gagnants, réduisant ainsi le taux d'échec et augmentant l'efficacité de la répartition des ressources internes de

la compagnie. La sélection de nouveaux produits s'avère ainsi une tâche pivot pour maximiser les retombées d'un programme de développement de nouveaux produits.

1.2 LES PROBLÈMES DE CHOIX DANS LE PROCESSUS D'INNOVATION

La phase de l'investissement peut être considérée à juste titre comme étant l'étape constitutive (Boucher et Sasseville, 1987) du processus de recherche et développement conduisant à la mise au point d'une nouvelle technologie ou d'un nouveau produit: l'investissement vient en effet cristalliser l'existence d'une opportunité engendrée par un champ de forces complexe originant des besoins du marché, des pressions technologiques, de la conjoncture économique, des incitations institutionnelles, de la maîtrise des connaissances scientifiques, de l'entrepreneurschip technologique et commercial, etc...

La décision d'investir soulève ainsi de nombreuses questions d'intérêt concernant l'utilité du projet d'innovation: Dean (1968) a identifié 32 domaines d'analyse et de contrôle, tous potentiellement réducteurs de l'incertitude commerciale et technologique au moment des premiers investissements d'importance (voir Tableau 1). Pour tenir compte de ces divers domaines d'incertitude apparaissant au cours de la phase constitutive du projet d'innovation, la démarche d'évaluation s'organise généralement sous la forme d'une séquence d'analyses aboutissant chacune à l'élaboration d'un dossier abordant les questions jugées critiques au domaine de la réussite commerciale et technologique. Par exemple, le CQVB a adopté la séquence d'évaluation habituelle progressant de l'analyse d'opportunité, vers l'étude de pré-faisabilité, puis finalement vers l'étude de faisabilité, chacune de ces études étant adaptée à sa fonction de co-investisseur et à son rôle, en tant qu'organisme de répartition de fonds publics, dans la consolidation du processus d'innovation technologique dans le secteur de la biomasse. L'analyse de la démarche d'évaluation fait ressortir, pour chacune des étapes, 7 domaines d'intérêts, chacun d'entre eux comportant de 3 à 10 secteurs d'information touchant le produit de l'innovation, les

Tableau 1. Ensemble de questions d'intérêt dans le choix de projets d'innovation technologique (Dean, 1968; Martin, 1984)

-
-
1. Compatibilité avec les objectifs de la compagnie
 2. Compatibilité avec la planification stratégique
 3. Accessibilité au savoir-faire scientifique et technique
 4. Problèmes techniques critiques susceptibles de se développer
 5. Compatibilité avec le reste des programmes R.D.
 6. Niveau d'interaction avec les autres projets de R.D.
 7. Niveau de compétition avec les autres projets de R.D.
 8. Étendue du marché visé
 9. Facteurs affectant l'expansion du marché
 10. Influence des réglementations gouvernementales
 11. Potentiel d'exportation
 12. Réaction de la compétition
 13. Possibilités de brevets, de licences ou d'arrangements
 14. Possibilités de la recherche coopérative
 15. L'effet sur les ventes et sur les autres produits
 16. Disponibilité et prix des fournitures
 17. Possibilités d'exploiter les "spin off"
 18. Disponibilité de la main-d'oeuvre qualifiée pour la production
 19. Disponibilité de la main d'oeuvre qualifiée pour la commercialisation
 20. Paramètres de publicité
 21. Dispositions pour la vente et le service
 22. Effet sur l'usage de la campagne
 23. Risque pour la santé et la sécurité
 24. Coûts de développement, de production et de commercialisation
 25. Possibilité de protection de la propriété intellectuelle
 26. Niveau et calendrier d'investissements
 27. Localisation
 28. Attitude du personnel clé en R.D.
 29. Attitude des directeurs
 30. Attitude des départements de production et de commercialisation
 31. Attitude des syndicats
 32. Effet sur la profitabilité

entreprises impliquées, les lieux et le mode de réalisation. Le tableau 2 met en évidence les questions d'intérêt abordé à l'étape du dossier d'opportunité (tableau 2A), du dossier de pré-faisabilité (tableau 2B) et du dossier de faisabilité (tableau 2C).

La production de ces divers dossiers permet aux investisseurs, aux gestionnaires et aux entrepreneurs technologiques non seulement de juger de la faisabilité d'un projet d'innovation, mais aussi de préparer un projet dont la structure et le mode de réalisation maximisent ses chances de succès commercial et technologique. Inversement, la démarche met en évidence les véritables enjeux commerciaux et technologiques porteurs à la fois des risques d'échecs et de l'intérêt socio-économique de l'entreprise d'innovation.

En pratique, cependant, la démarche d'évaluation n'est pas limitée au développement "ex-ante" du projet. Cooper (1982) (rapporté aussi par Martin, 1984) propose un modèle qui met en évidence le contrôle exercé par l'évaluation tout au long du processus de R.D.; l'analyse de ce modèle, présentée au tableau 3, montre 7 étapes dans le processus d'innovation exigeant des investissements additionnels où se retrouvent les évaluations commerciales et technologiques de contrôle, évaluations susceptibles à tout moment d'arrêter le processus d'innovation.

Comme on peut le constater, le démarrage et la conduite de tout processus de recherche et développement (R-D), impliqué dans la création d'un produit innovateur ou dans la mise au point d'un nouveau procédé pour la production d'un produit usuel, engendrent irrémédiablement des problèmes décisionnels nécessitant une bonne connaissance de facteurs d'ordre technique. L'importance des facteurs techniques comme facteurs cruciaux déterminant le succès technologique de l'innovation a été souligné à maintes reprises. Plus particulièrement, une synthèse touchant les politiques technologiques de R. Landry (1986) présente, en fonction du niveau d'importance, une liste de 29 facteurs affectant l'innovation technologique et qui appartiennent à six dimensions différentes (technique, organisationnelle, production, marketing, financière, gouvernemen

Tableau 2A. Structure du dossier d'opportunité (CQVB, 1986)

-
-
1. Intérêt pour le CQVB
 1. matières premières
 2. procédés
 3. produits
 4. innovation
 5. partenariat
 2. Intérêt socio-économique
 1. développement régional
 2. emploi
 3. environnement
 4. sécurité/santé
 5. arrangements institutionnels
 3. Intérêt scientifique
 1. état de la recherche
 2. excellence de la recherche
 3. capacités québécoises
 4. Intérêt technologique
 1. état de développement
 2. complexité
 3. potentiel d'élargissement
 5. Intérêt commercial
 1. ampleur du marché
 2. potentiel de vente
 3. croissance du marché
 4. facilité de promotion
 5. facilité de distribution
 6. compatibilité
 7. réponse à un besoin
 8. degré de dépendance
 6. Intérêt financier
 1. niveau d'investissement
 2. marge bénéficiaire
 3. délai de récupération
 4. possibilité de financement
 7. Intérêt industriel
 1. capacité de promoteur
 2. recherche de partenaire
 3. complémentarité
 4. effet d'entraînement
 5. compétitivité

Tableau 2B. Structure du dossier de pré-faisabilité (CQVB, 1986)

-
-
1. Produit
 1. avenir du produit
 2. bénéfices économiques (valeur)
 3. bénéfices pratiques (intérêts supplémentaires)
 4. bénéfices psychologiques
 2. Marché
 1. capacité relative du projet
 2. croissance de la demande
 3. perspective d'avenir
 4. sensibilité du marché
 5. évolution des capacités de production
 3. Commercialisation
 1. niveau de concurrence
 2. facteur de localisation
 3. contraintes sur les produits
 4. effort de promotion
 5. structure de distribution
 6. fixation des prix
 4. Facteurs de production
 1. matières premières
 2. produits auxiliaires
 3. fourniture particulière
 4. énergie
 5. eau
 6. services divers (élect., gaz...)
 7. main d'oeuvre
 8. équipements
 5. Procédé et technologie
 1. état de développement
 2. effort de développement
 3. degré d'obsolescence
 4. accessibilité
 5. mise en oeuvre
 6. investissement
 7. opération
 6. Rentabilité
 1. valeur présente nette
 2. taux interne de rendement
 3. délai de récupération
 4. sensibilité (détermination du risque associé aux investissements, financement, matières premières, main d'oeuvre...)
 5. ratio financiers (ACT/PCT) liquidité générale, rentabilité immédiate, équilibre
 7. Impact socio-économique
 1. local: (sur secteur industriel) revitalisation, diversification, modernisation industrielle, effet sur les prix et volume des intrants, sur la concurrence, sur la création d'emploi, sur la redistribution des bénéfices, sur l'environnement et les ressources
 2. provincial: diversification industrielle, valorisation des ressources, valeur ajoutée, balance commerciale, investissement, attrait de capitaux, conformité avec politiques de développement économique, social et scientifique
 3. national: balance commerciale, effets multiplicateurs, conformité aux politiques fédérales.

Tableau 2C. Structure du dossier de faisabilité (CQVB, 1986)

-
1. Secteurs industriels
(avantages et niveau de développement)
 1. importance du secteur de PNB provincial
 2. niveau de structuration industrielle
 3. importance en termes d'emplois
 4. niveau technologique du secteur
 5. importance des investissements
 6. intrants industriels en termes de ressources naturelles
 7. distribution régionale de l'industrie et des ressources
 8. importance des politiques gouvernementales dans le secteur
 2. Promoteurs et partenaires
(capacités)
 1. répartition du capital
 2. personnel clé
 3. actif
 4. bénéfices annuels
 5. ratio financiers
 6. projets en cours
 3. Marché-prix-commercialisation
 1. marché visé (importance, situation)
 2. évolution des prix (stabilité, croissance, sensibilité)
 3. comportement du marché
 4. Projet
(caractérisation)
 1. production
 2. localisation
 3. infrastructure
 4. matières premières
 5. procédés
 6. infrastructures
 7. effluents/traitement
 8. emploi/main d'oeuvre
 9. mise en oeuvre du projet
 5. Investissements et plan de financement
 1. coûts d'investissement
 - génie civil
 - équipements/pièces
 - installation et essais
 - ingénierie et gestion
 - fonds de roulement
 - intérêts capitalisés
 2. plan de financement
 - capital social
 - bénéfices non répartis
 - crédits des fournisseurs
 - prêt à long terme et à court terme
 6. Analyse financière
 1. flux d'encaisse
 2. analyse de sensibilité
 - inflation
 - production (coûts)
 - ventes
 - prix
 - conditions de financement
 - amortissement
 - valeurs de vente et revenus
 7. Analyse économique
(impact sur)
 1. le secteur industriel
 2. la région
 3. la province
 4. l'économie nationale

Tableau 3. La démarche d'évaluation et le processus d'innovation: analyse du modèle de Cooper (1982).

<u>Phase du processus</u>	<u>Activités commerciales</u>	<u>Contrôle et évaluation</u>	<u>Activités technologiques</u>
I	Tamissage commercial des idées d'innovation	idées 	Tamissage technologique des idées d'innovation
II	Évaluation commerciale préliminaire	esquisse (opportunités) 	Évaluation technologique préliminaire
III	Études commerciales du concept	concept 	Développement technique du concept
IV	Planification commerciale	prototype 	Design du prototype
V	Essais du prototype en milieu	prototype amélioré 	Développement du prototype
VI	Plan de commercialisation et test de marché	production pilote 	Design du système de production
VII	Mise en marché (application du plan)	pleine production	Implantation du système de production

tale). L'ordonnancement des facteurs démontre que les facteurs techniques sont hautement critiques pour le succès du processus d'innovation, car parmi les six facteurs les plus importants quatre sont d'ordre technique soit: le niveau de sophistication technique du projet (1er rang), la complexité du design (3ième rang), le faible niveau d'expérimentation (4ième rang) et un manque d'information technique (6ième rang) (voir tableau 4).

A l'étape du démarrage du processus, outre les analyses commerciales, ce sont les analyses technologiques fondées sur une perception globale des conditions techniques et économiques qui soutiennent la sélection des projets. Abordons brièvement, à titre d'exemple, l'importance de la pré-sélection.

La pré-sélection ou le tamisage des projets est la première opération de la sélection de projet. C'est à ce point de décision que l'unité de gestion engage pour la première fois des ressources significatives qui pourraient éventuellement aboutir au développement d'un nouveau produit. La décision résultant de l'étape du tamisage est soit un engagement initial pour une tentative de développement d'un nouveau produit ou le rejet sans équivoque de la proposition (Cooper, 1981). Ainsi, le tamisage est davantage une décision de rejeter certaines propositions plutôt qu'une décision d'accepter sans restrictions des projets. Par exemple, en moyenne sur l'ensemble des propositions de nouveaux produits qui ont passé avec succès l'étape du tamisage, seulement 2 propositions sur 13 sont actuellement commercialisées. La qualité essentielle d'un processus efficace de tamisage implique l'établissement d'un équilibre entre le rejet de projets de nouveaux produits voués à l'échec et de retenir, néanmoins, les opportunités viables destinées au succès (Albala, 1975).

Dans l'étape suivante, c'est-à-dire celle de la recherche et du développement, l'émergence de problèmes reliés à des facteurs techniques contribue à retarder la progression du projet et à augmenter l'incertitude technologique; ces problèmes

Tableau 4. Ordonnement des facteurs influençant l'innovation
(Rubenstein et al., 1974)

FACTEURS	TYPE	RANG
- Sophistication technique de l'innovation	Technique	1
- Support de la direction	Organisationnel	2
- Complexité du design	Technique	3
- Difficultés d'expérimentation	Technique	4
- Adaptabilité de l'innovation aux modes de fonctionnement de l'utilisateur	Production	5
- Absence d'information technique pertinente	Technique	6
- Niveau du risque financier	Financier	7
- Absence d'information sur le coût de la commercialisation	Commercial	8
- Absence d'information sur les caractéristiques du marché	Commercial	9.5
- Absence d'information sur le potentiel de vente	Commercial	9.5
- Niveau du coût de la commercialisation	Commercial	11
- Suprématie de la rentabilité à court terme sur la rentabilité à long terme	Commercial	12
- Carence en savoir-faire spécifique dans l'organisation	Organisationnel	13
- Normes de protection des consommateurs et de l'environnement	Institutionnel	14
- Niveau de confiance dans les prévisions et estimés internes	Financier	15
- Besoin d'une innovation collatérale	Technique	16
- Insuffisance des ressources financières et humaines allouées à l'innovation	Financier	17.5
- Absence d'échange d'information et d'analyse des idées et carence dans la diversification des sources d'information	Organisationnel	17.5
- Absence d'information sur les coûts du développement de l'innovation	Financier	19.5
- Faible probabilité d'un succès commercial	Commercial	19.5
- Incongruité de l'innovation avec les buts corporatifs	Commercial	21
- Absence d'information sur les coûts des équipements	Production	22
- Niveau de risque que des individus soient blâmés pour l'échec	Organisationnel	23
- Absence de support de la direction	Organisationnel	24
- Menace du pouvoir individuel dans l'organisation	Organisationnel	25
- Incertitude sur les comportements et arrangements institutionnels	Institutionnel	26
- Importance des effets de la substitution technologique	Production	27
- Protection inadéquate du système de brevet	Institutionnel	28
- Effet des lois antitrust sur la commercialisation	Institutionnel	29

techniques peuvent ainsi exercer une influence délétère sur la démarche d'évaluation et le développement des activités techniques du projet.

D'une manière générale, tenant compte de l'évolution du processus de R.D., on peut considérer qu'un projet de valorisation d'une biomasse spécifique est influencé par divers types de facteurs techniques. Ils sont généralement classés en facteurs internes et facteurs externes. Les facteurs internes sont définis comme étant les exigences intrinsèques des procédés de conversion. Ce sont des contraintes d'ordre technique imposées par la bonne marche du processus de bioconversion; on retrouve, par exemple, les conditions de température et de pH du milieu réactionnel, le prétraitement du substrat, le contenu en eau du produit avant le séchage, etc. Au contraire, les facteurs externes sont caractérisés par leur variété et par leur indépendance face au procédé de valorisation qui serait utilisé. Parmi ces facteurs on retrouve les intrants et les extrants d'un système de conversion, soit le substrat de départ et le produit, ainsi que les propriétés importantes liées à l'exploitation industrielle du procédé. A titre d'exemple, on peut citer: les caractéristiques physico-chimique du substrat et du produit, la fiabilité et le degré d'obsolescence du procédé, la constance de la qualité du produit ou de d'autres critères du marché, l'approvisionnement et le coût du substrat de départ, etc.

L'ensemble des facteurs internes et externes constitue l'ensemble des contraintes techniques et des conditions de réalisation propres à la faisabilité technologique d'un projet. Elles peuvent s'avérer déterminantes pour la réussite industrielle et commerciale du développement de ce projet, car la conjugaison de ces conditions et contraintes engendre les difficultés technologiques qui freineront ou feront avorter l'avancement du projet. L'effet inhibiteur de ces difficultés technologiques peut être de deux ordres. Premièrement, il peut être associé au besoin de développement de connaissances spécifiques ou à l'acquisition d'un savoir-faire; deuxièmement, le niveau de complexité du problème peut être tel que ce dernier s'avèrera insoluble à moins d'y affecter des ressources

humaines et un financement fort importants. Enfin, le surpassement des difficultés technologiques peut conduire à l'obtention d'un brevet ou à l'acquisition d'un domaine d'expertise unique, tandis que la recul devant ces problèmes conduit directement à l'abandon du projet.

Voyons un peu plus en détail comment les exigences du marché engendrent des paramètres d'innovation qui sont à leur tour porteurs de difficultés (d'incertitudes) technologiques.

1.3 PARAMÈTRES DE L'INNOVATION ET FAISABILITÉ TECHNOLOGIQUE

L'investisseur dans le développement d'une technologie ou d'un produit commercial, qu'il soit privé ou public, cherchera à maximiser le retour sur son investissement. L'investisseur privé, de façon générale, y verra un intérêt pécuniaire ou encore un positionnement stratégique par rapport auquel il établit un prix qu'il est prêt à consentir en termes de niveau de risque, de pertes ou de diminution du taux de rendement sur le capital investi. De son côté, l'investisseur public, qui peut certes être motivé par le rendement financier sur son investissement, cherche surtout à maximiser des retombées sous forme de mobilisation et d'orientation des investissements privés, de développement d'une infrastructure technico-industrielle, d'intégration socio-culturelle du processus d'innovation, d'avantages comparatifs régionaux, de diversification technologique, d'emplois scientifiques et techniques, de développement régional, etc. Fondamentalement, quelle que soit la nature de l'initiative technologique, la faisabilité commerciale et la faisabilité technologique à l'intérieur des paramètres de l'innovation imposés par les forces du marché constituent les éléments les plus critiques dans le cheminement décisionnel des investisseurs.

Les paramètres de l'innovation issus de la faisabilité commerciale établissent en quelque sorte le problème auquel s'attaquent les gestionnaires de la R.D., problème d'autant difficile à résoudre que subsiste, au moment des investissements, un niveau élevé

d'incertitude technologique. Voilà pourquoi l'investissement s'étale généralement sur une longue période (Tableau 3) et qu'il progresse en volume au fur et à mesure que s'estompe l'incertitude technologique, elle-même progressivement maîtrisée par les connaissances théoriques et empiriques issues du développement; on minimise ainsi les risques et on favorise l'affinage des paramètres de l'innovation et la compréhension de leur signification technologique.

Les paramètres de l'innovation technologique prennent plusieurs dimensions; les plus évidentes d'entre-elles correspondant au montant maximal de l'investissement et à la durée de l'effort de mise au point du produit ou de la technologie, chacun de ces paramètres étant plus ou moins déterminé par le contexte de l'innovation. L'un et l'autre de ces paramètres touchent directement le niveau d'incertitude technologique et le niveau de complexité, ces derniers établissant les exigences minimales de la quantité requise de travail de recherche, de design, de confection des équipements, d'essais, de mise au point, etc..., ces exigences se traduisant en dépenses et en délais de réalisation.

Outre ces deux constituants critiques de l'innovation, on retrouve les caractéristiques du produit ou de la technologie qui en assureront le succès commercial ou, selon le cas, le succès technologique, c'est-à-dire un apport important en connaissance et en technique susceptible d'engendrer des retombées scientifiques, sociales ou économiques. Au domaine de l'innovation destinée au succès commercial, ces paramètres définissent la fonction de l'innovation, ses caractéristiques et ses exigences en termes de performance, de morphologie, de niveau de complexité, de maîtrise (i.e. le contrôle, l'entretien, la fiabilité), de durabilité, de normes de sécurité, de conformité aux diverses législations, etc. Par exemple, bien qu'il soit difficile d'expliquer les raisons qui font un succès du produit de l'innovation, on admet que son design, ses caractéristiques, ses avantages comparés et les bénéfices spécifiques qu'il engendre sont des facteurs clés dont l'absence peut

expliquer l'échec de l'innovation sur son marché (Cooper, 1982), mais dont la présence interagit avec l'incertitude technologique comme le montre assez clairement le tableau 5.

Ainsi, la capacité d'engendrer un investissement et, par la suite, d'assurer le succès ou d'éviter l'échec, engendrent des incertitudes au niveau de la faisabilité technologique qui paradoxalement, doit être minimisée pour conduire effectivement à l'investissement et au succès commercial. Ce problème est généralement résolu dans l'évaluation de la faisabilité technologique en jugeant des capacités managériales et techniques du promoteur de la technologie: plus ces dernières sont jugées adéquates, plus on estime qu'il lui sera "facile" de surmonter les problèmes techniques et humains associés à l'incertitude technologique.

Cooper (1982), dans sa présentation du "Newprod screening model" (modèle de choix par tamisage de projets d'innovation industrielle), met en évidence plusieurs variables utilisées dans l'évaluation de projet que l'on peut relier à l'incertitude technologique dans la conduite des opérations de R.D. Un tel ensemble de variables peut éventuellement servir à établir les paramètres de l'innovation en autant que l'on considère qu'il s'agit là des paramètres qui assureront le succès (ou éviteront l'échec) commercial du produit de l'innovation. Ces paramètres de l'innovation qui apparaissent dans l'évaluation agissent sur l'incertitude technologique en l'augmentant par imposition de contraintes, ou en la diminuant par imposition gestionnelle de conditions propices à la solution des problèmes scientifiques, techniques et de design qui pourraient survenir dans les cours normaux du développement de la technologie ou du produit.

Le tableau 5 expose brièvement les conséquences sur l'incertitude technologique pouvant originer des paramètres de l'innovation imposés par les conditions susceptibles d'entraîner le succès commercial du produit. Notons que l'importance pondérée attribuée aux

Tableau 5. Analyse des variables d'évaluation de Cooper (1982) en relation avec l'incertitude technologique

Résumé des variables ¹	Importance pondérée 1-10	Relation avec l'incertitude technologique
1. Ressources financières	7.4	Volume et durée des opérations de R.D.
2. Savoir-faire en R.D.	7.9	Diminue l'incertitude au domaine de la maîtrise des processus
3. Savoir-faire en ingénierie	7.6	Diminue l'incertitude issue de l'organisation opérationnelle, du design, des essais, etc...
4. Savoir-faire managérial	7.3	Diminue l'incertitude issue des conflits dans les décisions opérationnelles, conceptuelles et évaluatives
5. Apport technologique ajouté	7.7	Ajoute à l'incertitude par l'intermédiaire de la complexification dans l'augmentation de l'utilité technologique
6. Complexité mécanique	8.8	Ajoute à l'incertitude par l'intermédiaire des caractéristiques de fiabilité, d'entretien etc..., ou par le biais de la réduction de la complexité mécanique.
7. Spécification du produit	5.3	Augmente ou réduit l'incertitude selon le niveau de développement des connaissances en relation avec les caractéristiques attendues du produit de l'innovation.
8. Nouveauté (marché, produit technologie, R.D., commercialisation...)	1-4	Augmente l'incertitude par l'intermédiaire d'une carence en connaissances empiriques spécifiques au produit de l'innovation.
9. Compétitivité, supériorité, avantages procurés en termes de réduction de coût et d'augmentation de productivité	8-10	Augmente l'incertitude par l'intermédiaire d'exigences minimales sur les caractéristiques du produit en termes de coûts et de performances
10. Homogénéité	6.2	Augmente l'incertitude en imposant des paramètres de design à des systèmes non spécifiquement conçus pour la nouvelle fonction qui leur est attribuée.
11. Réglementation	2.0	Augmente l'incertitude en imposant conditions externes d'opération et des caractéristiques perturbant l'intelligibilité technologique.
12. Compatibilité	N.A.	Augmente l'incertitude en imposant des normes de design qui interviennent dans le coût et la performance.

1. Ces variables ont été établies à partir d'un projet spécifique (mise au point d'un moteur A.C à vitesse variable contrôlée par électronique). Elles ne peuvent bien sûr être applicables directement au domaine de l'initiative technologique de valorisation de la biomasse, du moins pour l'importance à attribuer aux facteurs de pondération dans l'évaluation de projet.

divers facteurs dans le tamisage des projets pour fins d'investissement, (le plus important, pour l'exemple choisi, étant la supériorité commerciale du produit, et le moins important s'avérant être la réglementation), variera en fonction de la nature de l'innovation et des facteurs contextuels comme, par exemple, la réglementation environnementale qui pourrait s'avérer un facteur primordial dans le développement de biotechnologies de valorisation de la biomasse.

1.4 FAISABILITÉ TECHNOLOGIQUE ET MAÎTRISE DU PROCESSUS DE R.D.

Le survol de l'abondante littérature sur la gestion de la R.D., fort incomplet et malheureusement hors du contexte formel de la présente étude, ne nous a pas permis de vérifier à notre satisfaction l'intérêt de l'hypothèse évoquée précédemment et stipulant qu'au moment de l'investissement, la réduction de l'incertitude commerciale a primauté dans l'esprit de l'investisseur sur la réduction de l'incertitude technologique et qu'ainsi, les paramètres de l'innovation sont imposés au processus de R.D. par les contraintes du marché. En d'autres mots, cette hypothèse signifierait que les difficultés technologiques accompagnant l'évolution d'un processus d'innovation, et se posant comme problèmes de recherche et de développement, sont généralement sous-estimés au moment de décider du coût de la R.D. et du niveau de performance escompté du produit de l'innovation.

Les exemples de dépassement des coûts associés aux impondérables technologiques ne manquent pas, qu'il s'agisse de difficultés apparaissant au niveau du contrôle de la technologie ou de contraintes imposées par la réglementation environnementale (certains d'entre eux seront abordés respectivement aux chapitres 2 et 3 du présent rapport), ce qui tendrait à renforcer l'hypothèse que l'on accorde généralement moins d'importance que requis à l'analyse de l'incertitude technologique, ou encore, plus spécifiquement, que la formule traditionnelle d'évaluation de la faisabilité technologique par un comité de pairs conserve un caractère "d'a priori" qui la rend

insuffisante pour juger de la faisabilité technologique à l'intérieur des paramètres de l'innovation. D'ailleurs, au fur et à mesure que les connaissances théoriques et empiriques viennent réduire l'incertitude technologique, les paramètres de l'innovation touchant le domaine de la performance techno-commerciale peuvent être revus à la hausse, bien que généralement ils sont réajustés à la baisse (paramètres désirables ramenés aux paramètres essentiels), face aux problèmes techniques non prévus et à l'impossibilité de les résoudre adéquatement dans les délais de temps et dans les limites de budget imposés par l'analyse du marché de l'innovation.

Les éventuels réajustements peuvent diminuer considérablement la crédibilité des intervenants dans le processus de R.D., et ce d'autant plus qu'ils auront participé aux diverses étapes des décisions d'investissement en soutenant, pour diverses raisons, la faisabilité, les avantages comparatifs et le niveau d'avancement de la technologie. En effet, il appert aux observateurs que l'évaluation de la faisabilité technologique est davantage un processus politique et un affrontement entre groupes d'intérêt, qu'une démarche objective et sereine (Freeman, 1982), affrontement apportant des bénéfices pour les gagnants et des coûts d'opportunité pouvant être considérables pour les autres. Cette démarche est intrinsèque au système de sanctions et récompenses qui, aussi subtil soit-il dans les milieux scientifiques et technologiques, est généralement très efficace pour canaliser le comportement des intervenants dans la R.D., tout en n'étant pas exempt d'effets pervers indésirables dans le processus d'innovation. Par exemple, les travaux de Thomas (1970) que rapporte Martin (1984) ont mis en évidence que, malgré un système de partage des profits, les intervenants dans la R.D. ont tendance à sous-estimer les délais et les coûts et à surestimer le niveau de performance du produit de l'innovation¹; certains analystes associent une partie des causes de la chute du géant Rolls Royce qui suivit l'échec technologique du moteur RB211 aux préjugés

¹ Ceci est une interprétation des auteurs de la signification du concept "optimistic biasing".

optimistes qui accompagnèrent le développement de cette technologie. Martin (1984) rapporte d'autres études, relativement anciennes toutefois, qui démontrent l'importance des préjugés optimistes dans l'évaluation des difficultés associées au développement des technologies: dans son analyse d'une cinquantaine de projets d'innovation pharmacologique, Mansfield (1971) a évalué que les coûts réels étaient en moyenne 1.8 fois plus élevés que les coûts estimés et que les délais de mise au point étaient de 1.6 fois plus élevés que les délais planifiés. Ces travaux confirment les résultats de travaux antérieurs (Marshall et Meckling, 1962) qui, pour des projets de R.D. dans les domaines des équipements électriques, des procédés et des industries chimiques et biologiques, établissaient les dépassements de coûts moyens entre 1 et 1.5 et les dépassements de délais entre 1.39 et 3.04. Les prévisions optimistes des coûts et des délais de réalisation ne sont pas uniquement explicables par la compétition entre les tenants des diverses options technologiques opérant dans un système efficace de sanctions et de récompenses. Par exemple, certains auteurs, tels Thomas (1971) ou Norris (1971), évoquent des retards engendrés par des surcharges de travail et une surutilisation des équipements expérimentaux. De façon plus générale, cependant, hormis ces facteurs touchant l'acceptabilité d'un projet et la répartition des tâches et des équipements, il semble bien que l'on puisse attribuer à la nature même du processus de R.D. une part appréciable de l'incapacité de prévoir avec précision les difficultés organisationnelles, techniques, scientifiques et instrumentales qui surgiront à un moment ou l'autre de l'entreprise, sauf dans les cas où les difficultés deviennent intégrées à la routine de l'organisation de R.D. Enfin, chaque organisation de R.D. possède des caractéristiques structurelles et fonctionnelles qui engendreraient un mode de choix et de gestion des initiatives technologiques qui sont en eux-même porteurs des préjugés optimistes dans les prévisions des coûts et des délais, si cruciales pourtant au moment des investissements.

Bien que certains facteurs puissent expliquer qu'en l'absence de précision dans les prévisions, le préjugé optimiste rapportant aux promoteurs de la R.D. plus de bénéfices que les biais négatifs ou

qu'une neutralisation des biais dans les prévisions, ces derniers pouvant disqualifier une initiative technologique d'importance pour ses promoteurs, on ne peut ignorer le fait que le préjugé optimiste semble subsister même lorsque les risques financiers (et autres) sont partagés par ceux qui planifient et réalisent le développement. Ainsi, si on doit admettre qu'une vision optimiste du succès caractérise l'entrepreneur de la R.D., on doit aussi concevoir qu'une partie importante de cette difficulté d'appréciation est reliée à une mauvaise maîtrise du processus de R.D., une maîtrise parfaite se traduisant par une prévision quasi-parfaite des coûts et des délais exigés pour la réussite technologique. On peut évidemment expliquer un niveau imparfait de maîtrise par les nombreux impondérables que posent toute initiative nouvelle et par le volume et la diversité impressionnante des opérations rattachées au développement technologique, ces variables rendant illusoire et inefficace toute méthode de maîtrise coercitive du processus de R.D. On peut cependant formuler l'hypothèse que, si telle est la nature même du processus, l'approche managériale devrait pouvoir en tenir compte en maximisant la vitesse d'apprentissage organisationnel par l'implantation de conditions propices à la détection des difficultés et par l'opérationnalisation de mécanismes de soutien et d'intervention qui viendront favoriser leur aplanissement. Plusieurs méthodes administratives existent pour améliorer la maîtrise du processus: le PERT (évaluation et revue technique de programme), le CPM (méthode des cheminements critiques) et le VERT (évaluation et revue technique d'entreprise) sont des exemples bien connus mais qui demeurent insuffisamment utilisées (Martin, 1984).

Dans la suite de ce raisonnement, on peut poser qu'un choix économique optimal d'une initiative technologique, surtout lorsque les investissements sont importants, doit en partie reposer sur la crédibilité des promoteurs de l'initiative, particulièrement en ce qui a trait au réalisme des prévisions de coûts et de délais, crédibilité acquise au fil des succès technologiques auxquels ils ont été associés. Lorsque cette crédibilité n'est pas véritablement

acquise, comme ceci semble être le cas pour la majorité des initiatives, les moyennes de dépassement dans certains secteurs pouvant être largement supérieures à deux fois les prévisions de coûts et de délais, l'analyse de la faisabilité commerciale doit être complétée par une analyse de la faisabilité technologique à l'intérieur des paramètres économiques de l'innovation, ces derniers ayant d'ailleurs tendance à augmenter "ex ante" l'incertitude technologique. Or, comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, cet aspect de l'évaluation n'est pas véritablement pris en compte dans les analyses de pré-faisabilité et de faisabilité; le mode d'évaluation orienté vers la réduction de l'incertitude commerciale encourage les prévisions optimistes des promoteurs de l'initiative technologique et, paradoxalement, pourrait même défavoriser la maîtrise adéquate du processus de R.D. puisqu'il n'encourage pas la révélation des intérêts souvent divergents des intervenants dans le processus d'innovation, ou encore les nombreuses difficultés risquant de survenir dans les opérations de R.D.

Un cadre d'analyse de l'initiative technologique dans une perspective de planification et d'évaluation, proposé par Martel (1984) et basé sur les travaux de Monteith (1969), peut répondre partiellement à ces préoccupations. Ce cadre comporte 7 constituants; nous l'avons modifié et enrichi par des éléments d'analyse stratégique. Nous obtenons ainsi la grille de planification suivante:

1. un exercice de définition du projet, incluant les paramètres économiques et commerciaux de l'innovation, l'approfondissement du concept et de son intelligibilité technologique;
2. l'identification des opérations et des tâches leur étant reliées, suivant le respect du principe de "l'unité" de l'opération et des tâches associées, c'est-à-dire en recherchant les questions unificatrices, les difficultés scientifiques et technologiques critiques ainsi que l'essentiel du savoir-faire et de la connaissance; l'analyse des relations entre ces divers constituants unitaires du processus de R.D.;

3. le choix des schémas d'action correspondant aux tâches à accomplir et l'analyse des problèmes techniques, logistiques, organisationnels et administratifs susceptibles de survenir au cours de la réalisation;
4. l'analyse des diverses options de solution de problèmes tant sur le plan de leurs avantages comparatifs que sur le rôle dans le maintien de la cohérence de l'ensemble du processus de R.D.;
5. le choix des meilleures options de solution tenant compte des coûts, des délais, de la cohérence de l'ensemble et des paramètres de l'innovation; le choix de solutions alternatives pouvant s'imposer comme second meilleur choix dans l'éventualité d'un échec dans l'application de la première option de solution; l'analyse du risque d'échec en termes de faisabilité technologique (coûts, délais, paramètres économiques et commerciaux de l'innovation);
6. l'élaboration du plan directeur de l'ensemble du processus d'innovation suivant les principes qui conduisent au succès technologique (conditions propices, connaissance des problèmes critiques et des niveaux de difficultés associés à leur solution, connaissance de l'environnement de développement de la technologie, etc...);
7. le développement d'une stratégie d'intervention permettant de rectifier la cohérence des opérations pour tout changement introduit au cours de la phase opérationnelle.

Voyons, dans les chapitres suivants, quelques exemples de difficultés pouvant interagir avec la conduite des opérations de R.D. et ainsi influencer sur le succès technologique ou engendrer des conditions propices à l'échec.

CHAPITRE 2

LES GRANDS DOMAINES DE DIFFICULTÉS TECHNOLOGIQUES DE LA VALORISATION INDUSTRIELLE DE LA BIOMASSE

2. LES GRANDS DOMAINES DE DIFFICULTÉS TECHNOLOGIQUES DE LA VALORISATION INDUSTRIELLE DE LA BIOMASSE

Le développement du présent chapitre repose sur l'élément de problématique suivant:

"Est-il possible de définir et de caractériser les grands domaines de difficultés technologiques auxquels le Centre Québécois de la Valorisation de la Biomasse est confronté lors de la réalisation de son mandat?"

L'élaboration d'une réponse à cette question nous enseignera comment les difficultés technologiques peuvent influencer le déroulement des opérations de R.D. et compromettre la faisabilité technologique d'un projet. A cette fin, dans un premier temps, un modèle conceptuel d'un procédé quelconque de bioconversion sera proposé dans le but de définir les caractéristiques générales des difficultés technologiques. Puis, dans le développement subséquent du chapitre nous présenterons un exemple typique de l'implication des difficultés technologiques sur le développement et la mise à l'échelle d'un procédé de bioconversion du méthanol en protéines d'organismes unicellulaires. Ensuite, on procèdera à l'identification des grands domaines de difficultés technologiques à l'intérieur du champs d'action du CQVB et finalement nous examinerons les différentes conséquences environnementales de l'exploitation industrielle des innovations de la biotechnologie.

2.1 CARACTÉRISATION GÉNÉRALE DES CONTRAINTES QUI DÉTERMINENT LA FAISABILITÉ TECHNOLOGIQUE

Le chapitre précédent nous présente une analyse touchant la gestion du processus de l'innovation technologique. On y retrouve une description du contexte difficile dans lequel se déroule le processus de l'innovation. Il met aussi en évidence les différents problèmes de choix qui doivent être surmontés afin d'en arriver au

succès technologique ainsi que les paramètres de l'innovation qui déterminent la faisabilité technologique d'un projet. Cette approche nous a permis d'obtenir une perception globale du cadre où doit s'exercer la gestion du processus de l'innovation. En effet, cette première analyse nous a permis de positionner l'importance relative de la faisabilité commerciale et de la faisabilité technologique à l'intérieur du processus de l'innovation technologique sans pour autant révéler les facteurs pouvant contribuer à la maîtrise de l'incertitude technologique d'un projet. Les difficultés technologiques étant susceptibles de compromettre la progression d'un projet, leur identification et leur caractérisation sont des éléments de connaissance qui contribueraient beaucoup à la compréhension de leurs interactions avec le processus de l'innovation technologique.

L'approche choisie dans cette section pour réaliser la caractérisation des difficultés technologiques qui se manifestent au cours de tout processus d'innovation consiste à élaborer un modèle conceptuel qui tente de décrire les interactions qui influencent le développement d'un projet. Le modèle proposé est illustré à la figure 2 et il consiste en une schématisation du processus de l'innovation technologique analogue au modèle de Cooper (1982; voir tableau 3) dont certaines phases sont regroupées. Au coeur de ce processus évolutif se trouve l'objet des travaux de développement, le système procédé. Les éléments qui composent le système procédé sont le procédé de transformation en soi, ses intrants et extrants, le ou les substrats, le(s) produit(s) de haute valeur ajoutée et leur(s) résidu(s). Dans le cadre de cette étude on considère que c'est l'ensemble système procédé qui suit le processus de l'innovation car le bien qui peut être lancé sur le marché peut être tout aussi bien le produit issu du procédé de transformation que le système procédé lui-même.

Le passage d'une découverte technologique à une réussite du développement technologique passe par l'étape de la mise à

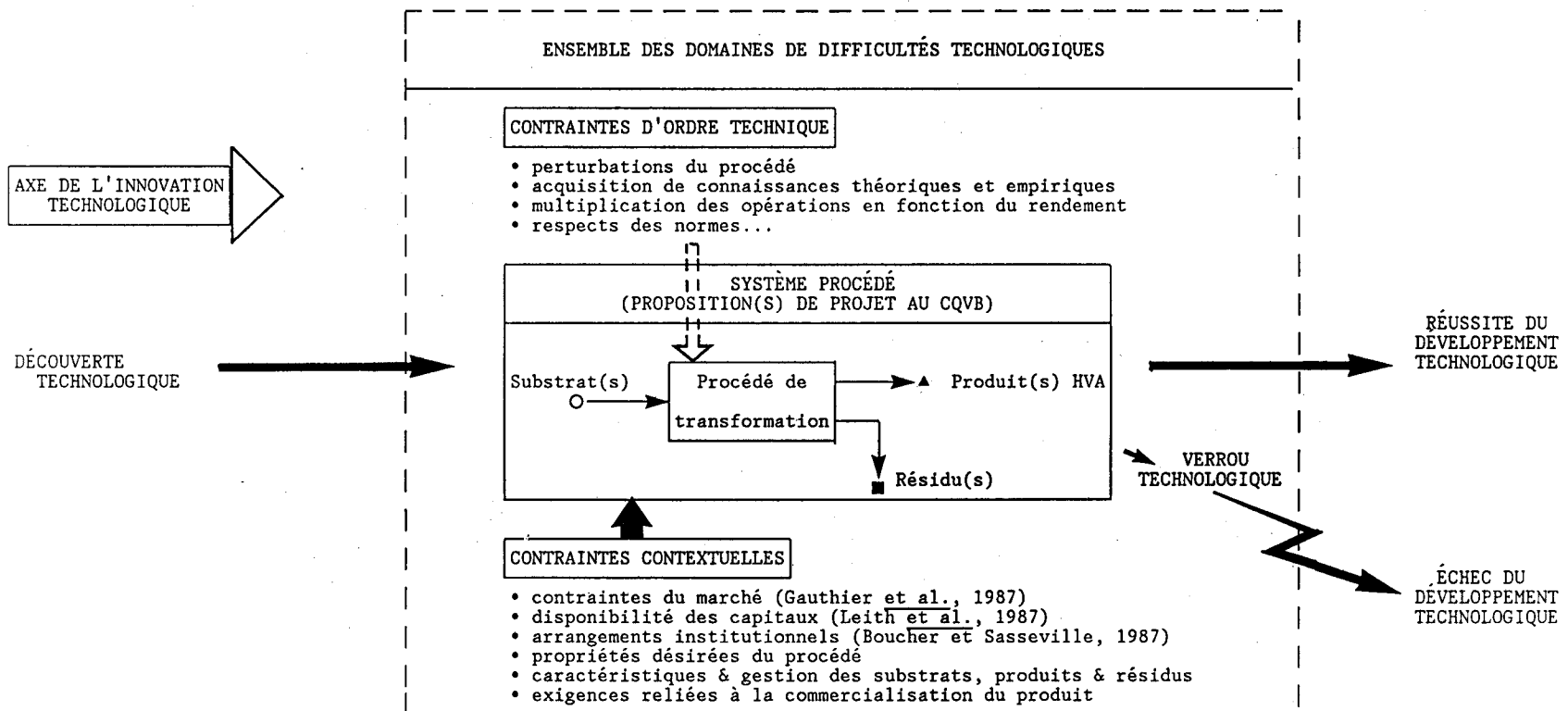
Figure 2: Modèle conceptuel proposé pour la caractérisation des difficultés technologiques se manifestant au cours du développement d'un procédé.

PHASE DU PROCESSUS
(MODELE DE COOPER, 1982)

RECHERCHES DE LABORATOIRE
(I, II)

MISE À L'ÉCHELLE
(III, IV, V, VI)

SYSTÈME DE PRODUCTION
(VII)



l'échelle. C'est tout particulièrement au cours de cette longue étape que se manifeste un ensemble de difficultés technologiques qui détermineront le développement du projet. On peut distinguer deux grandes catégories de difficultés technologiques en fonction de la nature de l'objet sur lequel elles s'exercent. En effet, les difficultés technologiques sont le produit de la conjonction de facteurs internes et externes au procédé. Les facteurs internes sont des contraintes d'ordre technique qui sont spécifiques au développement et à l'exploitation du procédé. Les facteurs externes constituent un ensemble de contraintes contextuelles découlant (1) des besoins du système procédé afin qu'il fonctionne de manière satisfaisante et (2) de l'insertion éventuelle de celui-ci dans la dynamique de notre société de production. Par conséquent, on peut affirmer que les contraintes d'ordre technique se rapportent uniquement au procédé de transformation alors que les contraintes contextuelles sont propres à l'ensemble du système procédé.

On voit ainsi que d'une manière générale, la conjugaison des contraintes contextuelles et d'ordre technique engendre un ensemble de difficultés technologiques qui rend plus difficile le développement d'un projet. Lorsque ces difficultés technologiques sont surmontées, on atteint le succès du développement. Cependant lorsqu'une ou plusieurs difficultés technologiques mènent le projet à un échec du développement malgré un certain investissement en ressources financières et humaines on est alors en présence d'un contexte de verrou technologique. La levée d'un verrou technologique peut nécessiter des ressources très importantes et une révision en profondeur de l'approche employée pour développer un projet.

Considérant que pour chacun des éléments constitutifs du système procédé on peut identifier des contraintes contextuelles, il est intéressant de noter qu'il est possible d'établir, pour la révélation de ce type de contraintes, des liens entre le présent rapport et les autres rapports de cette étude. En effet, parmi les con-

traintes contextuelles on retrouve: des contraintes provenant des exigences du marché, comme certaines caractéristiques du substrat et du produit (volume, localisation, saisonnalité), leurs coûts, l'approvisionnement, leur transport et entreposage, etc. (Gauthier et al., 1987); la disponibilité des capitaux lors de l'étape constitutive du processus de RD (Leith et al., 1987); les arrangements institutionnels caractérisant ce secteur d'activités (Boucher et Sasseville, 1987). D'autres difficultés technologiques appartenant aux contraintes contextuelles sont engendrées par la nécessité d'obtenir certaines propriétés caractérisant le procédé, comme, par exemple: une bonne efficacité, un niveau de fiabilité satisfaisant, une stabilité du processus, l'assujettissement facile à une procédure de contrôle automatique, le niveau d'obsolescence de la technologie, la simplicité du procédé, la minimisation des risques inhérents à l'opération, etc. De plus, à l'intérieur de cette catégorie de contraintes on peut désigner d'autres caractéristiques des intrants et des extrants au procédé de transformation comme: leur qualité physico-chimique et microbiologique, leur toxicité intrinsèque pouvant perturber soit le procédé ou l'environnement, la production incontrôlable d'un sous-produit indésirable, la facilité à manipuler les stocks et à éliminer les résidus, les exigences particulières liées à la commercialisation du produit (forme, couleur, critères organoleptiques, palatabilité), etc. Enfin, on peut compter parmi les contraintes contextuelles une gamme de facteurs plus ou moins reliés à l'aspect technique du projet comme certains critères techno-économiques (retour sur l'investissement, ouverture de nouveaux marchés, ...), la création d'emplois, les avantages fiscaux, le prestige de l'organisation, une réglementation cohérente du secteur par les divers paliers de gouvernements, etc. Globalement, nous estimons que les contraintes contextuelles sont produites par les interactions entre le système procédé en voie de développement et les différentes dimensions de l'insertion du procédé dans notre société.

L'émergence de contraintes d'ordre technique se présente au cours du développement ou de la maîtrise du procédé de transformation. Ces difficultés technologiques peuvent surgir à chacune des opérations du procédé. La caractérisation des contraintes d'ordre technique s'effectue en considérant leurs différentes origines. Elles peuvent être liées à l'acquisition de certaines connaissances générées par l'exploitation industrielle du procédé, aux conditions d'opération issues du respect de normes gouvernementales, aux pressions de l'opinion publique dictées par les firmes concurrentes ou les critères du marché, etc. Effectuons un survol de ces diverses possibilités.

La première catégorie de contraintes techniques d'importance repose sur la satisfaction des besoins en connaissances empiriques et théoriques indispensables à la constitution d'un savoir-faire capable de mener avec succès le développement technologique du projet. Dans le cas où le promoteur du projet désire employer sous licence une technologie déjà développée, c'est la proximité et la proportion d'expertise disponible qui pourra limiter le développement du savoir-faire du promoteur. D'autre part, lorsque les connaissances sont détenues par les milieux académiques, on doit évaluer l'applicabilité de celles-ci et l'ampleur de l'investigation du champs de connaissances. C'est la qualité du lien entre le chercheur et l'utilisateur qui déterminera l'efficacité du transfert d'informations. Cependant lorsque les connaissances disponibles sont inadéquates ou qu'elles ne sont pas acquises, l'initiation du projet passe par le développement de ces connaissances. Cette recherche peut toucher alors différents niveaux de technologie, que ce soit la conception d'un nouveau type de bioréacteur (haute technologie) ou d'une nouvelle pièce d'équipement comme une pompe ou une valve (technologie usuelle).

Un autre type de contrainte technique consiste en la multiplication des opérations du procédé de transformation. En effet, l'exploitation à grande échelle d'un procédé de biotransformation peut impli-

quer l'utilisation de nouvelles opérations en amont ou en aval qui n'étaient pas indispensables à plus petite échelle. À titre d'exemple, on peut souligner la nécessité de stériliser le substrat, de recycler le milieu de culture, de maximiser la séparation et la récupération du produit à haute valeur ajoutée, de traiter les résidus de l'exploitation, etc. La présence de ces opérations supplémentaires peut engendrer des pertes significatives dans le rendement total du procédé, augmenter la complexité du design et gonfler les coûts d'investissement.

Dans un autre ordre d'idées, les contraintes peuvent provenir directement de l'utilisation de certains réactifs ou des conditions de réaction nécessaires au processus de transformation. En effet, le respect de certaines contraintes associées à des normes de sécurité influence la conception du réacteur, la manipulation des réactifs nocifs ou des résidus, des procédures opérationnelles du procédé, etc. Parmi les dangers potentiels on peut souligner: les explosions, les émissions toxiques, les décharges accidentelles de polluants. Conséquemment à la constitution de la séquence d'opérations du processus il faut s'assurer de sa maîtrise dans une multitude de situations. Donc, il est nécessaire d'établir une procédure pour l'opération du système procédé dans une situation de production normale ou d'une situation d'urgence. De plus, la connaissance du comportement du procédé est essentielle au développement de mesures de contrôle visant à minimiser l'impact de perturbations induites par des variations des conditions du milieu réactionnel, la mauvaise qualité des substrats ou des produits tant chimiques que microbiologiques e.g. la contamination des souches du bioréacteur par des espèces exogènes ou des toxines d'origine biologique. Enfin, certaines contraintes techniques dictées par les exigences de la commercialisation peuvent influencer: 1- les méthodes ou les opérations de finition du produit, e.g. le consommateur préfère une poudre d'une blancheur immaculée et facilement émulsifiable plutôt qu'un solide granulaire et jaunâtre; 2- les matériaux ou les formats d'emballage pour améliorer les

propriétés de conservation du produit ou pour lancer un produit dont le format est comparable à un concurrent; 3- les opérations d'entreposage et de distribution du produit.

Pour conclure ce point, rappelons qu'il existe encore d'autres types de contraintes techniques. On ne citera ici que les contraintes liées au respect des normes environnementales ou de santé publique (émission d'odeurs, charge polluante rejetée dans le milieu aquatique ou dans l'atmosphère) et les problèmes associés aux variations incontrôlables des caractéristiques des organismes biologiques employés dans un bioréacteur.

Dans le cadre de la prochaine section nous allons présenter un exemple de mise à l'échelle d'un procédé de biotransformation qui s'est avéré particulièrement laborieux mais néanmoins couronné de succès. Le sujet de cet exemple sera analysé par le biais du modèle conceptuel que nous venons de décrire afin de vérifier son niveau d'opportunité.

2.2 EXEMPLE DE LA MISE À L'ÉCHELLE D'UN PROCÉDÉ DE BIOTRANSFORMATION

En se basant sur le modèle conceptuel proposé à la section précédente, cette section consiste à analyser le développement d'un procédé de production de protéines d'organismes unicellulaires (POU) par la compagnie britannique IMPERIAL CHEMICAL INDUSTRIES (ICI). La description de cette démarche de mise à l'échelle nous révélera certains écueils technologiques bien dissimulés auxquels ICI s'est heurté et quelles approches cette compagnie a adoptées afin de résoudre ses problèmes. En effet, par l'entremise de cette présentation nous démontrerons comment ils ont procédé à partir d'une culture de laboratoire de microorganismes jusqu'à la construction du procédé de culture industrielle le plus gigantesque au monde.

Tout d'abord, effectuons un bref rappel historique qui donnera un aperçu du contexte dans lequel ICI mit de l'avant ce projet. Au début des années 1960, on fit la découverte de gisements importants de gaz naturel au sud de la Mer du Nord. En 1966, ICI invente un procédé à basse pression pour la conversion à grand rendement du méthane en méthanol. ICI constuisit alors à Billingham, au nord de l'Angleterre, des usines de conversion et elle signa un contrat à long terme d'approvisionnement en gaz naturel. La compagnie cherchait cependant un autre débouché pour valoriser plus efficacement le méthane et, s'appuyant sur son expertise dans le secteur agrochimique, jugea que la substitution des substrats de base pour la fabrication de moulée animale était envisageable et économique à long terme. En effet, à cette même époque s'effectua la publication de travaux scientifiques sur l'isolation et la croissance de microorganismes assimilant du méthane. Or, ICI jouissait de bonnes relations avec les centres de recherche académique. C'est ainsi qu'en 1968 naissait le projet de conversion du méthane en protéines d'organismes unicellulaires pour la fabrication d'une moulée animale, le PRUTEEN.

L'analyse de ce contexte nous permet de mettre en évidence quatre éléments majeurs qui déterminent la justification économique de l'avant-projet de la compagnie ICI pour la production industrielle de POU. Il s'agit:

- 1- d'une participation importante de la compagnie ICI dans le secteur agrochimique;
- 2- de la disponibilité d'une grande source de méthane à bon marché;
- 3- de paramètres économiques favorables à la substitution des substrats de base à la fabrication de moulée animale;
- 4- de la découverte de microorganismes consommant du méthane.

Afin de présenter de manière synthétique cette étude de cas publié par P. Senior (1986) nous schématisons les 6 grandes étapes du

déroulement général du développement du projet d'ICI (voir figure 3). À chaque étape de la progression du projet, on mentionne les éléments caractéristiques de l'étape et, pour les étapes 2, 3, 4 et 5, on réfère à un tableau pour une description plus approfondie des difficultés technologiques rencontrées au cours de la réalisation de celle-ci. L'examen du déroulement général de l'élaboration du projet semble, à prime abord, ne pas être ponctué de nombreuses difficultés technologiques mais la lecture des tableaux en référence nous convainc rapidement du contraire (tableaux 6 à 9). Lorsque c'était nécessaire, nous avons clairement séparé les contraintes d'ordre technique des contraintes contextuelles qui engendraient les différentes difficultés technologiques se manifestant lors d'une étape particulière.

L'application du modèle conceptuel que nous avons développé précédemment dans ce travail s'effectue aisément. Parmi l'ensemble des difficultés technologiques rencontrées durant le développement du projet, il nous a été facile d'identifier à chacune des étapes les contraintes d'ordre technique et les contraintes contextuelles. Un fait important à souligner est la mise en évidence d'une situation de verrou technologique au cours des travaux sur les unités de développement du procédé (voir tableau 7). Cette situation est liée à la sélection du méthane comme substrat pour la croissance d'une souche de microorganisme dans un procédé de fermentation industrielle. Cependant, la compagnie ICI s'est assuré le succès de son entreprise de développement technologique en modifiant son approche par la substitution du substrat de départ. Cette décision a bouleversé en profondeur la conception technique du projet mais elle a permis l'accomplissement du processus d'innovation technologique. L'application du modèle conceptuel s'avère concluante pour la caractérisation des facteurs constituant l'ensemble des difficultés technologiques qui compromettent le déroulement d'un projet. De plus, la représentation par le modèle des interactions entre les difficultés technologiques et le processus de l'innovation technologique paraît juste et satisfaisante.

Figure 3: Déroulement général du développement du projet d'ICI

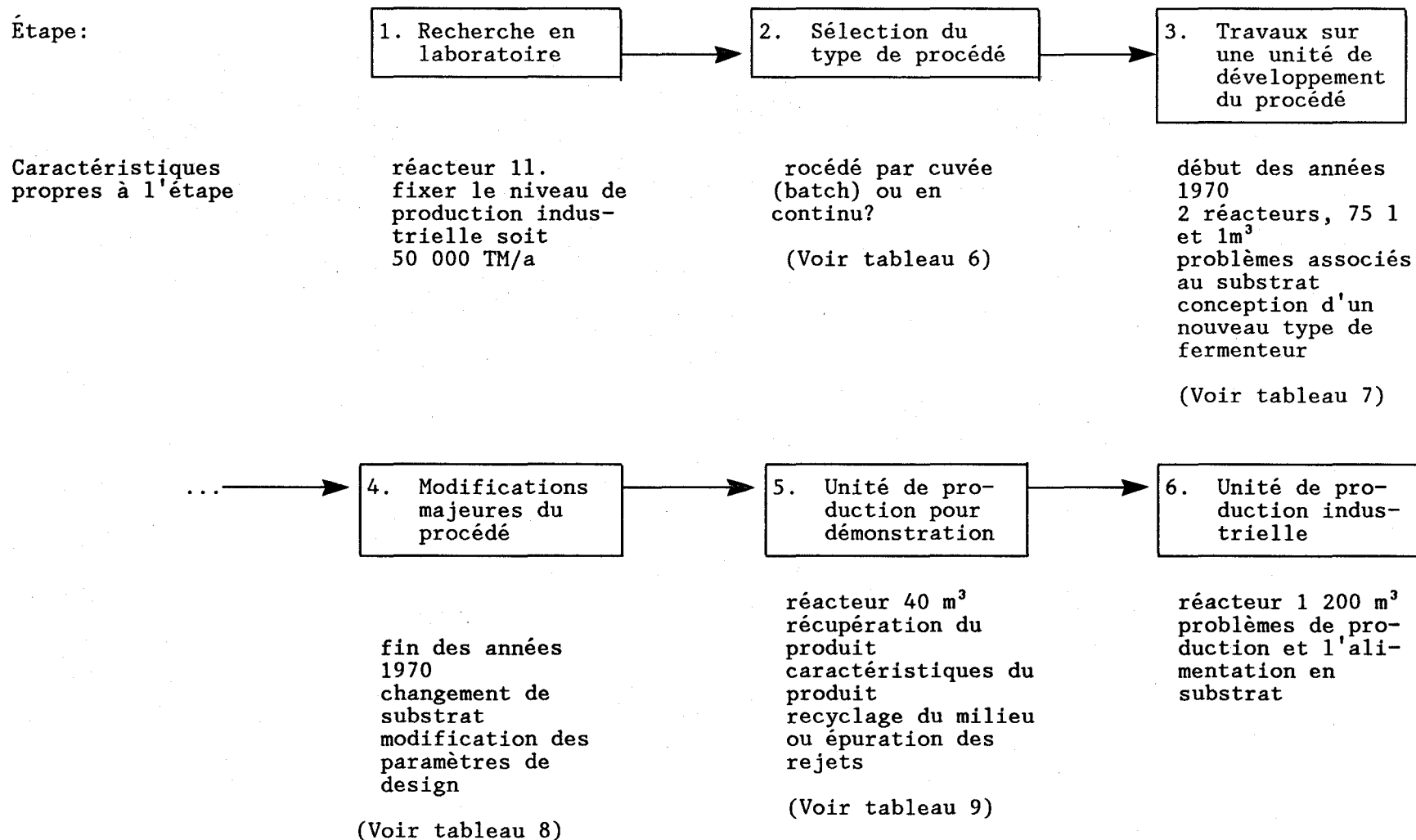


Tableau 6: Paramètres ou problèmes techniques associés aux différents types de procédé (étape 2).

PROCÉDÉ PAR CUVÉE

Pour atteindre le niveau de production annuelle de 50 000 TM/a, ce type de procédé nécessite:

- . 90 réacteurs de 250 m³, soit une capacité totale de 22.5 x 10⁶l;
- . que chaque unité ait un temps de séjour de 4 jours pour une période effective de 300 J/a;
- . que concentration cible de produit par cuvée sont de 30 g/l (en biomasse sèche);
- . 90 moteurs Rolls Royce Olympus (développés pour l'avion Concorde) tournant à plein régime.

Procédé rejeté en raison de ces paramètres économiques inacceptables.

PROCÉDÉ EN CONTINU

Le matériel employé généralement pour construire un fermenteur est l'acier inoxydable, la production annuelle (du Royaume-Uni) est à peine suffisante & le coût est très élevé.

ICI ne possède pas d'expertise dans la conception & le développement d'un fermenteur géant en continu*.

Le méthane (CH₄) en présence de vapeur d'eau et d'air est un mélange pouvant exploser, les équipements requis doivent être à l'épreuve d'explosions & nécessite des mesures de sécurité très sévères.

Le maintien d'une monoculture (pure) est difficile.

La faible solubilité du CH₄ dans l'eau implique une faible consommation et une faible production de biomasse.

Il manque des données de base pour les bilans de masse et de chaleur nécessaires à la conception d'un réacteur.

Procédé choisi pour le processus de fermentation.

* la seule contrainte contextuelle rencontrée à cette étape du développement.

Tableau 7: Difficultés technologiques accompagnant les travaux sur l'unité de développement du procédé (étape 3)

Contraintes d'ordre technique

Utilisation d'un réacteur (75 l ou 1m³) à l'épreuve des explosions dans un bunker isolé.

L'utilisation du méthane comme substrat entraîne des pertes de rendement total (jusqu'à 40% de conversion), des pertes de chaleur importantes, une baisse d'efficacité de l'oxygène.

Absence de certaines données indispensables au design d'un nouveau réacteur.

Besoin de produire des quantités suffisantes de biomasse pour effectuer des tests de qualité pour fins de nutrition animale et pour établir la toxicité du produit.

Nécessité de développer un nouveau type de fermenteur en acier doux, sans pièces mobiles et maintenant des conditions de monosepsie.

PARTICULARITÉ

L'utilisation du méthane comme source de carbone pour la croissance de microorganismes est une approche vouée à l'échec. Ici était en présence d'un verrou technologique qui a piégé longtemps ses promoteurs. En effet, le métabolisme de l'utilisation du CH₄ est complexe et requiert de l'énergie (ce qu'ignorait ICI). L'oxydation du méthane en méthanol nécessite entre autre la participation d'un agent réducteur qui est lui-même généré à partir du pool de méthanol, il en résulte donc une perte de rendement importante dans la conversion du CH₄ en carbone cellulaire.

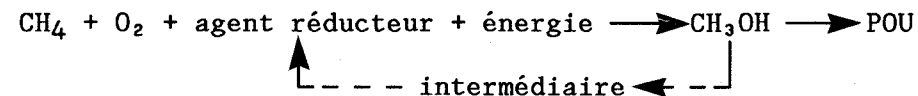


Tableau 8: Difficultés technologiques associées aux modifications majeures du procédé (étape 4)

Contraintes d'ordre technique

Substitution du méthanol (CH_3OH) au méthane comme substrat de départ: substrat soluble, facilement stérilisable, favorisant une très bonne production de biomasse avec un taux maximal de conversion de 68%.

Cette substitution nécessite la sélection de nouvelles souches d'organismes méthylotrophiques qui sont plus faciles à faire croître (en terme de mesure de contrôle).

Les pertes de chaleur et les besoins en oxygène dans le réacteur sont aussi diminués.

Définir l'opération à effectuer pour récupérer le produit et sélectionner la configuration idéale du fermenteur pour atteindre un niveau de rendement de 30 g/l de biomasse sèche.

Tableau 9: Difficultés technologiques éprouvées lors des travaux avec l'unité de démonstration (étape 5)

Contraintes d'ordre technique

Utilisation du fermenteur développé par ICI (le "air lift pressure cycle fermenter" (PCF) qui utilise un flux d'air ascendant).

Le fermenteur nécessite la création de nouveaux systèmes de valves pour assurer les conditions d'asepsie et l'utilisation de plusieurs détecteurs pour obtenir un bon contrôle du procédé.

L'opération du fermenteur impliquerait le rejet de 153 TM/h de milieu de culture ayant une très forte DBO et DCO, ce qui décuplerait les coûts des installations d'épuration; donc, il est impératif de recycler le milieu de culture.

Nécessité de développer un système de récupération des cellules de microorganismes par une acidification et un choc thermique, suivi d'une opération de flottation. Cependant, on constate que:

- i) le rendement de la récupération est fonction de la condition physiologique de la culture;
- ii) il y a une perte de protéines solubles à l'acide dans la fraction liquide: ceci force le recyclage de cette fraction, sa stérilisation et par le fait même, l'agrandissement de la section stérile de l'usine.

Pour éviter la corrosion de l'acier inoxydable, on bannit les chlorures du milieu de culture, on n'utilise pas HCl mais H_2SO_4 ou H_3PO_4 pour abaisser le pH. Cependant, les besoins nutritifs en S et P doivent être ajustés dans le liquide recyclé sur une base horaire: après plusieurs cycles, l'augmentation de la capacité tampon du milieu entraîne l'augmentation du besoin en NH_3 pour contrôler le pH.

De fortes concentrations en PO_4 et SO_4 favorisent la production par les microorganismes de polysaccharides extracellulaires qui:

- i) diluent la concentration en protéines du produit;
- ii) occasionne un brunissement (réaction de Maillard) du produit lors du séchage.

La présence de protéines solubles dans le milieu liquide stabilise la surface des petites bulles de gaz dans le fermenteur, ce qui contribue à la prolifération des bulles et favorise le développement de la capacité tampon et la production de polysaccharides extracellulaires.

Contraintes contextuelles

Selon les études toxicologiques, l'incorporation de 25% de PRUTEEN (POU) à la diète du poulet -- un marché cible important pour ICI -- engendre uniquement chez cette espèce 50% de mortalité par la goutte; la cause des décès est reliée en une déficience de cette diète en NaCl (cf. bannissement des chlorures).

PRUTEEN doit être déficient en fer pour alimenter les veaux car les consommateurs européens désirent une viande rosée, et non rouge. Mais lorsque la culture en croissance est déficiente, elle développe une coloration d'un vert brillant: le contrôle de la concentration de fer devient donc très difficile car le créneau de concentrations est très restreint.

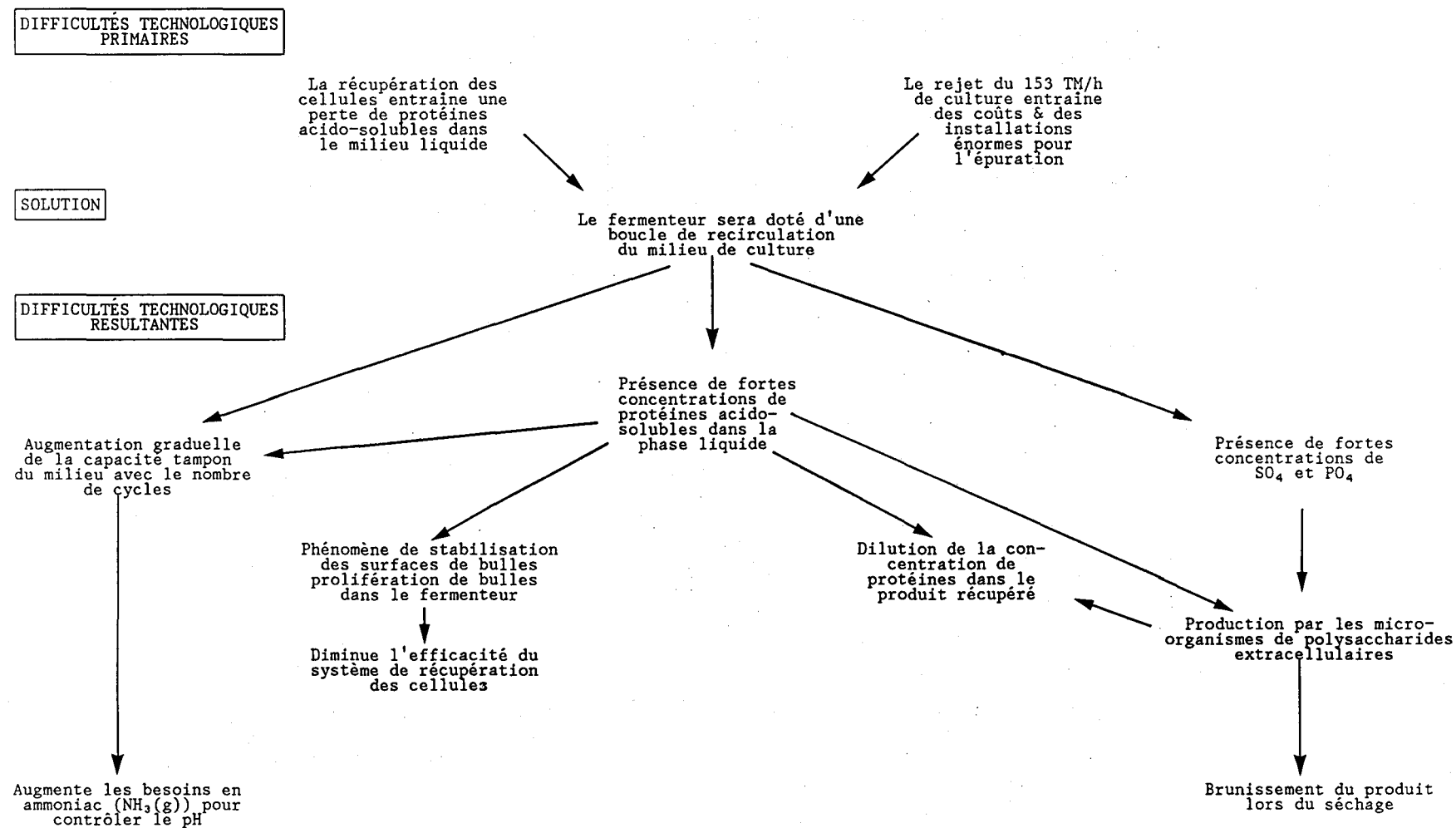
La production de polysaccharides extracellulaires par les microorganismes occasionne un brunissement du produit lors du séchage ce qui est néfaste à l'apparence du produit et à l'équilibre de la diète en entraînant une déficience en un acide aminé, la lysine.

Lorsqu'on analyse en profondeur la séquence d'apparition des difficultés technologiques, on remarque un patron caractéristique dans l'évolution temporelle du niveau d'importance des problèmes. En effet, à un moment donné ($t=0$) il existe un problème crucial pour le développement du procédé et quelques problèmes d'ordre secondaire ou même négligeables. Cependant, après la résolution du problème majeur à un moment ultérieur ($t=1$), on constate que c'est un des problèmes que l'on considéreraient mineurs que devient le nouveau problème critique; de même, on voit poindre de nouveaux problèmes d'ordre secondaire. Par conséquent, il est évident qu'il existe une certaine interdépendance entre les problèmes techniques qu'on peut observer et un effet de cascade dans l'apparition de ceux-ci. Afin d'illustrer cette dernière affirmation, un exemple a été construit à partir du projet d'ICI pour illustrer les conséquences de la résolution d'une première difficulté. C'est la figure 4 qui présente cet exemple où deux contraintes techniques (la perte de protéines acido-solubles et l'augmentation des coûts d'épuration) sont levées par la recirculation du milieu de culture: ceci engendre toutefois une cascade de plusieurs nouveaux problèmes.

Nous sommes conscients qu'une présentation synthétique de ce projet de mise à l'échelle pourrait créer chez le lecteur une perception restreinte des efforts titanesques générés par la compagnie ICI pour traverser le processus d'innovation technologique et s'assurer du même coup le succès technique et commercial du projet. Afin de bien situer ces efforts, voici les éléments qu'ICI a dû réunir pour y parvenir:

- formuler la volonté de produire 50 000 tonnes métriques/année de protéines d'organismes unicellulaires pour l'alimentation animale;

Figure 4: L'interdépendance et l'apparition en cascades de nouvelles difficultés technologiques suite à la résolution d'une première difficulté



- dépenser \$200 millions pour réaliser le projet;
- employer une armée de spécialistes (biochimistes, microbiologistes, technologues en fermentation, économistes, ingénieurs chimistes, concepteurs, mathématiciens, toxicologistes, métallurgistes, sondeurs de marché, gérants de projet...);
- construire le plus gros fermenteur à processus continu au monde, contenant 1 200 m³ d'une culture qui consomme 14 tonnes métriques/heure de méthanol;
- coordonner tous ces efforts le plus efficacement possible.

En guise de conclusion à cette étude de cas, on doit souligner que toute approche de mise à l'échelle d'un processus de biotransformation se doit d'être multidisciplinaire et fortement interactive. La conception du procédé doit correspondre aux paramètres économiques et aux caractéristiques du produit. C'est l'obtention d'un produit spécifique qui gouverne l'élaboration du procédé en vertu de la technologie disponible. Cependant, la leçon la plus importante que l'on peut retirer de cet exemple de mise à l'échelle est que les spécialistes, plus particulièrement les biologistes et les ingénieurs, qui sont responsables d'un tel projet se doivent d'échanger activement et de se comprendre mutuellement. En effet, l'omniprésence de problèmes majeurs masque généralement les conséquences des problèmes mineurs, qui à un moment donné deviendront eux-mêmes critiques. Par exemple, ce qui semble être, à prime abord, un problème de génie chimique peut parfois prendre sa source dans une particularité des voies métaboliques d'un organisme propre à la biochimie fondamentale. La situation inverse est aussi possible.

Devant le défi de la mise à l'échelle, quelle approche doit-on utiliser afin d'anticiper les embûches de la création de nouveaux produits ou de nouveaux procédés? Cette question est encore très

difficile à répondre; en effet, comme le dit si bien Senior 1986:

"... Certainly the experience proves that hindsight is an exact science and that foresight is an elusive commodity ...".

2.3 LES GRANDS DOMAINES DE DIFFICULTÉS TECHNOLOGIQUES PROPRES À LA VALORISATION DE LA BIOMASSE

L'illustration d'une tentative de mise à l'échelle d'un procédé de fermentation à la section précédente nous a révélé la nature multidisciplinaire des difficultés technologiques rencontrées au cours de l'élaboration du projet. De plus considérant l'envergure du champs d'action du CQVB, c'est-à-dire la valorisation industrielle des biomasses, nous assumerons donc, qu'il existe une grande gamme de difficultés technologiques pouvant potentiellement se manifester au cours du développement de l'ensemble des projets parainnés par cet entrepreneur technologique. L'objectif de cette section consiste à identifier de grands domaines de difficultés technologiques qui pourraient émerger lors de travaux de mise à l'échelle de procédés de valorisation de la biomasse. Cette énumération ne sera pas exhaustive mais regroupera les différents éléments que nous avons relevé dans notre revue de la littérature s'intéressant particulièrement aux procédés de fermentation.

L'exercice d'analyse que nous effectuons se concentre sur les difficultés technologiques qui engendrent des freins à la décision d'investissement pour le développement d'un projet. Cependant, notre démarche nous a fait découvrir plusieurs ouvrages synthèses sur l'application de procédés de fermentation qui révèlent un certain degré de savoir-faire pouvant constituer un effet stimulant sur la rationalité de l'investissement. Ces travaux sur l'état des connaissances ont été publiés par: Harlander and Labaya (1986), Maes (1986), Moo-Young (1985), Comité Consultatif National de la Biotechnologie (1984), Office of Technology Assessment

(1984), Atkinson and Sainter (1983, 1982), Bull, et al. (1982). En guise d'exemple sur les différentes approches applicables pour la récupération des produits d'un processus de fermentation, nous avons extrait d'une étude réalisée pour le "Forecasting and Assessment in the field of Science and Technology (FAST)" certains tableaux et figures, présentés dans l'annexe de ce rapport, qui caractérisent bien certaines opérations de récupération ou propriétés de la suspension de cellules.

L'approche que nous avons choisi pour effectuer l'ordonnancement des domaines de difficultés technologiques consiste à définir pour chacun des éléments composant le système procédé (cf. figure 2) des opérations spécifiques du processus et d'identifier pour chacune d'elles les difficultés technologiques qui lui sont associées. Les résultats de cette analyse sont présentés au tableau 10. À l'instar du projet d'ICI, c'est le procédé de biotransformation qui regroupe une fraction majeure des difficultés technologiques. Cependant, on constate que c'est en aval du processus de fermentation que les entrepreneurs technologiques rencontreront plusieurs difficultés technologiques complexes. Tout comme le met en évidence ce tableau, de grands besoins de développement se font sentir dans le domaine des techniques appliquées en aval des processus de fermentation. Ces besoins consistent aussi bien en l'acquisition de connaissances théoriques représentant des phénomènes connus qu'au développement de nouvelles techniques. Un autre élément d'importance que nous devons souligner consiste à la production par un procédé de fermentation de quantités non-négligeables de résidus de natures diverses. Un traitement adéquat de chacun de ces résidus devra être accompli afin de préserver la santé publique ainsi que la qualité de l'environnement.

Les éléments de réflexion contenus dans cette section se rapportent uniquement à la définition de contraintes d'ordre technique. Or, comme il a été démontré par le modèle conceptuel, il existe une contrepartie à cet ensemble de difficultés; ce sont les contraintes

Tableau 10: Liste des grands domaines de difficultés technologiques ordonnée en fonction des éléments constitutifs du système procédé

ÉLÉMENTS DU SYSTÈME PROCÉDÉ	OPÉRATION SPÉCIFIQUE	DIFFICULTÉS TECHNOLOGIQUES ASSOCIÉES
SUBSTRAT	1) préparation du milieu de culture	le milieu de culture peut être "simple" (eau, substrat, et quelques substances nutritives) ou "complexe" (eau, substrat carboné, substrat azoté, substances nutritives, acides aminés et/ou acides gras essentiels, vitamines, etc.). Un bouillon de culture complexe peut être difficilement recirculable et entraîner des conséquences importantes dans les opérations de séparation (coût élevé/unité de volume, extraction du produit). la concentration de la biomasse dans le milieu de culture recirculé peut être trop dilué.
	2) stérilisation du bouillon de culture	la stérilisation du milieu de culture frais ou recirculé peut-être "indispensable et problématique" (présence de substances thermosensibles, modifications des caractéristiques physico-chimiques de la suspension, etc.). l'élimination des toxines d'origine biologique (ex: mycotoxines) présentes dans le substrat, n'est pas assurée par cette opération.

Tableau 10: Liste des grands domaines de difficultés technologiques ordonnée en fonction des éléments constitutifs du système procédé (suite)

ÉLÉMENTS DU SYSTÈME PROCÉDÉ	OPÉRATION SPÉCIFIQUE	DIFFICULTÉS TECHNOLOGIQUES ASSOCIÉS
PROCÉDÉ DE BIOTRANSFORMATION	1) Définition de la séquence d'opérations du procédé 2) Processus de fermentation	l'exploitation d'un procédé à plusieurs étapes sera possible que si les coûts d'opération sont faibles par unité de volume l'asservissement du procédé à un système de contrôle en temps réel peut être difficile (utilisation des senseurs adéquats, définition de boucles de contrôle efficaces, etc.) l'utilisation de microorganismes dont la génétique et les modes de reproduction sont plus complexes que celles des bactéries, comme les champignons ou les levures, peut devenir problématique car la stabilité (des propriétés sélectionnées) des souches n'est pas assurée la production d'aérosol formé à partir du milieu de culture cause dans certains cas des réactions allergiques chez les opérateurs les bioréacteurs doivent être bien scellés et conçus pour les risques d'explosion, tandis que les pièces qui les contiennent devront être bien ventilées l'utilisation de souches de microorganismes modifiés génétiquement implique des mesures de contrôle de leur propagation aussi sévère que pour l'utilisation d'un organisme pathogène; le rejet incontrôlé de ces souches dans l'environnement peut s'avérer très néfaste à la sauvegarde de son équilibre (voir section 2.4)

Tableau 10: Liste des grands domaines de difficultés technologiques ordonnée en fonction des éléments constitutifs du système procédé (suite)

ÉLÉMENTS DU SYSTÈME PROCÉDÉ	OPÉRATION SPÉCIFIQUE	DIFFICULTÉS TECHNOLOGIQUES ASSOCIÉS
PROCÉDÉ	3) Séparation des solides de la suspension de cellules	développement des connaissances sur les caractéristiques physico-chimiques du système cellule-suspension de solides qui constitue un point clé pour le contrôle du comportement des solides et qui sont nécessaires à leur modification et à leur gestion à l'intérieur du procédé obtention d'une compréhension théorique et de la numérisation (équations) de phénomènes, tel que: la déformation des particules solides, leur agglutination et leur adhérence aux surfaces; les effets reliés à une filtration comme l'écoulement de la suspension et l'encrassement des surfaces; la formation d'émulsion; le comportement d'un système à deux phases
	4) Le bris des cellules	lorsque cette opération est indispensable à la récupération de produit(s) intracellulaire(s), on fabrique alors un homogénat de débris et de constituants cellulaires dont les propriétés physico-chimiques sont très différentes de la suspension initiale, la récupération des produits sera dispendieuse et nécessitera des opérations consommant beaucoup d'énergie
PRODUIT(S)	Isolation finale du produit	il existe certains problèmes spécifiques à la récupération finale d'un produit soit: i) la "grande viscosité" des solutions contenant le produit (ex: les polysaccharides). Ces solutions visqueuses occasionnent des problèmes de séparation des solides et impliquant soit leur dilution ou leur chauffage afin de réduire à un niveau opérationnel.

Tableau 10: Liste des grands domaines de difficultés technologiques ordonnée en fonction des éléments constitutifs du système procédé (suite)

ÉLÉMENTS DU SYSTÈME PROCÉDÉ	OPÉRATION SPÉCIFIQUE	DIFFICULTÉS TECHNOLOGIQUES ASSOCIÉS
PRODUIT(S)	isolation finale du produit	ii) la récupération ardue des produits organiques solubles de faible à moyen poids moléculaire (ex.: alcools non-volatils, glycol) où les techniques utilisées entraînent des impuretés résiduelles dans le produit; iii) assurer une immobilisation sélective de l'enzyme, nécessaire à la bioconversion, sur un support spécifique et conserver son activité pour une longue période. Le problème rencontré est l'inactivation accélérée des enzymes et leur présence dans la solution de produit. la concentration du produit dans la suspension à l'exutoire du processus de fermentation est trop diluée et augmente les coûts de traitement par unité de volume
RÉSIDUS	disposition des résidus	un procédé de fermentation produit de grandes masses (gaz, bouillon de culture, eaux des opérations de récupération, biomasse) qui doivent être éliminées adéquatement pour la sauvegarde de la santé publique et de l'intégrité de l'environnement.

contextuelles. Considérant que nous avons étudié les difficultés technologiques survenant au cours du développement d'un projet en fonction de sa dimension technologique et techno-économique, nous nous devons aussi d'examiner les retombées potentielles qui pourraient survenir lors de l'insertion d'une nouvelle technologique de valorisation d'une biomasse dans les autres dimensions qui caractérisent l'univers où évolue notre société. Par conséquent, la prochaine section portera sur une contrainte contextuelle majeure, c'est-à-dire les impacts environnementaux consécutifs à l'insertion dans notre société de production de procédés industriels fondés sur l'exploitation des biotechnologies.

2.4 L'EXPLOITATION DES BIOTECHNOLOGIES ET LES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX

On admet généralement que la mise au point de procédés de biotransformation novateurs repose sur les progrès récents ou futurs des biotechnologies. Cependant, depuis quelques années, la communauté scientifique a émis des réticences croissantes concernant toute atteinte à l'environnement par le déploiement des biotechnologies dans notre société de production. En effet, tant que les recherches en biotechnologie se focalisaient sur des problèmes d'ordre biomédical (instruments de diagnostics et pharmacologiques) pour vaincre des maladies comme le cancer et le diabète, et que celles-ci s'avéraient une nouvelle source d'espoir pour des percées médicales importantes, le développement des biotechnologies était socialement et politiquement irréprochable. Or, à mesure que les activités de recherche s'orientaient vers des projets non médicaux et que de nouveaux produits aboutissaient sur le marché, les inquiétudes se firent croissantes quant à la contamination possible de l'environnement pouvant résulter de l'emploi abusif du génie génétique¹ (Smithson, 1986). A ce

¹ Les organismes biologiques les plus susceptibles d'être modifiés par les techniques de génie génétique sont principalement les microorganismes (bactéries, champignons, levures, etc.) et les plantes supérieures.

chapitre, l'argumentation structurée développée par divers groupes d'experts scientifiques et juridiques a permis d'identifier les multiples aspects qui caractérisent la problématique de la dispersion des produits de la biotechnologie et de leurs impacts potentiels sur l'environnement. (Office of Technology Assessment, 1984; American Society for Microbiology; Gillett et al., 1986; The World Biotech Report 1986)

Sous plusieurs aspects, l'impact environnemental causé par un produit biotechnologique est comparable à celui de la libération d'une substance chimique toxique dans l'environnement et touche les multiples niveaux de l'organisation écologique, de l'individu jusqu'à l'écosystème. Plusieurs facteurs et processus doivent être alors considérés pour évaluer le potentiel d'impact de l'insertion dans l'environnement des souches sélectionnées. L'étude des espèces susceptibles d'être affectées et l'analyse et la modélisation du transport, de l'altération, de la dispersion écologique et des effets directs et indirects pouvant être associés à ce type d'altéragène nécessiteront l'élaboration de nouvelles stratégies d'évaluation, de suivi environnemental et de prédiction de comportement. En effet, contrairement aux substances chimiques, les organismes modifiés génétiquement qui sont dispersés dans l'environnement peuvent se reproduire et migrer bien au-delà du point de rejet. De plus, ils ont même la capacité de transférer de nouvelles informations génétiques aux organismes sauvages formant les communautés naturelles. Ces différences fondamentales dans la nature des impacts environnementaux exigent ainsi que les approches réglementaires contiennent des dispositions particulières adaptées au contrôle de ce nouveau type de polluant.

Dans cette section, on analysera l'importance que peuvent revêtir les problèmes de production de microorganismes pouvant altérer les dynamiques des écosystèmes dans les décisions d'investissement de fonds publics conduisant au développement de nouveaux procédés industriels de bioconversion. Après avoir survolé les domaines

d'application des biotechnologies, on analysera quelques problèmes associés à la production d'agents altéragènes qui pourraient accroître l'incertitude technologique qui caractérise un projet d'investissement dans le développement d'une nouvelle technologie.

2.4.1 Survol des domaines d'application des biotechnologies

Les biotechnologies font miroiter des promesses d'approvisionnement "illimité" en nouveaux produits ou en produits de substitution pour les produits présentement rares ou peu performants; il existe, en effet, des indications permettant d'espérer que certains produits biotechnologiques seront plus efficaces et plus sûrs que leurs équivalents conventionnels (Office of Technology Assessment, 1984). Outre son potentiel économique, l'application des découvertes en biotechnologie pourrait possiblement résoudre certains problèmes mondiaux comme la malnutrition, la maladie, la pollution et les déficits énergétiques.

Voici les principaux domaines d'application actuels ou projetés des biotechnologies: l'industrie pharmaceutique, l'industrie chimique, l'industrie alimentaire, la production agricole, la gestion des pestes, le contrôle de la pollution, l'industrie minière et la récupération de minerais, la production d'énergie. Dans une optique de développement de projets de valorisation industrielle de la biomasse et en considérant que notre attention se porte principalement sur l'introduction de produits de la biotechnologie dans l'environnement, on peut exclure les secteurs pharmaceutiques et miniers de la liste générale des domaines d'applications retenus pour notre étude. Le tableau 11 présente certains des principaux domaines d'application des biotechnologies, les innovations auxquelles ils pourraient conduire dans le secteur de la valorisation industrielle de la biomasse et, enfin, leurs conséquences potentielles sur l'environnement.

Tableau 11 Les principaux domaines d'application des biotechnologies dans le secteur de la valorisation de la biomasse et leurs conséquences potentielles sur l'environnement.

<u>PRINCIPAUX DOMAINES D'APPLICATION DES BIOTECHNOLOGIES</u>	<u>TYPE DE PROJET BIOTECHNOLOGIQUE DANS LE SECTEUR DE LA VALORISATION DE LA BIOMASSE</u>	<u>PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX POTENTIELS</u>
. industrie pharmaceutique	. bioconversion d'algues marines en substrats de base ou comme agents pharmacologiques	. rupture du stock d'algues en zone côtière et perturbation des écosystèmes marins
. industrie chimique	. production de produits de chimie fine à partir de biomasse	
. industrie alimentaire	. sélection de microorganismes transformant une biomasse non-comestible en nourriture pour l'alimentation humaine ou animale	
. production agricole	. augmentation de la production des cultures en améliorant la fixation de l'azote par la plante via l'utilisation de microorganismes ou de modification génétique	. perte de certaines qualités nutritionnelles de la plante et appauvrissement accéléré des sols
. gestion des pestes	. protection des cultures contre la gelée via la désactivation des bactéries génératrices de noyaux de condensation	. perturbations importantes du mécanisme de formation des précipitations
. contrôle de la pollution	. amélioration du processus de dénitrification dans les mesures de contrôle de la pollution	. appauvrissement des sols en azote par les bactéries dénitrifiantes qui ont été mal confinées
. production d'énergie	. sélection de microorganismes plus efficaces et résistant à l'intoxication par les métaux lourds associés aux déchets pour leur bioconversion en méthane	. apparition de souches de microorganismes pathogènes plus résistants dans des milieux insalubres

2.4.2 Les facteurs associés à la production d'altéragènes environnementaux pouvant augmenter l'incertitude technologique d'un projet

Les besoins en information sur les organismes modifiés génétiquement

Au point de vue mondial, les réglementations gouvernementales, présentes ou en cours d'élaboration, qui régissent l'introduction d'un produit biotechnologique dans l'environnement sont généralement basées sur le principe voulant que tout nouveau produit fasse l'objet d'une évaluation environnementale portant sur l'ensemble de son cycle d'existence afin de juger des risques qu'il représente pour l'environnement ou pour la santé humaine. Ces évaluations nécessitent une connaissance approfondie des propriétés d'un organisme, de ses applications spécifiques et de ses interactions avec diverses composantes de l'environnement. Ainsi, les besoins en information concernant un organisme modifié génétiquement portent sur la capacité de survie de l'organisme, sa croissance, les mécanismes de dispersion et son processus d'insertion dans l'environnement.

Un survol de la littérature scientifique concernant la survie des bactéries nous révèle une série d'informations contradictoires. Règle générale, certaines populations de bactéries déclinent rapidement et sont essentiellement disparues environ 2-3 semaines après leur libération tandis que d'autres populations décroissent exponentiellement durant les premiers jours et persistent ultérieurement à un faible niveau (Alexander, 1986).

On peut identifier une gamme de facteurs exogènes qui affectent le taux de mortalité et l'éventuelle survie des populations de bactéries. Le tableau 12 présente cette série de facteurs exogènes et décrit sommairement comment le facteur agit sur la bactérie. Quant aux facteurs endogènes qui favorisent la croissance des

microorganismes, ceux-ci sont généralement mal connus, les informations diffusées dans la littérature scientifique caractérisant plutôt des conditions d'habitat non-représentatives du milieu naturel, mais ils comprennent probablement: la tolérance à des stress de nature biotique ou abiotique; l'efficacité à capter les substances nutritives; la capacité de compétitivité; un grand potentiel de vitesse de croissance; la disponibilité de substances nutritives organiques.

Un autre fait important à considérer est que les organismes modifiés génétiquement et sélectionnés pour être introduits volontairement dans l'environnement auront des meilleures chances de survivre que ceux dont la libération dans l'environnement n'est qu'accidentelle, car leur sélection génétique est axée spécifiquement sur leur survie. En effet, on peut supposer qu'une décharge accidentelle d'organismes modifiés génétiquement provenant d'un procédé dont les conditions du milieu de croissance sont spécifiques, ne pourrait occasionner qu'un risque minimal face à l'insertion de cet organisme dans l'environnement, car leur survie y étant grandement compromise.

Les principaux facteurs intervenant dans la dissémination volontaire dans l'environnement d'un produit biotechnologique sont: l'importance de la source de rejet initial, l'efficacité de l'agent dispersant et la sensibilité de l'environnement cible aux organismes introduits. Le phénomène de la dispersion par l'intermédiaire de différents vecteurs (air, eau, animaux) ou par contact direct peut être modélisé suivant un mode de diffusion passive ou turbulente. Cependant, la dispersion d'un agent sur une longue distance devient difficilement prédictible; ceci a pour conséquence d'augmenter l'incertitude de toute analyse portant sur la destinée des microorganismes libérés. On considère la capacité de survie d'un organisme durant la phase de transport comme étant le facteur critique témoignant de la résistance de l'organisme. Dès que l'organisme atteint son environnement cible, son insertion et sa disper-

sion sont affectées par le nombre de contacts avec des hôtes ou des environnements potentiels et par le niveau de spécialisation écologique de l'organisme (c'est-à-dire sa spécificité d'habitat).

Les conséquences écologiques potentielles du rejet d'un produit biotechnologique

L'analyse des impacts sur l'environnement des organismes modifiés génétiquement distingue les effets au niveau de la population des effets au niveau de l'écosystème. Au niveau de la population, on s'intéresse à la survie et à la croissance des organismes qui ont été introduits ainsi qu'aux interactions avec les populations d'espèces indigènes (sauvages). Au niveau de l'écosystème, ce sont les changements dans la dynamique de l'écosystème provenant des activités de l'organisme modifié génétiquement qui constitue l'objet de l'analyse.

Le premier type d'effet (sur la population) peut être adéquatement circonscrit à l'aide d'une série d'expériences simulant l'introduction d'organismes exotiques dans un environnement particulier. Pour le second type d'effet (sur la structure et la dynamique de l'écosystème), l'évaluation est beaucoup plus difficile car elle requiert un examen systématique des échanges dynamiques entre les divers constituants de l'écosystème qui permette de caractériser les changements dans les mécanismes d'échange de matière et d'énergie.

On peut regrouper en quatre classes les organismes susceptibles d'être introduits dans l'écosystème: 1. les variétés légèrement modifiées par rapport aux espèces sauvages; 2. les variétés retrouvées à l'état naturel mais qui nécessitent un apport essentiel et continu de substrat; 3. les variétés retrouvées ailleurs, mais nouvelles dans l'environnement cible; et, enfin, 4. les innovations authentiques. Pour chacune de ces catégories d'organismes altérage, on peut concevoir qu'il existera différents types

d'impacts sur l'environnement. Globalement, les comportements des microorganismes pathogènes qui nécessitent des espèces hôtes sont plus sûrement prédictibles que celles des autres organismes. En effet, la spécificité de l'hôte constitue alors une contrainte importante pour un organisme exogène. Les conséquences de l'introduction d'espèces pouvant vivre indépendamment (sans support) des autres espèces indigènes sont plus difficiles à prévoir car les interactions potentielles entre ces groupes sont multiples. D'autres facteurs importants concernant l'introduction d'organismes produits par les biotechnologies et qui produisent des effets au niveau des populations sont, par exemple, la prédation, la spécificité pour l'habitat et la compétition pour les ressources.

Dans une autre perspective, il est plausible de croire que des changements évolutifs sont possibles dans les relations entre les populations introduites et les populations indigènes. On peut expliquer ce phénomène par l'altération des pressions de sélection. Les complications liées à ces changements peuvent survenir simultanément ou indépendamment selon l'instabilité des organismes introduits, instabilité qu'on associe soit à la capacité des plasmides à transférer une information génétique spécifique entre différentes espèces, soit à la capacité de l'ADN bactérien d'effectuer la transduction ainsi que la transformation des autres espèces. Tous ces phénomènes ajoutent donc une incertitude à la prédiction des réponses aux niveaux des populations et des communautés, qu'il s'agisse des répercussions sur la composition en espèces, la diversité, les interactions trophiques ou la productivité.

À l'échelle des écosystèmes, les dynamiques écologiques vulnérables à des modifications dans les processus métaboliques des populations de microorganismes par le développement des biotechnologies sont: la production primaire, les cycles des matières nutritives, particulièrement ceux qui impliquent des substances nutritives limitantes, la décomposition, la respiration, et les réactions d'oxydo-réduction. Ces processus sont en effet effectués par voie micro-

biologique et quelques taxons de microorganismes peuvent en exercer le contrôle.

Ainsi, ces dynamiques chimiques contrôlées par des microorganismes s'avèrent critiques dans le maintien de la structure et de la fonction de l'écosystème. Par exemple, des altérations aux cycles des substances nutritives pourraient entraîner des changements catastrophiques dans la richesse en espèces, des flux d'énergies, des structures trophiques et de la productivité d'un système et, par conséquent, modifieraient fondamentalement l'intégrité de l'écosystème.

Pour des applications proposées comme la sélection (design) de microorganismes ayant comme objectif spécifique la modification de processus tels que la dégradation de substances chimiques toxiques, la décomposition de substrats organiques et la fixation de l'azote, on comprend facilement l'importance que revêtent la connaissance des impacts environnementaux au moment d'évaluer la faisabilité technique et environnementale du projet.

Exemple d'un impact potentiel sur l'environnement de suite à l'introduction d'un organisme modifié génétiquement

Pour illustrer plus clairement l'impact potentiel sur l'environnement de l'introduction délibérée d'une souche d'organismes modifiée avec les techniques de génie génétique, examinons ici l'exemple de l'élimination des bactéries précurseurs des gelées hâtives (Schnell, 1986).

La perte moyenne annuelle associée aux dommages créés par les gelées sur les cultures est de l'ordre de \$5 milliards aux États-Unis. Une grande partie de ces dommages causés par le gel est induite initialement par deux espèces indigènes de bactéries génératrices de noyaux de condensation: il s'agit de Pseudomonas syringae et de Erwinia herbicola. L'élimination de ces bactéries

génératrices de noyaux de condensation (BGNC) à la surface des plantes sensibles au gel mène de toute évidence à un bénéfice économique immédiat. Ce problème a fait naître plusieurs approches biotechnologiques qui pourraient être employées afin de prévenir les effets néfastes du gel sur les cultures. L'une de ces approches propose d'extraire de ces souches le gène responsable de la cristallisation de l'eau puis de réintroduire les nouvelles souches d'organismes modifiés génétiquement (OMG) sur les cultures. Lorsque les souches d'OMG colonisent la surface des plantes, elles déplacent les souches sauvages de BGNC et confèrent alors à la plante une mesure de protection contre le gel.

Quels sont les répercussions que pourrait avoir l'introduction de ces espèces modifiées sur le cycle de l'eau?

La formation des précipitations à l'intérieur des nuages est liée à deux mécanismes distincts: 1) la "formation par collision" où les gouttelettes d'eau contenues dans le nuage se heurtent entre elles et éventuellement grossissent pour former des gouttes d'eau qui peuvent alors précipiter; ou 2) par la "formation d'une particule de glace" provenant de la croissance d'un cristal de glace à partir de la vapeur d'eau du nuage et de la capture subséquente des gouttelettes d'eau par collision qui augmente en poids et est accéléré par gravité vers le sol. La température régnant à la base du nuage déterminera la nature de la précipitation (neige, grésil, grêle ou pluie). C'est le mécanisme passant par la formation d'une particule de glace qui prévaut largement sur les états continentaux des États-Unis et ce aussi bien en été qu'en hiver.

Le plus actif des noyaux de condensation retrouvé dans la nature est celui qui est produit par quelques espèces de bactéries indigènes. Bien qu'il n'existe pas présentement de certitude absolue sur l'existence d'un lien entre les noyaux de condensation biogénique et les précipitations; on constate la présence d'une forte corrélation entre la disponibilité à la surface des noyaux de

condensation biogénique et le contenu en noyaux de condensation des eaux de pluie récoltées dans la région à l'étude. Récemment, on a découvert que quelques bactéries particulièrement actives un noyau de condensation de nature organique qui est stable et très efficace. Ces deux constatations suggèrent que les noyaux de condensation biogéniques peuvent constituer une fraction importante de la formation des noyaux de cristallisation atmosphérique et, conséquemment, jouer un rôle majeur dans la dynamique des précipitations.

On estime que pour atteindre une réduction significative des pertes en culture lors de légères gelées, on devrait diminuer au moins d'un facteur de 10^2 la population de la BGNC colonisant la surface des plantes. De plus, si on présume que la concentration de noyaux de cristallisation générés dans le nuage est consécutivement diminuée de la même proportion, le mécanisme, de précipitation via la formation d'une particule de glace serait alors réduit d'environ 50%. Si cette dernière hypothèse est plausible, la fraction de nuage qui serait affectée par une réduction de la disponibilité des noyaux de condensation est égale à la fraction de la surface totale des terres qui seraient soumises à ces mesures de prévention contre le gel; par exemple, en considérant que les fermiers traiteront toutes leurs cultures sensibles au gel, les régions traitées atteindraient jusqu'à 50% de la surface d'états comme l'Iowa ou l'Illinois.

Au cours des passages de nuages convectifs qui produisent les pluies estivales, les masses d'air ascendante alimentent des nuages d'environ 1 à 10 kilomètres de diamètre, soit de 25 à 25 000 acres. La vie d'un nuage convectif est de l'ordre de 10 minutes à 1 heure et sa vitesse moyenne de déplacement d'environ 10 m/s. Or, la présence d'une surface de terre traitée de l'ordre de plusieurs milliers à quelques dizaines de milliers d'acres aura un certain potentiel pour affecter un tel système nuageux.

On constate qu'il est prudent d'approfondir nos connaissances sur les liens entre les noyaux de cristallisation biogénique et le phénomène des précipitations avant que l'application de la technologie de la substitution des BGNC n'atteigne le niveau critique du millier d'acres. Autrement dit, les agences de contrôle de l'environnement devront être totalement informées sur les intentions d'appliquer les souches modifiées de bactéries génératrices de noyaux de condensation afin d'exercer une surveillance sur ces activités.

Enfin, plusieurs autres conséquences sont possibles si jamais cette technologie était appliquée à grande échelle sans considérations pour ces interactions avec les précipitations. Si tous les fermiers d'une région traitent et protègent leurs cultures contre le gel, pourrait-on être aux prises avec une surproduction? Les agriculteurs n'essaieront-ils pas de pousser plus au nord les limites géographiques de leurs cultures? Est-ce que le gain associé à la protection des cultures contre le gel ne sera pas contrebalancé par les pertes associées à la diminution potentielle des précipitations? Pourrait-il se manifester une modification importante de la distribution des précipitations?

Cette approche a engendré une série de réactions, tant de la part du public que des législateurs, qui ont conduit à ce jour à la suspension des essais de cette technologie en milieu naturel (Schnell, 1986).

Cet exemple illustre bien la complexité des liens entre les composantes du milieu et les surprenantes conséquences de certaines activités de l'homme sur l'environnement: ce qui semblait a priori une intervention locale dans un secteur d'activité économique très répandu, pourrait dégénérer via une cascade d'événements en une altération importante d'un phénomène naturel.

DISCUSSION

DISCUSSION

Cette analyse a tenté de mettre en évidence les différents facteurs qui font augmenter ou qui stabilisent le niveau d'incertitude technologique d'une proposition de projet et qui influencent d'une certaine façon l'approche décisionnelle du choix des investissements d'un entrepreneur technologique. De plus, cette analyse a cherché à fixer le niveau d'importance qu'il faut attribuer à l'évaluation technologique au moment de l'étape de la sélection de projets. Pour ce faire, l'approche méthodologique que nous avons employé a consisté en l'élaboration d'une revue de la littérature approfondie mais non exhaustive sur deux grands thèmes soit: la description et la gestion du processus de l'innovation technologique, et le développement technologique dans le domaine de la valorisation de la biomasse.

L'étude de ce premier thème au premier chapitre nous a permis de caractériser d'une manière générale le contexte de l'innovation technologique autant chez les entrepreneurs privés que publics qui sont impliqués dans des travaux de Recherche et Développement. L'examen détaillé du processus de l'innovation technologique nous a révélé un ensemble de facteurs qui déterminent la progression du processus de l'innovation. Or, l'acquisition de connaissances générales dans le secteur de la R et D nous a servi de base afin de développer de manière plus approfondie au second chapitre la problématique des freins et stimulants opérationnels à l'initiative technologique de valorisation de la biomasse. L'élaboration de cette réflexion a soulevé plusieurs éléments mais voici ceux que l'on considère plus importants.

La réduction de l'incertitude commerciale et de l'incertitude technologique est essentielle au moment d'engager de fortes sommes dans le processus de l'innovation. Cette situation reflète bien la relation de réciprocité entre les paramètres qui définissent le

succès commercial et ceux qui sont associés au succès technologique. La faisabilité commerciale et la faisabilité technologique qui sont définies par un ensemble de paramètres de l'innovation, imposés par les forces du marché, constituent les éléments les plus critiques dans le cheminement décisionnel des investisseurs. Cependant, on constate souvent que l'investisseur s'inquiète plus de la faisabilité commerciale d'un projet que de sa faisabilité technologique, ce qui entraîne un déséquilibre entre l'importance attribuée au rôle des forces de marché dans la réussite technologique par rapport au rôle joué par les pressions technologiques. Par le fait même, ceci conduit à une sous-estimation des difficultés technologiques qu'il faut surmonter pour atteindre la réussite commerciale de l'innovation. Enfin, les intervenants de la R. & D. ont souvent tendance à sous-estimer les délais et les coûts ainsi qu'à surestimer le niveau de performance du produit de l'innovation en raison de l'importance des préjugés optimistes qu'ils accusent au moment de l'évaluation des difficultés techniques associées au développement de technologies.

Si l'on considère que moins de 2% des propositions initiales que l'on engage dans le processus de développement de nouveaux produits deviennent des succès commerciaux, la diminution des risques d'investissement constitue alors une contrainte importante pour les gestionnaires du processus de l'innovation. Un moyen efficace pour réduire ces risques d'investissement consiste donc à effectuer une sélection prudente de projets. Cette étape du processus d'innovation implique des problèmes décisionnels nécessitant alors une bonne connaissance de facteurs d'ordre technique pour qu'ils soient résolus.

À l'instar de cette analyse, plusieurs autres études soulignent l'importance des facteurs techniques comme éléments critiques déterminant le succès technologique d'un projet. De plus, on doit considérer le succès technologique d'un projet originant des

paramètres de l'innovation qui sont eux-mêmes dictés par les conditions susceptibles d'entraîner le succès commercial du produit.

Nous avons proposé dans le cadre de cette étude un modèle conceptuel pour la caractérisation des difficultés technologiques qui se manifestent au cours du développement d'un procédé. Ce modèle semble représenter d'une manière juste et satisfaisante les interactions entre les difficultés technologiques et le processus d'innovation. C'est la conjugaison des contraintes contextuelles et des contraintes d'ordre technique qui engendre l'ensemble des difficultés technologiques. L'application du modèle conceptuel à l'étude de cas de la compagnie ICI nous a permis de vérifier le niveau de représentativité du modèle lors du processus de l'innovation technologique. De plus, cet exemple de mise à l'échelle d'un procédé de fermentation a soulevé l'importance capitale que revêt pour l'entrepreneur technologique l'intégration d'une approche multidisciplinaire très inter-active qui puisse réagir avec souplesse lorsqu'elle est confrontée à une situation de verrou technologique. Enfin, cette expérience nous a révélé un patron d'apparition en cascades de nouvelles difficultés technologiques interdépendantes provenant de la solution d'une première difficulté.

Il a été possible d'identifier une gamme de contraintes d'ordre technique et de contraintes contextuelles propres à des activités de Recherche et Développement dans le secteur de la valorisation industrielle de la biomasse. L'importance des facteurs techniques est indéniable sur la progression du processus d'innovation. Cependant, ce sont les contraintes contextuelles reliées aux retombées environnementales de l'exploitation industrielle des biotechnologies qui nous apparaissent les plus insidieuses.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

ALEXANDER, M. (1986). "Fate and movement of microorganisms in the Environment: Survival and growth of bacteria". Environmental Management, 10(4): 463-469.

ATKINSON, B. and P. SAINTER (1982). Technological forecasting for downstream processing in biotechnology. Phase I: Intermediate forecast report. Commission of the European Communities, Science and technology policy. FAST series No 6, EUR 8041 EN, 75 pp.

ATKINSON, B. et P. SAINTER (1983). Technological forecasting for downstream processing in biotechnology. Phase 2: Process and unit operation needs. Commission of the European Communities, Science and technology policy. FAST series No7, EUR 8549 EN, 120 pp.

BOOZ, ALLEN & HAMILTON (1968). Management of New Products. Booz, Allen & Hamilton, Inc., New-York.

BOUCHER, V. et J.L. SASSEVILLE (1987). L'environnement institutionnel de l'initiative technologique de valorisation de la biomasse. INRS-Eau, Rapport scientifique 216, Ste-Foy.

BULL, A.T., HOLT, G. et M.D. LILLY (1982). Biotechnology: international trends and perspectives. Organisation for economic cooperation and development (OECD), Paris, France, 84 pp.

COMITÉ CONSULTATIF NATIONAL DE LA BIOTECHNOLOGIE (1984). Workshop: engineering and fermentation of industrial biotechnology in Canada. Vancouver, Canada 166 pp.

COOPER, R.G. (1982). A Guide to the Evaluation of New Industrial Products for Development. A publication of the Industrial Innovation Center, Montréal.

Centre Québécois de Valorisation de la Biomasse (C.Q.V.B.) (1986).
Dossier de pré-faisabilité. Document interne.

CRAWFORD, C.M. (1979). "New product failure rates - Facts and fallacies". Research Management. September: 9-13.

FREEMAN, C. (1982). The Economics of Innovation, 2ième ed., Francis Printer, Londres.

GAUTHIER, L., SASSEVILLE, J.L. ET B. VERMOT-DESROCHES (1987).
L'environnement économique des initiatives de valorisation de la biomasse: raisonnements économiques et choix des investissements. INRS-Eau, rapport scientifique No 213, Ste-Foy.

GILLET J.W., STERN A.M., HARWELL M.A. and LEVIN S.A. (éds.) (1986). Potential impacts of environmental release of biotechnology products: Assessment, regulation and research needs. Special issue of Environmental Management, 10(4): 433-565.

GLOBE, S., W. GIRARD et C.M. SCHWARTZ (1983). "Key Factors and Events in the Innovation Process". Research Management, july: 8-15.

HARLANDER, S.K. et T.P. LABUZA (1986). Biotechnology in food processing. Noyes Publications, Park Ridge, U.S.A., 323 pp.

HOPKINS, D.S. (1980). New Product Winners and Losers. Conference Board Report #773.

LEITH, S., SASSEVILLE, J.L. et B. VERMOT-DESROCHES (1987). Les freins et stimulants à l'initiative de la valorisation technologique de la biomasse: le cas de certaines entreprises québécoises. INRS-Eau, rapport scientifique no 217, Ste-Foy.

MAES, M. (1986). Déchets industriels: mode d'emploi. Technique et Documentation (Lavoisier), Paris, France, 516 pp.

MANSFIELD, E. et al. (1971). Research and Innovation in the Modern Corporation. W.W. Norton, New-York.

MARSHALL, A.W. et W.H. MECKLING (1962). "Predictability of the Costs, Times and Success of Development". In Ed. 2 The Rate and Direction of Inventive Activities. Princeton University Press, Princeton.

MARTIN, M.J.C. (1984). Managing Technological Innovation and Entrepreneurship. Reston Pub. Co., Reston, Virginia.

MONTEITH, G.S. (1969). R and D Administration. Iliffe Books, Londres.

MOO-YOUNG, M. (éd.) (1986). Comprehensive Biotechnology: The principles, applications and regulations of biotechnology in industry, agriculture and medecine. (4 volumes). Pergamon Press, New York.

MYERS, S. et D.G. MARQUIS (1969). Successful Industrial Innovations. National Science Foundation, NSF 69-71. Washington, D.C.

NORRIS, K.M.P. (1971). "The Accuracy of Project Cost and Duration Estimates in Industrial R and D". R and D Management, 2(1): 25-36.

OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT (OTA) (1984) Commercial biotechnology: an international analysis. US Congress, Washington, DC (OTA-BA-218), 160 p. Pergamon Press.

AMERICAN SOCIETY FOR MICROBIOLOGY (1985) Proceedings of a symposium held on Engineered organisms in the environment: scientific issues. Pennsylvania, June, ISBN 0 914826 83 2, 239 p.

RUBENSTEIN, A.N., A.K. CHAKRABARTI et R.D. O'KEEFE (1974). Field Study on Technical Information Processes. National Science Foundation, New York.

SCHNELL, R.C. (1986). "Bacteria, ice nuclei, frost and rainfall: a regulatory wild card". In: The World Biotech Report, Business legal and regulatory issues. Proceedings of the conference held in San-Francisco, November. Vol. 2, part 4, p. 119-122. Online publications.

SCOTT, D.S. et A.J. SZONYI (1979). "Evaluating a New Venture". In The Technical Entrepreneur, ed. D.S. Scott and R.M. Blair. Press Porcepic, Ontario.

SENIOR, P. (1986). "Scale up of a fermentation process". In: Harlander, S.K. and Labuza, T.P. (eds.), Biotechnology in food processing. Noyes Publications, Park Ridge, U.S.A., 323 pp.

SMITHSON, L.H. (1986). "Biotechnology and the environment: is it time for an ombudsman?" In: The World Biotech report. Business legal & regulatory issues. Proceedings of the conference held in San-Francisco, November. Vol. 2, part 4, p. 123-126. Online publications.

The world biotech report (1986). Business, Legal & Regulatory Issues. Proceedings of the conference held in San-Francisco, November 1986, Vol. 2: part 4. Online publication, ISBN 0 86353 078 8.

THOMAS, H. (1971). "Some Evidence on the Accuracy of Forecast in Novel Projects". R and D Management, 16(4): 76-89.

THOMAS, H.D. (1970). Econometrics and Decision Analysis: Studies in R.D. in the Electronics Industry. Ph.D. Thesis, University of Edinburgh.

ANNEXE

PRÉSENTATION SOMMAIRE DE QUELQUES TECHNIQUES APPLICABLES EN AVAL D'UN PROCESSUS DE FERMENTATION

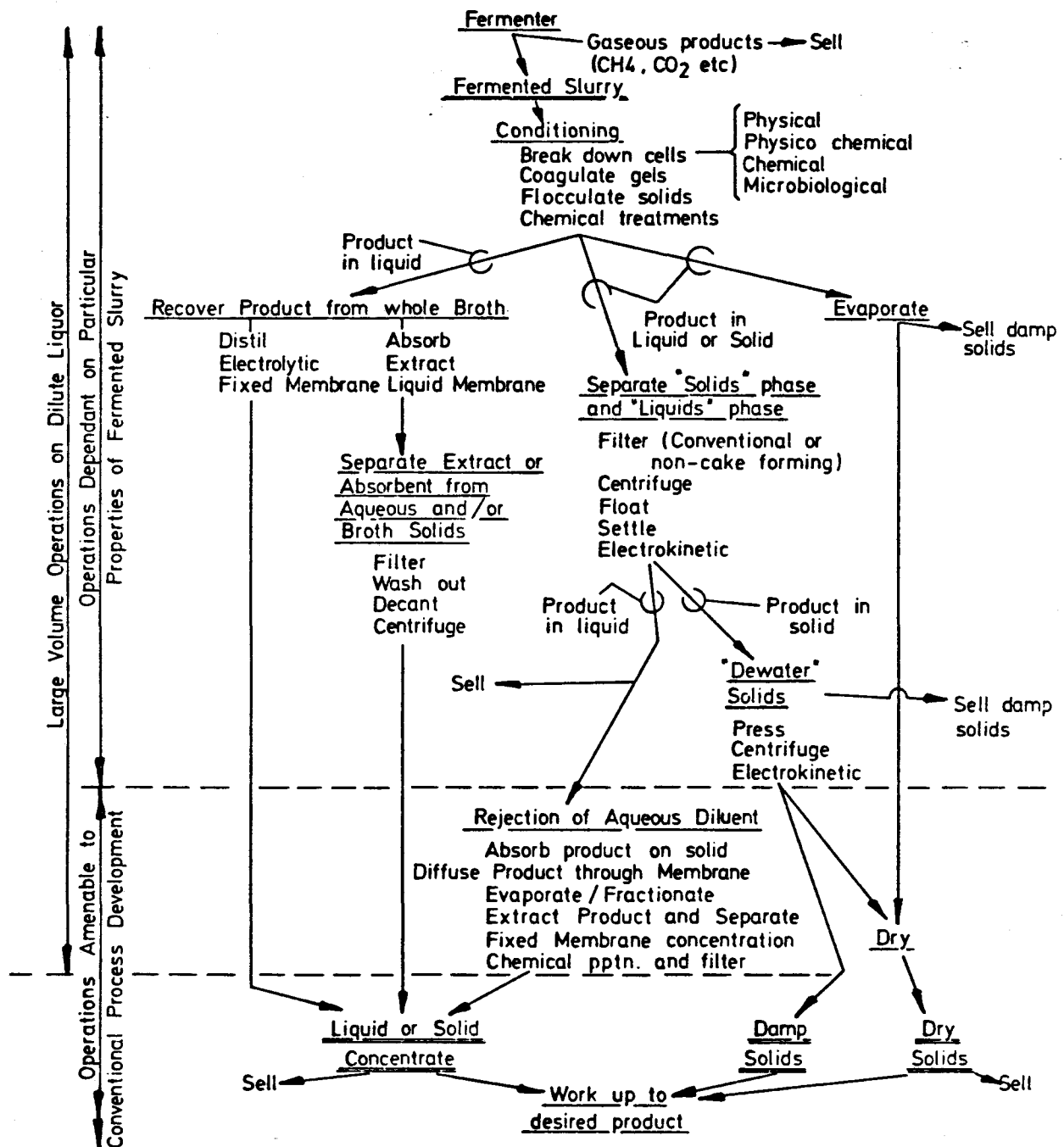


Figure A.1: Présentation des alternatives de récupération des produits présentement disponibles. (extrait d'Atkinson and Sainter, 1982).

Operation	Current State of Technology	Applicable Products	Recovery (Yield)	Selectivity	Volume Reduction	Effluents.	Operability	Product Output Form	Applicability re Product	Consequent Operations
Distillation	Highly developed	Volatile materials	High	All volatiles recovered	High, at least 10:1	Spent broth fit for recycle	High	>50%v soln. of products	Value Low value products	None
Concentration, Thermal.	Highly developed	Non volatile, Thermal stability limits.	Depends on product stability	Nil	Typically 10:1	None - condensate may hold some carry-over.	High, possibly fouling and foaming problems	Concentrate of feed liquor	Low value products	None
Concentration, Ultrafiltration	Well developed.	Mol. wts. above 10,000	High	Rejects low mol. wt. materials	10:1 or much greater	Broth stripped of high mol. wt. materials	Good, some fouling and cleaning problems	Part purified concentrate of feed liquor	Low - Mod. value products	Membrane cleaning
Solvent Extraction (conventional)	Highly developed	Solvent soluble	Moderate	Rejects solvent insolubles	5-10:1	Spent broth with trace solvent, usually at low pH	Good, some emulsion and fouling problems. High speed machines	Solvent solution of part purified product	Mod. value products	Solvent recovery, spent broth stripping
Solvent Extraction, (ion-pair)	Semi technical	Solvent soluble, appropriate counter ions must be available	High	Potentially very high	Probably 10:1	Spent broth with trace solvent and counter ion material	Probably good, as above	Solvent solution of product with counter ions	Mod.-High value products	As above
Two Aqueous Phase Extraction	Semi technical	High mol. wt., soluble, eg. enzymes	Moderate	Moderate	?	Spent broth with much separating agent, eg. 10% phosphate	Probably high. Gravity separations may be possible	Aqueous soln. of product + separating agent, eg. 30% polyethylene Glycol	High value products	Recovery of separating agents may be economic
Two Aqueous Phase Liquid Membrane Extraction	Plant scale in other industries	Potentially very versatile	Probably high	Potentially high	Potentially very high	Some solvent and wetting agent in spent broth (and trace reactants from dispersed phase ?)	Probably good. High speed machines	Emulsion of solvent and aqueous soln. of product	Mod.- High value products	Emulsion breaking, emulsion preparation, spent broth stripping, solvent recovery
Chemical Precipitation and Filtration or Centrifuging	Highly developed	Products with convenient insol. derivatives	High	Depends on broth composition	Very high-product is damp solid	Spent broth with some excess of precipitant	High: physical form control of precipitate may be difficult	Sludge of insoluble derivative of product	Low value products, given cheap pptant.	Redissolving of precipitate
Adsorption on solid Adsorbent, incl. Chromatographic Systems.	Well developed for batch processing	High mol. wt. and unstable materials	Moderate	Moderate to very high: special effects with specific affinity adsorbents	Typically 5-10:1	Spent broth not contaminated. Spent regeneration and wash liquors. Spent adsorbent material	Good: adsorbent fouling, life and physical stability may be problems. Difficult to make continuous	Solution of product in eluate liquor, aqueous or solvent	Mod. (to high value products with special adsorbents)	Preparation and handling of regeneration and wash liquors. Solvent recovery if solvent elution used
Extraction Through Membranes, possibly Electrically Assisted	Lab. and semi tech. scale: plant scale in other industries	Lower mol. wt. materials	Probably moderate	Moderate: special effects with special membranes	?	Spent broth, contaminated possibly by products of electrolysis	Not known. Fouling and membrane life likely problems	Aqueous solution, possibly with products of electrolysis if electrically driven	Mod. (to high value products with special membranes)	Cleaning of membranes
Electrokinetic Processes	Lab. and semi tech scale: few plant scale applications in other industries	High mol. wt. and colloidal materials	Probably low to moderate	Probably low to moderate	?	Spent broth contaminated probably by products of electrolysis	Not known	Aqueous solution probably with products of electrolysis	High value products	None

Tableau A.1: Grandes caractéristiques des procédés pour la récupération de produits à partir d'un bouillon de culture (extrait d'Atkinson and Sainter, 1983).

Operation	Properties of "solids"										Properties of product and/or "liquids"						
	Rigidity of particles	Zeta potential of particles	Cohesiveness of particles	State of flocculation and particle size	Density of flocs or particles	Fluidity of slurry, limiting concentration of solids in fluid slurry	Emulsion formation, wetting properties	Retention of solids by aqueous phase	Fouling of surfaces, adhesiveness of solids	Cell membrane strength	Cell membrane permeability/chemistry	Mol. wt. (or particle size) of wanted fraction	Volatility of wanted fraction	Distribution coefficient of wanted fraction	Adsorption properties of wanted fraction	Conductivity of aqueous	Viscosity of aqueous phase
Filtration, conventional	X		X	X		X		X	X								X
Centrifuging/Sedimentation			X	X	X	X										X	X
Electrokinetic Separation		X		X												X	X
Flotation				X	X	X											X
U.F. or cross flow filtration					X				X			X					X
Solvent Extraction					X	X	X	X					X				X
Liquid Membrane Extraction					X	X	X	X					X				X
Direct Adsorption				X		X			X						X		X
Distillation/Evaporation						X			X				X				
Cell Lysis										X	X						
Cell Disruption	X					X				X							

Tableau A.2: Paramètres physiques de contrôle pour les opérations primaires de traitement d'un bouillon de culture (extrait d'Atkinson and Sainter, 1983).