



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

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



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

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

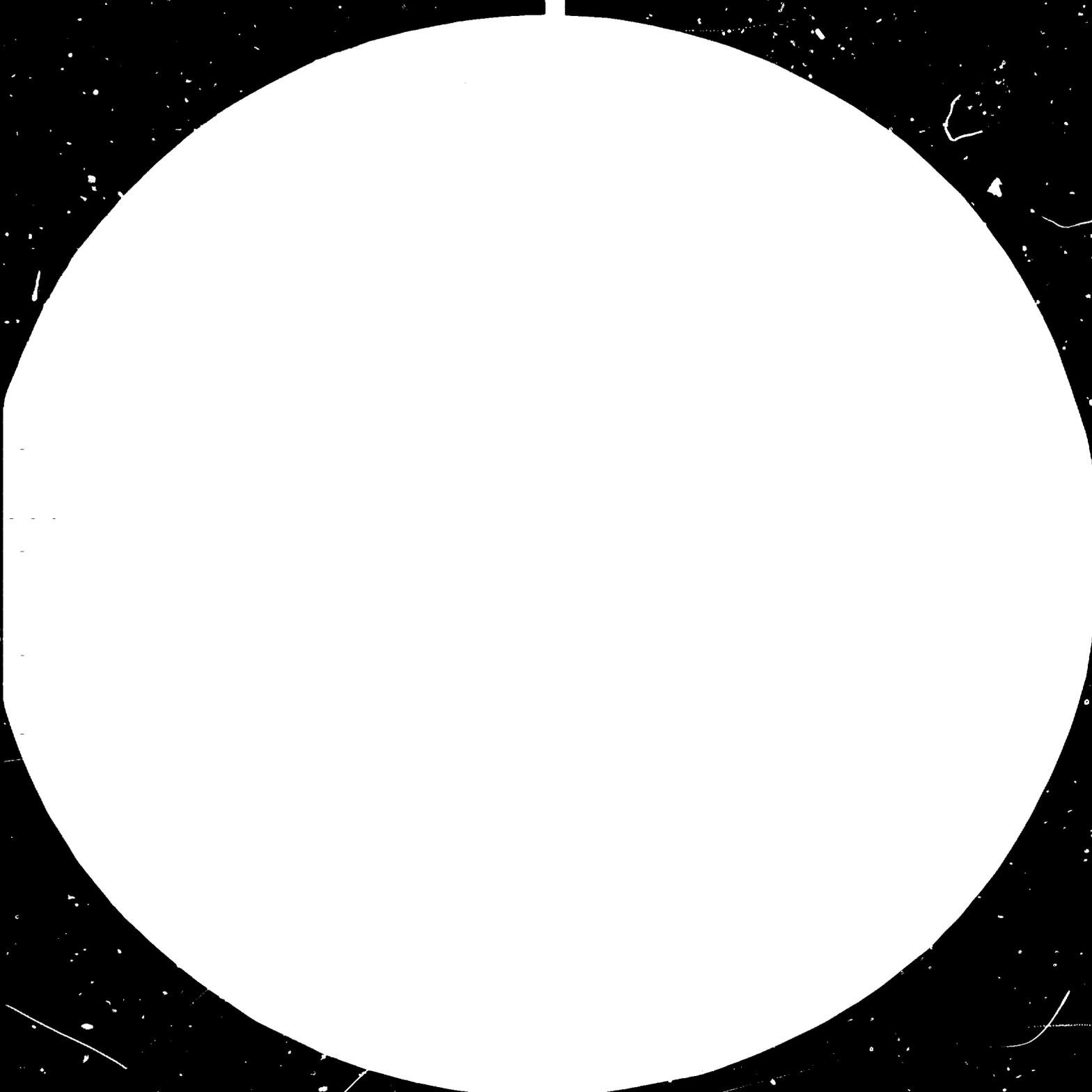
FAIR USE POLICY

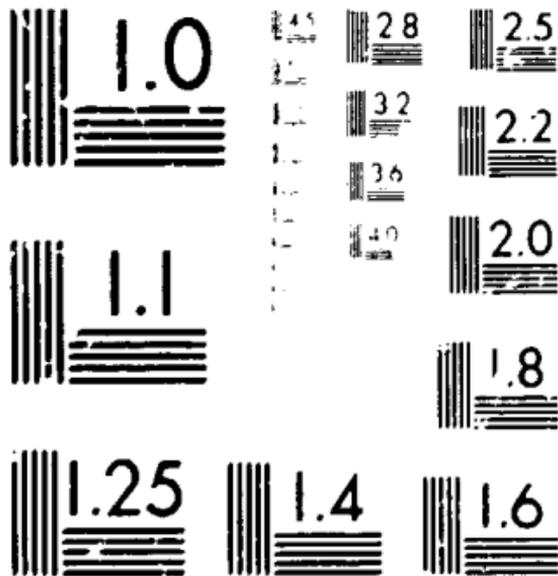
Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

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

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





MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS-1963-A

11095 - F

Distr. LIMITEE
UNIDO/IS.261
27 novembre 1961
FRANCAIS
Original: ANGLAIS

ORGANISATION DES NATIONS UNIES
POUR LE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL

L'IMPACT POTENTIEL DE
LA MICROBIOLOGIE
SUR LES PAYS EN DEVELOPPEMENT*

rédigé par
Carl-Göran Hedén**
Conseiller de l'ONUDI

602205

* Les opinions exprimées dans le présent document sont celles de l'auteur et ne reflètent pas nécessairement les opinions du Secrétariat de l'ONUDI. Ce document est la traduction d'un texte qui n'a pas fait l'objet d'une mise au point rédactionnelle.

** Professeur, Karolinska Institutet, Stockholm, Suède.

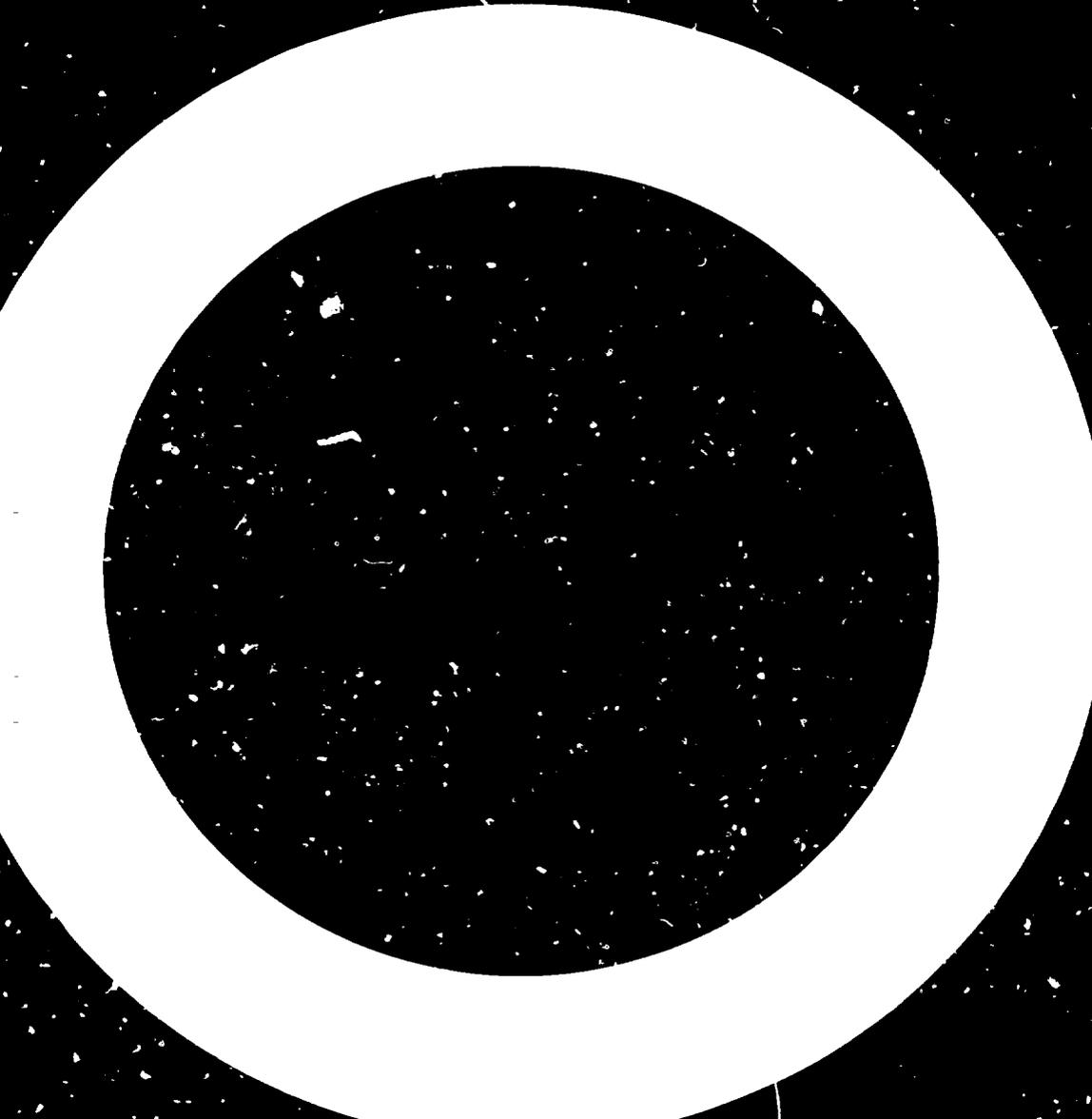


TABLE DES MATIERES

	<u>PAGE</u>
A. Introduction	1
B. Fondement de la préparation des décisions	3
1. L'importance accordée à la gestion des ressources et à la qualité de la vie	3
2. Ethique et politique scientifique	4
3. Biotechnologie pour le développement	5
4. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités	6
C. La Bioinformatique comme stimulant des Innovations	7
1. L'objectif de la bioinformatique	7
2. La génétique moléculaire comme source d'information	8
3. Les modèles biologiques des techniques industrielles	10
4. Les enzymes comme outils de précision	12
5. La conception et l'utilisation des sondes moléculaires	13
6. Les avantages et les risques de la bioinformatique	14
7. Les besoins d'information	16
8. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités	17
D. L'impact sur les peuplements humains de l'Interface entre la technologie des communications et la biotechnologie	18
1. Développement grâce à la décentralisation	18
2. La naissance de la "technologie de l'équilibre"	21
3. La biotechnologie et le développement rural	22
4. Vers des systèmes intégrés d'utilisation de la biomasse	24
5. La lignocellulose comme matière première chimique	26

	<u>PAGE</u>
6. La nécessité de nouvelles approches dans la coordination de la recherche orientée vers les objectifs	27
7. Le potentiel du recours à l'ordinateur	29
8. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités	31
E. COMBUSTIBLES	32
1. Le bois comme combustible	32
2. Les perspectives du biocombustible	34
3. Le biogaz	36
4. Le potentiel des systèmes intégrés de production d'énergie	37
5. Les carburants pour véhicules obtenus à partir de la biomasse	39
6. Progrès dans la production d'alcool industriel	40
7. La géomicrobiologie considérée comme moyen d'épargner l'énergie	42
8. L'élargissement des ressources disponibles en combustibles fossiles	42
9. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités	43
F. Engrais	45
1. Les micro-organismes et la fertilité du sol	45
2. La fixation biologique de l'azote	47
3. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités	47
G. Nourriture humaine et animale	48
1. La nécessité urgente d'une action	48
2. La maîtrise de la prolifération des insectes nuisibles	49
3. La microbiologie et la production de protéines animales	50

	<u>PAGE</u>
4. La prévention des pertes après la moisson	51
5. Les protéines microbiennes comme aliment	52
6. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités	54
H. Santé	56
1. Programme de bien-être pour les pays en développement	56
2. Un défi pour l'industrie de l'instrumentation	58
3. Tendances dans la production des vaccins	59
4. Le génie génétique pour la production de médicaments	61
5. Les possibilités de culture de tissus végétaux	63
6. L'utilisation de la technologie des enzymes pour la mise au point de nouveaux médicaments	65
7. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités	65
I. Industrie - Perspectives et dangers	66
1. La dimension actuelle et future de l'industrie des fermentations	66
2. La concurrence entre les procédés chimiques et biologiques	69
3. La biotechnologie et l'industrie alimentaire	69
4. La biotechnologie et les produits de remplacement	71
5. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités	72
J. La nécessité de politiques nationales des ressources biologiques dans les pays en développement	73
K. Remarques finales	76

A. INTRODUCTION

Cette étude a pour but d'explorer l'horizon de la microbiologie dans les domaines importants des interactions entre la génétique microbienne, la technologie des enzymes et la technologie des fermentations, susceptibles de transformer la biotechnologie en une force permettant les adaptations industrielles et les changements sociaux. Le rapport tente de faire une synthèse des impressions obtenues à la lecture de publications récentes, en discutant avec des collègues universitaires, en tenant compte des conclusions nées du silence éloquent des scientifiques qui sont obligés de protéger des informations confidentielles.

L'état d'avancement en microbiologie et en biotechnologie, ainsi que leur influence sur l'industrie, en particulier dans les pays en développement, seront envisagés sous cinq rubriques principales : les combustibles, les engrais, les nourritures humaines et animales, la santé et l'industrie. Toutefois, l'étude est précédée de trois chapitres généraux qui ont pour but de permettre au lecteur de se rendre compte des effets synergétiques qui prépareront le chemin des développements futurs. Le premier de ces chapitres définit la biotechnologie dans le contexte de son influence sur la vie sociale. Le second explique quelques faits biologiques essentiels et le rapport avec les progrès scientifiques et technologiques remarquables dans les domaines envisagés (génétique microbienne, technologie des enzymes et technologie des fermentations). Enfin, le troisième chapitre souligne la signification de ces domaines pour les pays en développement et, par conséquent, la nécessité d'un échange d'informations plus efficace et d'une coordination plus étendue des recherches ayant l'industrialisation pour objectif.

Il va de soi qu'un rapport succinct comme celui-ci ne peut envisager que superficiellement et d'une manière subjective les activités tournées vers l'avenir de quelque 70.000 microbiologistes et d'un nombre encore plus élevé de biochimistes, de biophysiciens, d'ingénieurs, de docteurs et de vétérinaires, ainsi que celles des innombrables fabricants de produits de bioconversion tels que le vin, la bière, le pain et le fromage. D'autre part, l'auteur a été obligé d'outrepasser les limites de nombreuses disciplines afin de présenter les tendances principales d'une manière propre à stimuler la discussion. Ces tendances ont fait l'objet d'une projection dans des scénarios alternatifs qui ont reçu un aspect plutôt provocant. Ces scénarios sont conçus essentiellement pour qu'on se rappelle que les progrès décisifs en microbiologie sont subordonnés aux impulsions engendrées par la politique et sont affectés par les décisions qui gouvernent les activités des écoles, des universités, des fermes et des usines. Par suite d'un réseau de complexité toujours croissante d'interactions et de subordinations, ces processus de décision ne sont pas particulièrement bien adaptés à la gestion de percées technologiques telles que celles qui se produisent maintenant rapidement dans les domaines mentionnés ci-dessus. En particulier, leur réaction a une tendance à être tardive quand il s'agit d'encourager le type d'innovations sociales qui peut devenir nécessaire si nous désirons optimiser l'influence des diverses inventions qui attirent maintenant l'attention dans le domaine de la biologie. Un examen de l'impact potentiel de la microbiologie peut donc aider à mettre en évidence certaines faiblesses essentielles de la politique internationale, de la science et de la technologie.

Il y a dix ans, l'entropie était un concept utilisé presque exclusivement par les physiciens, mais, maintenant que l'énergie est devenue un élément prioritaire pour ceux qui préparent les décisions, de nombreux économistes et écologistes recherchent leur inspiration dans la seconde loi de la thermodynamique. Cette loi nous rappelle que tous les systèmes fermés se dégradent inévitablement, par suite d'une perte d'ordre inévitable que nous appelons entropie. La vitesse de dégradation peut seulement être ralentie

en ouvrant le système fermé, et c'est pour cette raison que la connaissance des moyens permettant de réaliser occasionnellement cette ouverture est considérée maintenant comme un puissant facteur anti-entropique. Toutefois, si cette connaissance se limite à un seul système, elle est stérile, aussi détaillée qu'elle puisse être. Ce n'est que quand cette connaissance peut provoquer des interactions avec la connaissance contenue dans d'autres systèmes que les idées peuvent apparaître. Ceci est l'essentiel de l'entropie des idées : la pensée créatrice disparaît en proportion de la réduction de notre compréhension du monde qui nous entoure. Quand cette compréhension est laissée uniquement à des experts, il n'y a plus réellement que peu de possibilités de création pour l'homme moyen. Il est possible que les nouveaux horizons ouverts par le génie biomoléculaire permettront un nouveau départ vers une société plus juste et plus souple, où nous pourrons rendre visite à tous nos voisins sans éprouver un sentiment de supériorité et de culpabilité ou d'infériorité et de frustration. Si la microbiologie peut favoriser cet objectif, ceci constituera un progrès très important.

B. FONDEMENT DE LA PREPARATION DES DECISIONS

1. L'importance accordée à la gestion des ressources et à la qualité de la vie

L'attention que les mass media accordent aux remous provoqués par les actions visant à l'indépendance politique cache souvent le fait qu'une gamme de problèmes importants, ainsi que des forces économiques et techniques puissantes, sont orientés vers des niveaux toujours croissants d'interdépendance. Ces deux tendances engendrent des contradictions qui donnent lieu à des disputes qui, non seulement suscitent la désapprobation de nombreux jeunes de notre société, mais aussi empêchent de consacrer le temps voulu à l'examen de l'influence à long terme de la science et de la technologie. Cette question mérite d'être prise au sérieux car les progrès dans des domaines tels que la micro-électronique et la biotechnologie auront évidemment des conséquences profondes et

spectaculaires. Tant les pays riches que les pays pauvres se rendent compte que ces domaines de haute technologie accentueront la concurrence entre nations mais les problèmes difficiles qui se posent entre elles tendent à repousser à l'arrière-plan les possibilités d'utiliser ces techniques pour résoudre des problèmes communs essentiels.

Tant les séries d'études préparées par l'ONUOI sur les implications des percées technologiques récentes que le nouveau programme de recherche de la C.E.E., F A S T (Préviation et Evaluation dans les domaines de la Science et de la Technologie), s'efforcent maintenant de remédier à cette tendance à retarder les actions dans les domaines tels que ceux décrits dans le rapport GLOBAL 2000 adressé au Président des Etats-Unis (1980). Le programme considère par exemple les stratégies de recherche européennes dans le contexte d'une "bio-société" future, une expression qui reflète la toute grande priorité accordée au génie bio-moléculaire qu'un certain nombre de rapports gouvernementaux ont préconisé au cours des dernières années. Cet intérêt ne provient pas seulement du fait que les progrès dans les sciences de la vie ouvrent maintenant un chapitre nouveau et passionnant sur la place de l'homme dans la nature. Ces progrès permettent également une connaissance de la signification stratégique de la gestion des ressources et de la qualité de la vie. On souligne l'importance des ressources renouvelables pour satisfaire les besoins humains essentiels et le terme "qualité de la vie" illumine les connaissances biologiques, non seulement dans le cadre de la santé, mais également en tant que catalyseur de la créativité propre et de la confiance en soi.

2. Ethique et politique scientifique

La gestion de cette connaissance constitue un révélateur de la maturité de l'éthique qui gouverne la politique scientifique. La vague de récriminations qui a provoqué un moratoire de recherche quand sont apparus les techniques d'hybridation de l'ADN est actuellement en voie d'apaisement mais une seconde vague se prépare pour exprimer une préoccupation opposée - à savoir :

comment accélérer les applications utiles du génie génétique -. Cette vague traverse un certain nombre d'organisations non-gouvernementales qui posent maintenant des questions rendues urgentes par la large gamme des applications concevables. Dans sa conclusion devant un Congrès récent de Biotechnologie. (Eastbourne, 6-10 avril 1981), A. Humphrey a résumé le problème en citant son grand-père : " La question n'est pas de savoir s'il y a un chemin devant nous mais si nous sommes capables de le parcourir."

3. Biotechnologie pour le développement

Pour les pays en développement, le choix des priorités présente une importance particulière pour la détermination des programmes de biotechnologie. La biotechnologie a son centre de gravité situé dans la microbiologie appliquée et plus particulièrement dans la technologie des fermentations mais elle présente un aspect réellement multi-disciplinaire et pousse des racines profondes dans la biochimie et dans le génie chimique. La biotechnologie a été définie comme étant l'application intégrée de la biochimie, de la microbiologie et du génie chimique, afin de mettre au point des applications techniques des potentialités des microbes et des cultures de cellules de tissus. Son importance industrielle est soulignée par une autre définition la décrivant comme étant le traitement industriel des matériaux par les micro-organismes et les autres agents biologiques afin d'obtenir des biens et des services utiles.

Les laboratoires de microbiologie indispensables pour les recherches en fermentation et pour le génie génétique et enzymatique qui constituent la base de la biotechnologie moderne, sont relativement simples par comparaison avec les installations requises par la physique nucléaire ou la recherche spatiale mais sont très coûteux si on les compare plutôt aux moyens qui suffisaient pour la microbiologie médicale traditionnelle. Les procédés de production possèdent une grande adaptabilité, ce qui constitue une caractéristique intéressante qui les rend plus

dépendants du savoir que des capitaux. Ce fait suggère l'existence d'une chance pour les pays en développement mais souligne également l'importance de la bioinformatique, un sujet qui sera examiné dans le chapitre suivant.

4. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités

Positif

- Les gouvernements reconnaissent la nécessité d'utiliser la biotechnologie comme l'un des moyens de réduire la dette croissante des pays en développement, causée par les coûts croissants des combustibles
- A l'Assemblée Générale Spéciale des Nations Unies pour le Désarmement en 1982, les gouvernements se mettent d'accord pour un effort coordonné important en microbiologie, basé sur leur référence à l'article IX du traité sur la Guerre Biologique :
"Les Etats qui sont Parties à la présente Convention décident de faciliter et ont le droit de participer à un échange le plus complet possible d'équipement, de matériaux et d'information scientifique et technique en vue de l'emploi des agents bactériologiques (biologiques) et des toxines pour des usages pacifiques."

Négatif

- La microbiologie n'est pas considérée comme un facteur stratégique du développement.
- La fragmentation de la microbiologie dans le monde académique conduit à une concurrence coûteuse et à des impasses dues à la "dispersion" des percées technologiques en nombreuses disciplines subsidiaires.
- La sous-utilisation des organisations non-gouvernementales (ONG) gêne la mise au point d'un réseau efficace de coopération.
- Les progrès technologiques sont encouragés essentiellement dans le cadre de leur intérêt pour la concurrence entre les pays.
- Faute d'une attention appropriée des gouvernements, les problèmes de l'environnement, de la santé s'accroissent sans trouver de solution.

- Sous la pression de la crise, il devient évident que tous les pays doivent participer à une aide aux nations pauvres et que les nations industrialisées ont une obligation spéciale de consacrer leur programme de R+D au problème des pays en développement.

- La formation en biotechnologie est graduellement améliorée grâce à un enseignement précoce des sciences de la vie.

- L'information et la conscientisation des intéressés facilite la programmation de R+D en biotechnologie et les problèmes inhérents aux limites physiques et sociales à la croissance sont graduellement résolus.

- Les coûts sociaux de la pression démographique et des migrations sur grande échelle augmentent rapidement et il se produit une dévaluation graduelle et contagieuse de la vie humaine.

- Il existe de moins en moins de scrupules à utiliser les connaissances biologiques pour des buts de guerre.

C. La Bioinformatique comme stimulant des Innovations

1. L'objectif de la bioinformatique

Le terme bio-informatique a été proposé pour la zone d'interaction entre la technologie de l'information et les sciences de la vie y compris la biotechnologie. Dès que les moyens permettant de définir les caractéristiques fondamentales intrinsèques des micro-organismes et des autres cellules sous forme numérique sont devenus disponibles, cette zone s'est développée au point de constituer une activité de service importante.

Elle a donné naissance à une information structurelle et fonctionnelle sur les macro-molécules et les métabolites et a fait naître des modèles mathématiques qui décrivent les interactions dynamiques au sein des cellules et entre celles-ci. La bio-informatique aide donc l'écologiste microbiologique à comprendre les processus de digestion qui se produisent tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du corps et elle permet de montrer comment des phénomènes complexes dans le sol et dans l'eau peuvent être utilisés au bénéfice de l'homme et de la conservation des ressources. La bio-informatique apprend également à l'ingénieur des fermentations où trouver les meilleurs agents et substrats pour un objectif donné et quelles sont les stratégies de rétroaction qui sont les plus susceptibles d'obtenir le produit industriel désiré. Enfin, elle fournit une intelligence artificielle qui intègre une information provenant d'instruments divers sous forme d'étiquettes d'identification pour les bactéries (taxonomie numérique), ainsi que l'information permettant le diagnostic des docteurs et assurant un support informatique pour les biochimistes et pour les nombreux praticiens industriels de la microbiologie appliquée.

2. La génétique moléculaire comme source d'information

La bio-informatique a trouvé une nouvelle dimension quand on a compris que tous les processus biologiques dépendent de l'information génétique qui est stockée sous forme de code linéaire le long des gigantesques molécules en chaîne (ADN). Les codes sont universels. Ils sont constitués de quatre unités de base accouplées suivant un modèle caractéristique. Quelque 300 à 2.000 couples de ce genre constituent un élément fonctionnel d'information, c'est-à-dire un gène. Le nombre de gènes dans une cellule est déterminé par ses exigences fonctionnelles : un virus peut avoir besoin de quelque 35.000 couples des éléments de construction de base, une bactérie de quelque 35 millions et une cellule humaine peut-être de 35 milliards. Ceci donne lieu à de grandes différences quant à la longueur des plages d'information ainsi que quant à l'emballage et à la lecture des messages. Dans les cellules développées et hautement spécialisées, la plupart des instructions sont normalement tues au silence, à l'exception évidemment du petit segment qui est requis pour une fonction définie. En fait, chez les animaux

supérieures, les régions silencieuses ont pris une dimension croissante, si bien que la nature s'est trouvée dans l'obligation de concevoir des processus de découpage et de segmentation qui transmettent seulement des informations sélectionnées en vue de leur introduction dans les protéines telles que les molécules qui accélèrent les réactions spécifiques qui caractérisent la cellule en question.

De tels bio-catalyseurs, appelés aussi enzymes, fonctionnent très exactement comme outillage de production à commande numérique installé dans un groupe d'usines qui assure un échange d'outils, de sources d'énergie et de pièces préfabriquées. Tout comme les machines peuvent effectuer des millions d'opérations avant d'avoir à être remplacées, chaque molécule d'enzyme peut traiter de grandes quantités de matières avant d'avoir à être remplacée. Pourvu qu'on lui assure les matières premières appropriées, (sucre, graisse, etc.), et des sources d'énergie (lumière ou énergie stockée dans les liaisons chimiques), la cellule fait preuve d'une souplesse qui dépasse de loin tout ce qu'on connaît jusqu'à présent dans l'industrie. Par exemple, l'industrie ne peut pas réduire rapidement le nombre de machines pour adapter la capacité de production aux besoins du marché ou aux disponibilités en matière première. Une cellule microbienne peut réaliser cela en utilisant son magasin de molécules d'information et elle utilise également cette information pour se reproduire elle-même rapidement jusqu'à ce que le milieu environnant ait été épuisé, jusqu'à ce que les organismes concurrents aient pris le dessus. L'information la plus réussie qui est portée par un organisme ou par une combinaison d'organismes est donc continuellement sélectionnée et multipliée.

Les procédés de laboratoire mis au point pour augmenter la diversité génétique dans les populations microbiennes et pour améliorer l'efficacité de la sélection pour des objectifs utilitaires ont été utilisés depuis longtemps par les chercheurs en microbiologie appliquée. Ces procédés impliquent souvent la production de mutants par la destruction, par irradiation ou par produits chimiques, des mécanismes de commande que la cellule a élaborés au cours de milliers d'années afin de se protéger

contre le gaspillage d'énergie ou de matière . On produit donc ainsi un micro-organisme qui peut être utile pourvu qu'on lui fournisse le support nutritif approprié et qu'on le protège contre la concurrence par ses congénères plus adaptables grâce à un tube à essais ou à une boîte de fermentation.

Les ingénieurs génétiques sont maintenant en mesure d'exploiter le mécanisme métabolique de la bactérie pour produire des molécules qui lui sont étrangères. Ce fait a provoqué un grand émoi parce que ces micro-organismes peuvent être considérés comme créés par l'homme en ce sens que même s'ils sont déjà apparus précédemment dans la nature, leur nouvelle caractéristique ne leur aurait pas procuré un avantage suffisant pour que les molécules d'information correspondantes puissent subsister pendant longtemps.

3. Les modèles biologiques des techniques industrielles

Les nouvelles connaissances relatives au comportement des micro-organismes et des autres cellules soumises à des sollicitations ont influencé la technologie des fermentations, tout comme les résultats obtenus par les écologistes microbiologiques qui ont étudié la stabilité et l'adaptabilité des écosystèmes microbiens. Des cultures mixtes définies permettant de transformer des produits naturels en produits chimiques utiles sont sur le point d'apparaître et on signale continuellement de nouvelles méthodes pour utiliser les enzymes microbiens.

Ces faits mettent en évidence la nécessité d'efforts accrus pour contrôler le métabolisme des micro-organismes connus et pour une sélection à orientation utilitaire et une caractérisation des souches bactériennes isolées de leur environnement naturel. La rotation des molécules organiques s'effectue à une vitesse particulièrement élevée sous les tropiques, et cet écosystème pourrait bien représenter une des plus grandes ressources, encore inutilisées, que l'humanité pourra employer quand on pourra recourir à l'emploi de la biomasse et à la gestion des biocombustibles.

Quoique les progrès en biologie moléculaire aient été impressionnants au cours des dernières années, il reste encore beaucoup à apprendre au sujet des programmes de production que suit la cellule quand elle synthétise de larges molécules de protéines à partir d'un petit nombre d'éléments qui sont les acides aminés. La nature fournit ainsi des modèles qui suscitent la réflexion, tant pour une obsolescence planifiée que pour le stockage d'énergies et pour le recyclage des anciens éléments dans des nouvelles configurations. Les principes de rétroaction, les méthodes d'économie d'énergie et les procédés de recyclage utilisés dans l'industrie moderne présentent de grandes similitudes avec les solutions que la nature a mises au point par des méthodes de tâtonnements au cours de millions d'années. Toutefois, ce n'est que assez récemment que ces solutions naturelles ont attiré l'attention des conseils d'administration des grandes sociétés et des autres responsables, en-dehors des ministères de la Santé et de l'Agriculture. Par exemple, on a compris maintenant que la bio-dégradabilité des produits grâce aux micro-organismes offre un moyen de réduire les nuisances à l'environnement causées par les produits chimiques synthétiques. On commence à comprendre que la méthode de la nature d'ajuster toute une gamme de réactions l'une à l'autre sur des surfaces où le micro-environnement est exactement adapté à chaque étape pourrait finalement aider l'industrie chimique à se passer d'un grand nombre de centrifugeuses, de filtres et de réservoirs de floculation coûteux. La préférence de la nature pour les réactions en continu plutôt que par charges successives et sa capacité à atteindre son but sans produits chimiques corrosifs et sans températures et pressions élevées, nous donne en outre une indication quant à l'élimination possible des combustibles, des brûleurs et des échangeurs de chaleur et quant au remplacement de réservoirs, de pompes et de vannes coûteux, par un équipement plus simple réalisé en verre ou en plastique. D'autre part, on réduirait ainsi la vulnérabilité d'une installation grâce au travail sur une échelle plus petite et avec une gamme plus large de matières premières, ce qui pourrait bien compenser largement certains sacrifices acceptés quant à la vitesse de fabrication.

4. Les enzymes comme outils de précision

Les enzymes utilisés par les cellules microbiennes pour décomposer les grosses molécules ont été utilisés depuis longtemps dans des procédés industriels, mais quand il s'agissait de réaliser une synthèse, on devait recourir aux processus métaboliques de cellules entières, tout d'abord dans les procédés classiques de fermentation et, plus récemment, dans les systèmes immobilisés où la croissance des cellules est restreinte alors que leur métabolisme reste pratiquement intact. Toutefois, une meilleure compréhension des moyens par lesquels les cellules adaptent avec exactitude les apports d'énergie aux processus de synthèse ouvre maintenant la porte à de nouvelles solutions basées sur des constituants particuliers de la cellule. Ces solutions peuvent recourir soit à des enzymes fixés sur membranes ou aux molécules spéciales (co-enzymes) qui transfèrent des électrons entre les endroits de la cellule où l'énergie est soit utilisée soit stockée jusqu'à ce qu'elle devienne nécessaire. Il y a quelques années, on a découvert que l'électricité pouvait conférer une grande efficacité à certaines des molécules de transfert et aussi que certains constituants riches en énergie (ATP) pouvaient être produits par synthèse. Ces faits, ainsi que la découverte du fait que certaines réactions de bio-synthèse sont favorisées quand les enzymes fonctionnent dans des conditions de solvant anormales ouvrent de nombreuses perspectives nouvelles pour les procédés industriels. Le fait que les substances insolubles dans l'eau peuvent être attaquées par les cellules microbiennes même quand les microbes ne peuvent se multiplier, découvre un domaine entièrement nouveau pour la bio-synthèse. Par exemple, le cholestérol peut être oxydé par certaines cellules microbiennes, même quand celle-ci ont été mises en suspension dans le tétrachlorure de carbone. Le fait que des **substrats peu coûteux**, tels que le sucre, peuvent être utilisés pour régénérer les co-enzymes qui activent les processus essentiels de la vie, permet de remplacer des substrats coûteux par un "auto-stop" métabolique faisant appel à des cellules microbiennes dûment choisies.

Les connaissances acquises à propos du fonctionnement des biocatalyseurs pourront finalement conduire à la synthèse de molécules (synzymes) présentant une stabilité plus élevée que celle qui est désirable pour une cellule vivante. Les progrès récents dans l'immobilisation des enzymes sur des surfaces d'électrodes permettent de présumer raisonnablement qu'on trouvera des moyens d'ouvrir les liaisons chimiques de façon que les électrons puissent être éliminés efficacement sous forme d'un courant électrique. De telles "piles à combustible biochimiques" pourraient offrir de nouvelles solutions à la production décentralisée d'électricité à partir de matières premières facilement disponibles telles que les alcools, le méthane et l'ammoniaque. Ces progrès pourraient permettre aussi des nouvelles solutions pour la mise au point de nouveaux types d'analyseurs de l'environnement.

5. La conception et l'utilisation des sondes moléculaires

Des détecteurs à haute spécificité utilisant des enzymes pour détecter et mesurer de petites molécules organiques ont trouvé déjà des applications médicales et industrielles. Ceci constitue un exemple du type d'instrumentation qui élargit maintenant de manière continue les données disponibles pour la bio-informatique.

Des techniques physiques compliquées pour l'étude des grosses molécules ont été remplacées par des procédés immunologiques basés sur l'emploi d'anticorps purs (les molécules de défense du corps à haute spécificité) obtenus en fusionnant des cellules cancéreuses qui peuvent croître très rapidement avec d'autres cellules ayant la faculté de produire des anticorps qui fixent un seul antigène. De tels "anticorps monocloniques" peuvent être utilisés non seulement pour détecter et mesurer de très grosses molécules, mais ouvrent également de nouvelles perspectives industrielles à la recherche de nouveaux médicaments et à l'immunothérapie. Cette dernière peut être envisagée dans des cas (par exemple : cancer, rage, certaines maladies parasitaires) où les avantages obtenus dépasseraient largement le risque faible mais concevable que la préparation puisse contenir un virus cancérogène.

Pour le biochimiste, le plus grand intérêt de tels anticorps est toutefois la possibilité de les utiliser pour "pêcher" des molécules spécifiques dans les extraits bruts de cellules qui produisent des constituants utiles. On peut donc obtenir ainsi une substance pure pour l'analyse et pour l'emploi comme modèle dans la synthèse de la chaîne correspondante d'information génétique. Ceci peut être réalisé par des techniques variées dont certaines dépendent de l'emploi de robots de laboratoires élaborés.

La technique pour la détermination de la succession exacte des éléments de construction qui constituent un gène s'est développée aussi très rapidement au cours des dernières années. Grâce à la technique de l'ordinateur et à une instrumentation perfectionnée, il est actuellement possible de déterminer la structure de l'ADN à raison de 200 couples par jour. Ceci correspond à un polypeptide constitué de 67 acides aminés; il en résulte que le gène correspondant au polypeptide moyen (poids moléculaire aux environs de 35.000) peut être étudié en l'espace de quelques semaines. Par lecture inversée de cette information, l'ordinateur peut prédire également la structure de la molécule messagère qui transmet l'instruction du gène à l'emplacement de construction de la protéine dans la cellule. Il peut prédire également la succession des acides aminés du polypeptide qui sera finalement obtenu.

6. Les avantages et les risques de la bio-informatique

Les bibliothèques séquentielles sont en voie de développement progressif. Elles permettront de faire des prédictions quant aux positions où des enzymes spécifiques sont susceptibles de couper la chaîne d'ADN, indique comment devrait se présenter l'amorce moléculaire capable de "pêcher" les plages d'information désirées dans les cellules éclatées et, finalement, guider la construction de gènes qui seraient efficaces dans un micro-organisme particulier. Compte tenu de l'importance de telles bibliothèques ainsi que de collections contenant des cultures de cellules pouvant produire des anticorps ou des vecteurs monocloniques (un anneau d'ADN appelé plasmide ou un virus) choisis pour leur aptitude à "emballer" et à stocker de larges fragments d'ADN, une coopération internationale

plus importante est requise. Les informations et les matériaux contenus dans de telles bibliothèques et collections représentent le meilleur espoir d'acquérir une compréhension du développement des tumeurs, des maladies du métabolisme et des réactions d'auto-immunisation; de plus, elles assurent une stimulation de la microbiologie industrielle. Ceci est particulièrement vrai maintenant que les craintes initiales concernant les risques possibles se sont apaisées, ce qui est une conséquence des méthodes de confinement et de la disponibilité de bactéries productrices qui sont handicapées quant à leur métabolisme au point de ne pouvoir survivre en-dehors d'un environnement protecteur. Le génie génétique doit toutefois continuer à être soumis à une vigilance sévère, notamment compte tenu du fait que des composés hautement toxiques et leurs dérivés pourraient bien être produits dès que les séquences de leurs acides aminés pourront être utilisées comme un guide pour la synthèse de l'ADN. S'il en résulte un poison pour les insectes, l'effet pour la société peut être favorable mais on peut tout aussi bien obtenir un agent qui offrirait le moyen de franchir la frontière entre les armes biologiques et les armes chimiques. Les armes biologiques sont prohibées par un traité international mais ces traités peuvent très bien être méprisés par des groupes indépendants (mouvements de guérilla, combattants pour la liberté, terroristes et organisations criminelles). En tout cas, le fait que les guerres modernes paraissent pouvoir être conduites souvent par procuration évoque des perspectives inquiétantes dans un monde qui ne semble pas être capable d'établir une loi criminelle internationale pouvant nous prémunir contre l'abus de la science. Les gouvernements qui surveillent le traité des armes biologiques **devraient donc** contrôler les conséquences du génie génétique, par exemple la possibilité de modifier les caractéristiques de modification de certains agents pathogènes ou de confiner leur extension vers une cible définie en leur imposant des exigences particulières quant à leur métabolisme.

Des gènes isolés modifiés par synthèse d'une manière appropriée peuvent être attachés à un vecteur approprié de façon à former une particule qui a la capacité, non seulement de pénétrer une cellule microbienne mais également de la forcer à lire l'information

apportée et à la traduire en grande quantité d'un produit utile. La quantité produite dépend de l'efficacité du système de lecture et du nombre de copies de l'information génétique disponible pour la cellule, qui peut être souvent augmentée par une technique appelée l'amplification des gènes. L'ingénieur des fermentations peut donc recevoir ainsi des souches hautement productives, des souches produisant des molécules qui caractérisent les organismes élevés et des souches hybrides qui combinent les propriétés désirables de nombreux micro-organismes différents. La possibilité d'utiliser des substrats peu coûteux pourra certainement être combinée, par exemple, avec la possibilité de produire des hormones pour les plantes, des toxines pour les insectes et des antibiotiques pour les êtres humains et les animaux. Comme décrit dans les chapitres suivants, le génie génétique offre également de grandes possibilités d'économiser l'énergie (par exemple des fermentations avec protection biochimique ou écologique qui rendent superflue la stérilisation) et pour simplifier les processus en aval (auto-floculation, transfert d'un produit bactérien à un organisme filamenteux, fuite contrôlée des produits utiles etc.). En fait, le problème rencontré par les sociétés qui se spécialisent en génie génétique n'est pas d'obtenir des contrats mais de choisir intelligemment parmi les différents projets qui s'offrent à la réalisation.

7. Les besoins d'information

Deux clefs sont nécessaires pour ouvrir complètement le coffre au trésor de la diversité génétique représentée par le domaine des microbes qui constituent un quart du poids total de toute la matière vivante (tant plantes qu'animaux) du monde. L'une est l'équipement de la bio-informatique : information au sujet des techniques analytiques, méthodes de bio-synthèse et manipulations génétiques déjà citées ci-dessus et qui sont actuellement réalisées. Ceci comprend également l'information au sujet de la disponibilité des micro-organismes, des produits chimiques et de l'appareillage nécessaire. On peut citer comme exemples les services informatisés de résumés et les fiches de brevets, la Banque mondiale des données des micro-organismes (Brisbane) et la grande variété de listes

d'instruments disponibles dans le commerce, de produits chimiques et d'enzymes que le généticien micro-biologiste utilise comme outil pour conier, scinder et tronçonner l'information génétique. L'autre clef est l'équipement périphérique de la bio-informatique : l'information quantitative relative au métabolisme et les données analytiques qui caractérisent une grande variété de cellules et de molécules organiques ainsi que les modèles mathématiques qui représentent leurs interactions. Comme exemples, on peut citer les programmes d'ordinateur utilisés pour analyser les schémas de diffraction aux rayons X qui révèlent la structure des grosses molécules; les signaux du spectromètre de masse qui permettent de déterminer la composition de mélanges complexes de produits chimiques et la dynamique des interactions écologiques et du comportement des fermentations. Un effort gigantesque est requis pour trier et pour compléter cette information de façon que le génie bio-moléculaire puisse avoir sa pleine influence sur la société.

8. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités

Positif

- Equipement internationaux centralisés permettant, grâce à l'ordinateur, l'optimisation des fermentations, l'analyse séquentielle mécanisée des acides aminés et de l'ADN ainsi que la synthèse de l'ADN qui permettent de hâter l'apparition d'applications utiles.
- Des bibliothèques séquentielles et des collections de vecteurs, des agents pathogènes pour insectes et des clones valables de plantes et de cellules produisant des anticorps permet-

Négatif

- La gestion de la bio-informatique est considérée comme un élément de concurrence commerciale et nationale et le libre-échange d'informations est réduit.
- Le caractère et la qualité de la recherche académique libre souffre des restrictions imposées par une insistance excessive sur les applications pratiques.
- Les activités biotechnologiques dans les pays industrialisés sont tournées essentiellement vers les applications à haut niveau technique; les applications à bas niveau technique sont considérées

tent de stimuler les activités en biotechnologie.

- On assure la promotion d'études coordonnées dans des domaines tels que la stabilité des enzymes, la régénération des co-facteurs et le pré-traitement de la cellulose.

- Le contrôle des environnements à phases multiples, les mutations orientées, les organismes thermophiles et les mesures de lutte contre les risques industriels donnent des résultats spectaculaires.

- La combinaison de l'analyse mécanisée du métabolisme avec le traitement sur ordinateur introduit de nouvelles perspectives en écologie microbienne appliquée.

comme sans importance.

- L'indépendance des pays en développement s'accroît à la fois par augmentation du coût des marchandises et des techniques importées et à cause de l'émigration des scientifiques qui ne peuvent pas trouver des conditions de travail adéquates dans leur propre pays.

- Les collections de culture sont considérées comme des dépôts passifs et par conséquent ne donnent pas une impulsion à la génétique appliquée.

- Les opérations de sélection des recherches et la bio-technologie écologique (c.à.d. l'étude des populations naturelles la conversion de leurs résultats en applications pratiques) sont conditionnées entièrement par les problèmes des pays riches.

D. L'IMPACT SUR LES PEUPEMENTS HUMAINS DE L'INTERFACE ENTRE LA TECHNOLOGIE DES COMMUNICATIONS ET LA BIOTECHNOLOGIE.

1. Développement grâce à la décentralisation

Comme indiqué dans le chapitre précédent, les interactions entre les sciences de la vie et l'électronique engendrent évidemment une grande quantité d'informations qui va très rapidement élargir

les horizons de la microbiologie appliquée. Les pays en développement rechercheront donc dans cette masse d'informations toutes les données utiles à la résolution de problèmes tels que la planification du peuplement. Comme souligné par Jean-Jacques Servan-Schreiber dans son livre "Le Défi mondial" qui examine les problèmes de l'électronique et de la technologie des communications, le fait qu'il a fallu si longtemps pour qu'une évaluation de la technologie à orientation internationale puisse prendre naissance indique clairement que les horizons de notre programmation sont dangereusement bornés. Ceci montre également qu'il existe un grave danger que les lacunes de connaissances entre peuples et entre nations s'élargisse si rapidement que des conflits majeurs deviennent inévitables. Comme, dans un tel cas, chacun serait alors partie perdante, Servan-Schreiber plaide en vue d'un effort important, une sorte de Plan Marshall, qui pourrait aider les pays en développement à utiliser la technologie de la communication comme un chemin pour contourner les techniques à haute intensité d'énergie et avec dégradation importante de l'environnement qui ont caractérisé la voie d'industrialisation que nous connaissons actuellement.

Nous savons tous que ce processus présuppose une certaine centralisation et des méthodes de recherche coûteuses en capital, qui rendront décisif le facteur d'économie d'échelle. Il est certain que la fabrication des puces électroniques et de différents biocatalyseurs (micro-organismes et enzymes) dépend également du facteur d'échelle mais peut-être pas d'une façon aussi spectaculaire que ce que nous constatons par exemple dans les industries extractives et mécaniques. La contribution des produits dérivés de ces nouvelles technologies au développement de projets de peuplement centralisés pourrait bien aller à contrecourant de certaines tendances des bio-usines elles-mêmes vers une centralisation accrue et une dépendance économique.

Pour autant que les décisions politiques appropriées soient prises, il est même concevable que cet effet opposé à l'urbanisation pourrait constituer la contribution essentielle de la biotechnologie au développement de zones telles que l'Amérique latine où, déjà, plus de 60 % de la population vit à présent dans les grandes villes.

Les bidonvilles et les taudis engendrent le crime, les maladies et l'agitation sociale, ce qui ouvre la route aux forces de destruction mais, d'autre part, les maux sociaux tels que le chômage, qui semble être une conséquence de l'urbanisation, ne se limite certainement pas aux pays pauvres. Un coup d'oeil rapide à l'usage des stupéfiants, à la mortalité infantile, aux maladies vénériennes et à différents autres indicateurs tels qu'ils existent dans certaines villes des pays développés, nous rappellent avec insistance le fait que le produit national brut par tête d'habitant constitue une mesure très imparfaite de la qualité de la vie. Une réaction contre l'urbanisation a débuté aux Etats-Unis. Depuis 1970, la population des zones rurales a augmenté réellement de 40 % de plus que celle des centres urbains. Les gens semblent d'accord de travailler en gagnant moins. Ils ont reçu une meilleure instruction et leur productivité au travail est élevée. Par conséquent, les grandes sociétés sont incitées à établir des usines de production hautement perfectionnées dans des localités peu importantes. L'électronique tout comme la technologie des communications et des transports joue évidemment un rôle important dans ce processus mais les bio-industries produisant des aliments, des fibres et des produits pharmaceutiques apparaissent ici également à l'avant-plan. Cette nouvelle tendance a trouvé une expression politique à la fin de 1980 quand le Président Carter a reconnu que le mouvement "retour à la nature" était plus qu'une fantaisie passagère. Alex Mercure, secrétaire adjoint au développement rural, a rappelé également à ses compatriotes que les habitants des campagnes utilisent moins d'énergie même quand ils doivent voyager à longue distance, qu'ils brûlent du bois pour se chauffer; ils peuvent mieux utiliser l'énergie solaire et ils ne doivent pas faire autant de navettes que les gens qui habitent dans les faubourgs. Des opinions similaires ont été exprimées par des politiciens d'autres pays industrialisés et le groupe impressionnant de scientifiques et d'ingénieurs qui a présenté ses prévisions à long terme dans "Europe-2000" paraît accepter l'idée que la décentralisation est une tendance importante et que les technologies du bricolage ("les machines sont remplacées par les outils") retiendront de plus en plus l'attention.

2. La naissance de la "technologie de l'équilibre"

Dans le cadre de ces tendances générales, il est important de se rappeler que la bio-technologie a réellement deux centres de gravité : l'un à l'extrémité de haute technicité et l'autre à l'extrémité de basse technicité de la gamme des procédés de production. A l'extrémité à haut niveau technologique, nous trouvons des brasseries géantes, des usines d'antibiotiques et divers systèmes hautement élaborés pour la gestion des déchets. (réacteurs à tour, réacteurs à cycle de pression, usines à compost etc.). Ces installations sont normalement très dépendantes du facteur d'échelle et, contrairement aux fermentations alimentaires et aux méthodes de la microbiologie agricole, qui se situent à l'extrémité à basse technologie, elles ne sont pas susceptibles de beaucoup de souplesse.

Toutefois, si la tendance vers la décentralisation continue, il est possible qu'une fécondation croisée entre les technologies sophistiquées et les technologies simples pourrait créer un nouveau type de technologie de l'équilibre ainsi qu'une nouvelle génération de bio-ingénieurs écologiques. La technologie de l'équilibre est une extrapolation de la recherche de l'autonomie économique et de l'indépendance qui peut s'observer actuellement, tant au niveau du macrocosme (nations, régions et villes) qu'au niveau du microcosme (villages et familles). La foisonnement de maisons autonomes (compréant des fermes, des dispositifs à énergie solaire et à énergie éolienne, des unités de stockage et de chaleur etc.) donne matière à réflexion pour le bio-ingénieur qui est intéressé à l'intégration des procédés. ("Vers une société du démarreur et de la cartouche"). Bien entendu, il se rend compte que de telles innovations restent encore dans le domaine des bien nantis et/ou de ceux que passionnent ces questions. Mais elles peuvent aider à répandre dans le public certaines conceptions relatives à la nature d'une future bio-société et à stimuler l'intérêt en gestion industrielle pour la bio-productivité dans le contexte de la programmation du peuplement.

Un ingénieur écologique considèrera notre nourriture comme un ensemble unique provenant de ressources renouvelables fortement améliorées et il ne fera probablement pas la distinction habituelle entre PSU (protéines de cellule unique) : c.à.d. juste la matière première de la cellule) et PBM (protéine de la biomasse **microbienne** : masse cellulaire + le substrat résiduel). Il considèrera plutôt les protéines microbiennes non comme un but en elles-mêmes mais comme un constituant important des mélanges d'aliment pour le bétail, de façon à nous aider à atteindre un haut niveau d'indépendance économique, tant pour ce qui concerne la nourriture humaine et animale que pour les matières premières de l'industrie chimique. Ces dernières seront traitées par une succession de bio-conversions impliquant des micro-organismes ou leurs enzymes et, quand le potentiel catalytique de ces agents aura été épuisé, ils constitueront des sources importantes de protéines.

3. La biotechnologie et le développement rural

Le fait qu'une partie importante de la population mondiale vit encore dans ces deux millions de villages explique l'accent mis actuellement par de nombreuses agences des Nations-Unies sur le développement rural comme un moyen de renverser ou à tout le moins de ralentir la migration vers les villes. Les projets essentiels sont évidemment relatifs à la distribution plutôt qu'à la production mais ceci ne veut pas dire que les scientifiques, les ingénieurs et les inventeurs peuvent rester inertes et laisser aux politiciens le soin de résoudre les problèmes dans le cadre des forces économiques et des connaissances existantes relatives à la production d'énergie, à la gestion de l'eau et aux techniques agricoles. Après tout, les besoins varient d'un endroit à l'autre, si bien que, quoique les problèmes soient généraux, les solutions doivent être locales. Les experts des trois F critiques qui seront examinées dans les chapitres suivants (fuel, fertilizer and food, c.à.d. combustible, engrais et aliment) doivent par exemple tenir compte de programmes de production qui diffèrent fortement suivant les circonstances locales, même si ces programmes reflètent également ce que R. Critchfield a appelé une "culture universelle du village". Cette culture est d'un tissu très fragile, qui est facilement déchiré si sa capacité d'adaptation est débordée par des inventions inadéquates ou par des

technologies importées. Nous devons nous rappeler ceci quand nous considérons toutes les possibilités et les effets synergétiques qui résultent des progrès récents en génétique microbienne, en génie des enzymes et en technologie des fermentations. Ces domaines de la technique devraient néanmoins être investigués pour en extraire les inventions qui peuvent aider à satisfaire les besoins humains essentiels ainsi **que pour donner des impulsions** aux innovations sociales diverses pouvant permettre de combiner de telles inventions en un projet de développement cohérent. Au cours du dernier siècle, les forces économiques ont démontré leur efficacité en tant que générateurs d'inventions mais, quand ces forces sont aussi faibles qu'elles le sont dans les pays en développement d'aujourd'hui, ou lorsque l'influence d'une invention ne peut probablement se faire sentir qu'avec un long retard, il peut devenir indispensable de mettre au point d'autres générateurs tels que les distinctions honorifiques, les contrats gouvernementaux et les efforts orientés des Nations-Unies. Le fait que nombre de ces initiatives sont actuellement orientées vers le développement rural dans les pays pauvres, se justifie pour deux raisons : la première est que les besoins particuliers de zones de peuplement telles que les villages ne peuvent pas engendrer de forces économiques suffisamment puissantes pour entrer en concurrence avec les forces issues des centres urbains afin de capter l'attention des inventeurs et des investisseurs. La seconde raison est que les pays industrialisés sont liés par leurs investissements existants (en infrastructure, en éducation, en technologies bien connues, en organisations syndicales, etc.). Par conséquent, même si ces pays sont bien conscients de leurs besoins futurs et partagent l'opinion exprimée par un scientifique éminent comme le Prix Nobel Dennis Gabor, maintenant décédé, disant que "un programme satisfaisant pour la science et la technologie ne peut pas viser à autre chose qu'à un état d'équilibre dans lequel on utilisera seulement des ressources naturelles inépuisables ou renouvelables." Ils ne peuvent pas permettre à la micro-électronique, au génie des enzymes et à la technologie des fermentations d'exercer leur pleine influence. Gabor a demandé également : "Qui va subsidier les recherches consacrées aux problèmes qui deviendront impérieux dans trente ou cent ans, alors que le principe de la subvention des recherches est le 'cash-flow actualisé' ? Avec un taux d'intérêt de 7 %, un problème qui deviendra vital dans cent ans

est réduit à un millième de l'importance accordée à un problème actuel. Compte tenu des taux d'inflation d'aujourd'hui, on pourrait certainement se douter de la possibilité pour les pays industrialisés de mettre au point les technologies de l'équilibre dont ils auront besoin un jour. Peut-être que leur seule chance est d'apprendre en travaillant, c'est-à-dire en acceptant un effort de recherche important orientée vers la solution de quelques problèmes inquiétants auxquels les pays en développement sont confrontés actuellement.

4. Vers des systèmes intégrés d'utilisation de la biomasse

Quand nous parlons de sources alternatives d'énergie capables de remplacer les combustibles fossiles, la biomasse vient en tête de liste dans de nombreux pays industrialisés. Tant la fermentation des sucres en alcool que la production de biogaz à partir de déchets trouvent de nombreux défenseurs. Ceux-ci soulignent la réduction de la dépendance vis-à-vis de sources extérieures et les effets positifs que les sources locales d'énergie peuvent avoir sur la situation de l'emploi. Les considérations économiques jouent un rôle important dans ces argumentations mais elles sont basées normalement sur la technologie classique et ont tendance à envisager d'une manière plutôt superficielle le potentiel de la science et de la technologie, de préférence en leur attribuant un certain pourcentage arbitraire de croissance. Non seulement ces analyses négligent les percées technologiques en génétique et en biochimie mais elles tendent aussi à sous-estimer l'importance de nombreux facteurs tels que l'écologie microbienne et l'intégration des procédés qui présentent une importance critique pour l'avenir de la technologie de la bio-conversion.

Pour éclairer ce point de vue, nous considérerons le cas de la gestion des matériaux ligno-cellulosiques. Ceux-ci sont les produits les plus abondants fournis par la photo-synthèse et les écologistes microbiens les considéraient généralement comme si complexes qu'il fallait toute une gamme de micro-organismes pour réaliser leur transformation rapide et complète en produits chimiques utiles. Toutefois, ils ont découvert plus tard que des mélanges définis de micro-organismes caractéristiques peuvent

réaliser dans une grande mesure les dépolymérisations désirées et des scientifiques du Conseil National de la Recherche du Canada ont même réussi récemment à transformer la cellulose en méthane dans une culture mixte constituée seulement de trois micro-organismes croissant dans un milieu défini. En fait, il suffit d'un nombre assez restreint de micro-organismes pour réaliser la décomposition initiale de matériaux tels que le bois et la paille et nous avons maintenant une idée assez exacte des processus de décomposition réalisés par certaines moisissures actives.

Une des moisissures de la pourriture blanche, par exemple, offre au bio-ingénieur le grand avantage d'être tolérante à la température (croissance optimale à 38-39° C). Elle peut décomposer à la fois la cellulose et le ciment résistant du bois (lignine), et elle peut être traitée de façon à obtenir une gamme de mutants comprenant des souches qui ont perdu leur aptitude à décomposer la cellulose. Ces souches peuvent être utilisées pour disloquer des copeaux de bois de façon à économiser de l'énergie dans la fabrication mécanique de pulpe à partir de fibres cellulosiques pour l'industrie papetière. D'autre part, ces mutants peuvent présenter un intérêt considérable pour délignifier et dégrader la paille et la bagasse de canne à sucre, pour en faire une nourriture pour le bétail. Les souches naturelles seront toutefois préférées si l'objectif envisagé est la production de protéines parce que la cellulose sera également attaquée dans ce cas par les nombreux enzymes libérés par la moisissure. Cette souche de moisissure peut donc retenir l'attention, en concurrence avec d'autres micro-organismes qui sont utilisés maintenant pour convertir les sucres de la liqueur de sulfite usée en protéines pour alimentation animale. Une raison est que ce type d'organisme s'est montré particulièrement bien adapté à utiliser les eaux résiduaires de la fabrication thermo-mécanique de la pulpe comme substrat. L'eau blanche provenant d'une grande usine à papier journal peut contenir de 25 à 40 tonnes de substance soluble par jour (monomère, oligomère, lignine, etc.). L'Institut Suédois de Recherche pour les produits forestiers a mis au point un procédé continu de fermentation qui, moyennant un temps de contact d'environ 17 heures, transforme ces déchets indésirables en comprimés qui sont facilement séparés de la solution de culture par filtration. Utilisant les eaux rési-

duaires d'une usine de carton, ce procédé a été maintenant développé jusqu'à l'échelle de 25 mètres cubes, ce qui permet d'obtenir un aliment pour bétail qui a donné des résultats pratiques avantageux, en particulier pour les ruminants. Il va de soi qu'une grande économie d'énergie deviendrait possible grâce au recyclage de l'eau épurée par de telles techniques.

5. La lignocellulose comme matière première chimique

La biodégradation des matériaux lignocellulosiques s'effectue le mieux après un pré-traitement physique ou chimique. Ces techniques sont en voie de développement très rapide, principalement du fait des efforts importants accomplis à l'échelle mondiale pour trouver des substrats peu coûteux pour la production d'alcool industriel. Certaines des techniques utilisées sont particulièrement attrayantes car elles élargissent le domaine d'application des procédés intégrés mentionnés ci-dessus. En fait, ces techniques sont sur le point d'ouvrir la voie à l'emploi efficace de la lignocellulose comme matière première pour l'industrie chimique. Une solution très attrayante est l'explosion hydrothermale des copeaux de bois. Ceci rend possible la décomposition du bois en trois fractions : la matière soluble dans l'eau, qui contient une gamme de substrats microbiens; les fibres celluloses qui sont facilement transformées en glucose par les enzymes et, enfin, une fraction soluble dans l'alcool, contenant pratiquement toute la lignine. Comme avantage supplémentaire, cette dernière fraction est obtenue sous la forme d'un polymère thermoplastique qui présente un grand intérêt comme matière première pour l'industrie chimique. D'autre part, les microbiologistes proposent maintenant des enzymes plus efficaces et le fait qu'ils ont réussi à transférer dans le E - coli les gènes de la codification des enzymes qui attaquent la cellulose montre que le génie génétique est déjà entré en scène.

Il est évidemment très improbable qu'un seul micro-organisme puisse un jour être transformé pour en faire un super-producteur de tous les enzymes nécessités pour la décomposition des matériaux lignocellulosiques complexes. Il ne faudrait plus beaucoup de temps avant que des mélanges de super-producteurs nous fournissent des protéines nutritives à la fois à partir de la lignine et du glucose provenant du bois et de la paille. Il est difficile de prédire

lequel des micro-organismes gagnera la course pour la bio-conversion économique de la ligno-cellulose, mais il est probablement sage de tenir compte des concurrents imprévus que sont les microbes anaérobiques qui grandissent à ces températures aussi élevées que 72°C. Dans ce groupe, nous trouvons des micro-organismes capables de produire de l'alcool à partir de cellulose et d'autres qui peuvent utiliser une très large gamme de sucres comme substrats. Récemment, de nouvelles techniques de séparation ont été mises au point pour simplifier la recherche de candidats valables supplémentaires parmi les micro-organismes qui décomposent la ligno-cellulose dans la nature. Il est également raisonnable de prédire que la culture des tissus végétaux en vue de la croissance végétative sera bientôt appliquée dans des programmes de recherche visant non seulement à accroître l'efficacité de la photo-synthèse (réduction de la photo-respiration, etc.) mais aussi à faciliter les bio-conversions. Les travaux récents sur les produits féculents ainsi que sur le caoutchouc, le pétrole et les cocotiers, suscitent en effet un grand espoir. La culture d'un très grand nombre de petites plantes obtenues à partir de cellules provenant d'une plante-mère soigneusement sélectionnée ouvre en fait une nouvelle voie à l'horticulture et à la sylviculture, notamment grâce au gain de temps spectaculaire obtenu actuellement par rapport au temps requis pour la sélection par les méthodes ordinaires. Comme autre avantage, ces nouvelles techniques permettent aussi la production de cultivars exempts de virus de nombreuses espèces, y compris des producteurs importants d'amidon tels que le cassava.

6. La nécessité de nouvelles approches dans la coordination de la recherche orientée vers les objectifs.

Ces quelques exemples d'activités d'avant-garde relatives à la bio-conversion peuvent servir à nous rappeler l'importance potentielle de la bio-technologie pour transformer les ressources en bio-masse des pays pauvres en agents puissants du développement rural. Toutefois, nos méthodes académiques traditionnelles pour envisager les problèmes sont peu compatibles avec la nécessité d'un progrès rapide dans ce domaine et nos critères de sélection des domaines devant recevoir une priorité présentent aussi des insuffisances. Heureusement, l'expansion rapide du réseau mondial

de télécommunications montre que les temps seront bientôt mûrs pour une nouvelle approche de ce problème. Il y avait trois bonnes raisons d'avoir décidé une étude de faisabilité relative à la consultation de l'ordinateur et à l'utilisation de la bio-conversion comme modèle : *

1. L'expansion rapide des moyens de communication par satellite avec les pays en développement, jointe à la réduction du coût du "packet-switching" électronique, opposée aux services postaux dont le coût et le manque de fiabilité ne font que s'accroître.

Considérant différents moyens de promouvoir la coopération technologique entre les pays en développement, l'UNDP a demandé, il y a quelques années, au Service Inter-Press à Rome d'étudier cette question. A l'automne de 1979, cette organisation qui utilise un réseau de circuits complets de télégraphe et de canaux de duplex, a soumis un rapport qui montre que 95 pays en développement ont des liaisons par satellite déjà existantes en projet. Considérant le coût des segments d'INTELSAT et les recommandations faites par diverses conférences intergouvernementales, un tarif n'excédant pas 200 dollars US par mois pour un circuit exclusif à plein temps à deux directions, paraît être une hypothèse raisonnable à l'heure actuelle.

2. La nécessité d'améliorer la coopération internationale sans perturber les travaux techniques dans les pays en développement plus qu'il n'est nécessaire. La consultation de l'ordinateur procure évidemment un moyen de réduire les frais de déplacement sans mettre en danger l'efficacité de la coopération orientée vers des missions particulières.

3. La Banque Mondiale de Données pour les Micro-organismes et de nombreuses autres banques de données possédant des informations relatives aux problèmes de bio-conversion peuvent être utilisées maintenant comme des catalyseurs de la coopération. Divers organismes des Nations-Unies ont évidemment remarqué depuis longtemps que leurs efforts pour accélérer le processus de développement dans les pays pauvres était contrarié non seulement par les insuffisances d'infrastructure mais aussi par les difficultés de communication influençant le progrès du transfert de la technologie. Le programme UNISIST de l'UNESCO, par exemple, est consacré à l'interconnexion des systèmes d'information et l'ONU a établi une Banque d'Information Industrielle et Technologique. Certaines organisations non-gouvernementales ont également joué un rôle significatif dans ce domaine, en particulier le Centre International de Recherche et de Développement (IDRC) à Ottawa, Canada, qui a ouvert le voie vers une inter-

* Il s'agit d'une initiative conjointe du Centre des Ressources Microbiologiques de l'UNEP/UNESCO/ICRO (MIRCEN) et du Fonds International des Inventeurs (IIA), proposée par la Fédération Européenne de la bio-technologie et en préparation, grâce à des conférences organisées par l'Académie Mondiale des Arts et des Sciences (WAAS) et par le Centre International de recherche et de développement (IDRC).

action efficace entre les pays en développement en établissant un réseau basé sur des mini-ordinateurs, permettant l'échange d'informations relatives au développement et à la recherche ((MINISIS). La mise en route, grâce à des subsides accordés à cette organisation, de "Technonet Asia" a démontré l'importance d'un réseau de communications orienté vers les objectifs pour les pays en développement.

7. Le potentiel du recours à l'ordinateur

Dans de nombreux pays, l'emploi des lignes téléphoniques pour établir une communication verbale entre des individus fortement dispersés à un moment pré-déterminé, constitue une méthode courante. Ces contacts peuvent être améliorés en y ajoutant le télé-facsimilé pour la transmission de diagrammes, et, dans certains cas, des contacts visuels peuvent être établis au moyen de liaisons vidéo. L'emploi généralisé de ces facilités a été limité jusqu'à présent au personnel de R et D des sociétés multinationales et des établissements militaires ainsi qu'aux scientifiques travaillant principalement dans les domaines de la géophysique et des sciences de l'atmosphère. Toutefois, la croissance des banques de données intéressant de nombreuses autres sciences a fourni une contribution significative à l'établissement de terminaux dans de nombreux grands instituts de recherche et dans des bibliothèques universitaires. En conséquence, il existe donc déjà un réseau mondial de base qui demande seulement l'addition marginale d'équipement informatique et de méthodes de programmation pour permettre le développement de la consultation par ordinateur. Même dans ce cas, les problèmes résiduels relatifs à la standardisation et aux restrictions administratives aux communications ne devraient pas être sous-estimés. La consultation par ordinateur représente la solution par excellence de l'interaction par télécommunication. L'ordinateur est localisé au Centre, où il sert comme dispositif de stockage et de distribution des informations. Des liaisons de communications en émanent vers des terminaux disponibles pour les correspondants qui peuvent soit consulter les participants ou les personnes responsables pour établir des contacts téléphoniques locaux ou encore des ateliers de travail. Ces contacts présenteraient une importance particulière pour les pays à faible infrastructure et où il existe peu de

comités, de Conseils de recherche et d'organisations académiques et professionnelles pouvant assurer des contacts intellectuels, comme c'est le cas dans toutes les sociétés industrialisées. Dans les sociétés où le système de telex et de téléphone sont très développés, le principal intérêt de la consultation par ordinateur réside dans le fait que les experts intéressés peuvent transmettre leur message ou demander les commentaires de tous les autres participants à un moment et avec une fréquence de leur choix et avec un minimum de difficultés dues au problème linguistique. La participation engendre également un sentiment de satisfaction parce que les opinions peuvent être échangées avec d'autres experts à des intervalles plus rapprochés que ce ne serait possible grâce à des réunions de personnes très occupées. Normalement, ce genre de personnes apprécie tout particulièrement l'absence de bavardages inutiles et le style direct qui caractérisent la communication par un terminal. De plus, le risque de contestation relative à la priorité dans les domaines d'avant-garde est éliminée grâce aux rapports de conférences imprimés. Enfin, la consultation par ordinateur constitue une fonction auxiliaire importante, notamment en assurant un accès à la fois direct et indirect aux banques de données possédant une information relative au thème de la consultation.

Il est certain que les correspondants utilisant les terminaux d'un réseau tel que décrit ci-dessus joueront un rôle important d'agents de liaison. Non seulement ils aideront à construire des passerelles entre les scientifiques et les ingénieurs dans les pays en développement mais ils assureront aussi le même rôle pour les experts surchargés de travail du monde industriel. Ils permettront aussi de mettre en contact des personnes ayant à résoudre des problèmes semblables et ils élargiront la participation dans la recherche des voies par lesquelles il faut orienter les efforts des ingénieurs génétiques et des bio-techniciens. Les participants à des groupes de télécommunication orientés vers des objectifs pratiques joueront aussi un rôle important en assurant un accès progressif à l'abondance toujours croissante des banques modernes de données. "Progressif" est un mot essentiel ici parce que la créativité, qui est une condition sine qua non pour la mise au point de technologies appropriées, est facilement détruite par une

surcharge d'informations. Toutefois, la créativité indigène serait certainement stimulée si un micro-biologiste d'un pays en développement pouvait introduire des questions comme les suivantes dans un réseau de communications : Quel est le revêtement qu'il faut utiliser pour un digesteur construit en ciment de sissal ? Quels sont les matériaux bon marché absorbant la lumière qui peuvent être ajoutés à la bière alimentant une chaudière à alcool solaire ? Quels sont les essais de mycotoxine, etc. qui peuvent être effectués avec un appareillage portatif pour les besoins d'un village ?

3. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités

Positif

- La superficie limitée de l'Europe, l'infrastructure développée et les traditions en matière de coordination des recherches permettent à la Fédération Européenne de la Biotechnologie de prendre la tête en ce qui concerne l'emploi de la consultation par ordinateur comme un outil pour accélérer les études de la bio-conversion applicable aux pays en développement.

- On se rend mieux compte que la bio-technologie peut avoir à la fois un marché intermédiaire assuré par des industries primaires sur grande échelle et un marché final secondaire caractérisé par des installations à petite échelle.

Négatif

- Leur non-participation à la préparation des décisions décourage les experts et prépare le voie pour des mesures réglementaires excessives et des attitudes anti-intellectuelles, en particulier pour ce qui concerne le génie génétique.

- Des manifestations spectaculaires d'opposition sont provoquées par des accidents dus à des négligences grossières en matière de sécurité industrielle.

- Les schémas de croissance économique et de consommation augmentent les servitudes, tant pour les individus que pour les nations.

- L'analyse de l'énergie et des considérations écologiques stimulent le développement d'une technologie de l'équilibre basée sur des systèmes intégrés de recyclage pour utiliser les déchets, la chaleur à bas niveau thermique et l'anhydride carbonique.

- Les heurts entre le matérialisme des sociétés industrielles et l'intérêt post-industriel mis sur le potentiel intérieur de la personne provoquent une modification des programmes d'instruction. La biologie appliquée est considérée de plus en plus comme un moyen d'utiliser intelligemment son temps libre.

- La gestion efficace des récoltes et la mécanisation augmentent les coûts en énergie et aggravent le chômage rural.

- Le coût social des bidonvilles et des taudis devient excessif.

- Les pressions démographiques dépassent la capacité acceptable pour les systèmes biologiques et gênent leur capacité à se régénérer.

E. COMBUSTIBLES

1. Le bois comme combustible

Pour une grande partie de la population du monde, le bois est le combustible le plus important mais, si les tendances actuelles se poursuivent, à la fois la couverture forestière et les plantations artificielles en vue de la production de bois commercial dans les pays en développement auront diminué de 40 % en l'an 2.000. En 2020, pratiquement toutes les forêts physiquement accessibles dans les pays en développement auront disparu. Les produits à base de bois deviendront plus coûteux et l'augmentation attendue des prix

du pétrole limitera la pénétration du kérosène comme combustible de remplacement pour le bois. En de nombreuses parties de l'Afrique, le bois est déjà si rare qu'un membre de chaque ménage rural doit être utilisé pour la récolte du bois et, dans les villes, 20 à 30 % des revenus de la famille sont consacrés à acheter du bois. La déforestation abaisse également le niveau de la nappe aquifère, augmente l'importance des inondations, provoque des gaspillages de sols et l'envasement des fleuves, des réservoirs, des barrages hydro-électriques et des travaux d'irrigation. En combinaison, tous ces facteurs ont une influence nocive sur la productivité biologique et, à long terme, réduiront aussi la diversité et la vigueur de la réserve génétique représentée par les espaces végétales et animales qui perdent maintenant leurs habitats, en particulier dans les forêts tropicales. Des centaines de milliers d'espèces, peut-être jusqu'à 20 % des espèces existant sur terre sont en péril, si les tendances présentes se poursuivent. Si l'on ajoute à ceci les effets perturbateurs éventuels sur l'agriculture et l'industrie forestière des teneurs accrues de l'atmosphère en anhydride carbonique et en oxydes de soufre, par suite de la combustion des combustibles fossiles, il devient évident qu'une gestion efficace des biocombustibles devient un problème essentiel à l'échelle mondiale. En effet, ce combustible peut être produit presque partout, assure le recyclage de l'anhydride carbonique, contient peu de soufre et capte l'énergie solaire sous une forme qui peut être stockée, transportée et facilement reconvertie en chaleur.

Dans les pays industrialisés, la suppression des bottins téléphoniques, l'introduction de journaux électroniques et l'emploi étendu de mémoires magnétiques, tout comme un recyclage généralisé du papier et l'emploi de certains produits de substitution dans le secteur de la construction pourront certainement contribuer à épargner du bois mais ces avantages seront probablement annulés par l'utilisation accrue du bois comme matière première pour l'industrie chimique.

2. Les perspectives du biocombustible

La bio-technologie influencera l'emploi de la biomasse comme combustible de trois façons : en augmentant la quantité de biomasse disponible, en améliorant sa transformation en combustibles adaptables et en réduisant la pression exercée sur les sources d'énergie existantes (procédés d'économie d'énergie et récupération améliorée des combustibles fossiles).

La quantité de biomasse qui peut être utilisée comme combustible dépend du niveau de la bioproduktivité et de l'efficacité du recyclage. Ces deux facteurs peuvent être influencés par la bio-technologie, comme le montre la liste suivante, d'ailleurs incomplète :

- Culture de tissus végétaux et recherche de convertisseur efficace d'énergie solaire parmi les algues et les bactéries photo-sensibles.
- Systèmes intégrés pour l'emploi optimal de l'énergie provenant des forêts et du milieu aquatique.
- Production de jeunes plantes ayant reçu d'avance leur dose d'engrais et de produits de protection ainsi que de culture de germes assurant la photo-synthèse.
- Dispositifs de retenue permettant un emploi efficace de l'eau et de l'anhydride carbonique pour la croissance des végétaux.
- Inoculants microbiens pour améliorer l'emploi des engrais du sol tels que le phosphore et pour stimuler la fixation biologique de l'azote.
- Agents de contrôle biologiques assurant la protection des cultures produisant des produits énergétiques.
- Gestion de la biomasse de façon à ce que le contenu en énergie de tout matériau résiduel après l'extraction de nourriture humaine, d'aliments pour le bétail, de fibre et d'huile et/ou après la digestion par l'animal, puisse être réutilisée de manière efficace.

Cette dernière méthode est d'une importance particulière car elle peut aider à contrebalancer la tendance à utiliser des aliments (maïs, betteraves et tubercules) comme substrat pour la production d'additifs ou de produits de remplacement de l'essence. L'assurance du pain quotidien pour le pauvre ne devrait pas être détruite au profit de la sécurité d'approvisionnement en carburant pour les groupes sociaux à haut revenu d'un pays donné.

Il existe différentes techniques qui permettent la conversion de toute la biomasse, soit en gaz, soit en différents types de combustibles liquides ou solides (p.ex. charbon de bois). Toutefois, comme ces techniques demandent une matière première à teneur en eau relativement faible et des teneurs élevées et uniformes, elles sont coûteuses en capital, bien que des dispositifs de gazéification mobiles et assez simples ont montré depuis longtemps leur utilité pour alimenter des moteurs à combustion interne. En fait, certains experts prétendent que ces dispositifs peuvent encore être compétitifs vis-à-vis des systèmes biologiques au niveau du village et peuvent donc constituer un produit approprié pour la production dans les pays en développement.

Les produits de fermentation tels que le méthane et les alcools offrent toutefois une solution alternative pour la conversion d'une large gamme de matériaux en combustibles très divers. Outre les récoltes de végétaux contenant de la fécule et donc riches en énergie, il faut considérer aussi l'utilisation des déchets provenant des sucreries, des distilleries, des raffineries d'huile végétale et des industries alimentaires, tout comme d'ailleurs, aussi, les ordures ménagères. Un certain nombre de convertisseurs efficaces utilisant l'énergie solaire et ne demandant que des ressources marginales, demandent également une considération attentive. On peut citer comme exemple, la jacinthe d'eau, une plante nuisible dont la productivité est impressionnante (en effet, on a signalé une production de 850 kg par hectare et par jour en poids sec!) d'autre part, le varech géant, l'herbe à éléphant et les algues alimentées à l'aide des eaux résiduelles assurent une production d'énergie utile.

Comme une telle biomasse présente souvent une teneur en eau assez élevée, la bioconversion est a priori beaucoup plus intéressante que la conversion physique; elle permet aussi de réduire les coûts d'évacuation des déchets. La digestion orientée vers la production de biogaz est particulièrement importante car elle peut se réaliser tant à grande échelle qu'à petite échelle et aussi car elle peut être utilisée pour traiter toute une gamme de matières qui constituerait autrement une nuisance (matière fécale) ou bien un gaspillage de ressources utiles (perte d'énergie et d'azote).

3. Le biogaz

La production de biogaz (méthane dilué par l'anhydride carbonique) a l'avantage d'éliminer le problème de la séparation qui ne peut pas être évitée quand on prépare des combustibles liquides. Toutefois, son emploi sur des engins mobiles est limité lorsque le gaz est produit à une si petite échelle que la compression en bouteilles deviendrait trop coûteuse. Il est donc utilisé pour la cuisine et pour l'éclairage quoique des utilisations à la ferme puissent comprendre à l'occasion l'alimentation des tracteurs et des pompes à eau par des gazogènes facilement transportables. Ces gazogènes ont aussi été utilisés comme digesteurs, mais il reste beaucoup de recherches à effectuer avant qu'on ne puisse concevoir de façon optimale les matériaux et la conception du réacteur. Les études en cours sur les procédés à étages multiples, à flux ralenti, à lits fluidisés et expansés, sur les réacteurs à film fixe etc. montrent que l'on peut concevoir des systèmes simples mais efficaces assurant une stabilité plus grande et une production plus importante avec une conversion plus poussée que ce qui est possible actuellement avec les digesteurs construits à petite échelle. Ceci constitue un défi tant pour les ingénieurs, qui doivent mettre au point des méthodes simples pour maintenir la température appropriée et les conditions hydrauliques requises, que pour les microbiologistes. Ces derniers doivent toujours se rappeler que la production efficace du biogaz demande l'action séquentielle de micro-organismes qui doivent être présents dans la proportion appropriée, même si leurs caractéristiques de croissance sont différentes.

Si les conditions requises sont réunies, jusqu'à 70 % de l'énergie de combustion de la matière organique peut être transformée en méthane. (Avec les déchets provenant de l'élevage du bétail, on peut produire environ 4,5 litres de gaz par litre de matière traitée et par jour). Mais quand les substrats sont dilués, ils demandent des digesteurs de plus grandes dimensions et, quand la proportion de solides est élevée, les besoins en énergie pour le mélange et le pompage augmentent, la formation de mousse peut devenir un problème et les concentrations optimales en ammoniacque et en acides organiques qui sont produits dans le processus peuvent être difficiles à maintenir exactement. Toutefois, de nouveaux types de réacteurs à film fixe, sans agitateur, ont été mis au point récemment pour le traitement du fumier de porc, au Conseil National de la Recherche du Canada. On peut en conclure que des réacteurs simples et efficaces peuvent être conçus pour supporter des variations importantes de charge et de température. Pour la conversion sur une très grande échelle des ordures ménagères, il existe aussi de nouvelles techniques permettant l'extraction du gaz. Un traitement anaérobie sur grande échelle des eaux d'égout avant que les matières organiques ne soient oxydées et remises partiellement en circulation, offre également des perspectives très prometteuses en tant que moyen efficace de récupérer le nitrate et le phosphore.

4. Le potentiel des systèmes intégrés de production d'énergie

Vingt à septante pour cent des matériaux traversant un digesteur sont détruits et ce pourcentage peut être augmenté par une dislocation mécanique avant la fermentation ou par un pré-traitement avec un acide, un alkali ou des enzymes. Un équilibre approprié de alimentations en substrat et l'emploi de cultures de démarrage convertibles (par exemple à effet de floculation ou de collage aux surfaces) peuvent aussi augmenter l'efficacité. A long terme, le génie génétique peut permettre aussi de créer des cultures mixtes stables, adaptées pour le traitement de déchets spécifiques ou de plantes vertes choisies pour leur efficacité en tant que convertisseurs biologiques de l'énergie solaire. Il peut s'agir par exemple de plantes marines alimentées par les

eaux d'égouts ou par les eaux des profondeurs, riches en matière nutritive. Cette dernière solution est particulièrement intéressante car elle permet l'utilisation simultanée du gradient thermique de l'océan. Ce gradient thermique peut permettre de faire tourner une turbine produisant de l'électricité pour le pompage, de faire fonctionner une chaudière à vide, produisant de l'eau douce et un système d'aquaculture produisant des protéines de haute valeur, telles que les crevettes.

D'autres types de systèmes intégrés de production d'énergie ont également été préconisés. L'un d'eux envisage la combustion des algues produites à partir des eaux d'égouts, dans des étangs peu profonds au-dessus de feuilles de polyéthylène flottantes de grandes dimensions. La combustion s'effectuerait dans un système magnétohydrodynamique qui fixerait l'azote et les cendres seraient renvoyées dans les étangs comme engrais. Une autre conception est relative à l'emploi de réservoirs de croissance pour algues, permettant la production d'hydrogène. Dans ce cas, les cellules seraient transférées vers un réacteur où leur système d'enzyme pourrait décomposer l'eau avant que les cellules épuisées ne soient ou bien régénérées ou bien digérées.

D'autres systèmes de photolyse biologique sont plus élaborés et demanderaient trop de temps à être mis au point. Toutefois, il faut noter que le dispositif de photo-synthèse provenant des plantes fonctionne encore un certain temps après son immobilisation sur des films lorsque l'énergie de la lumière, utilisée normalement par la plante pour fabriquer des hydrates de carbone à partir d'anhydride carbonique, alimente en énergie un enzyme microbien capable de décomposer l'eau. Ce procédé, évidemment, fournit de l'oxygène tout comme l'hydrogène et comme de nombreux constituants du système sont très sensibles à l'oxydation, il faut consacrer beaucoup d'efforts à la stabilisation des molécules actives et à la conception de dispositifs comportant des compartiments séparés pour le dégagement de l'oxygène et de l'hydrogène. Les progrès sont rapides dans ce domaine, tout comme d'ailleurs les développements de dispositifs efficaces pour stocker l'énergie de la lumière dans la biomasse des algues. Les taux d'efficacité dépassent de loin tout ce qu'on connaît en agriculture. Alors qu'une plantation à bonne efficacité énergétique comportant des arbres à croissance

rapide, ne peut pas produire beaucoup plus de 15 tonnes par acre et par an (environ 9 millions de litres d'alcool), la production d'algues est capable d'atteindre 50 tonnes par acre et par an (environ 70 millions de litres d'alcool), et certaines variétés peuvent produire aussi des hydrocarbures à des taux de concentration élevés.

5. Les carburants pour véhicules obtenus à partir de la biomasse

Comme les plantations aquatiques produisant de l'énergie, les fermes terrestres produisant de l'énergie appartiennent au domaine de l'avenir (dans certains pays : déjà de l'avenir proche), il s'agit ici essentiellement de saules, de peupliers, et d'autres arbres à croissance rapide. La canne à sucre et certaines récoltes telles que le maïs et le cassava produisent déjà aussi des substrats permettant une conversion en alcool industriel. Au Brésil, le niveau de production est actuellement de 4 milliards de litres par jour et on pense qu'il atteindra 11 milliards en 1985. Le jus de canne est le substrat principal mais on utilise aussi la mélasse et le cassava. Tout comme la patate douce, les ignames et le taro, le cassava est une source importante d'amidon sous les tropiques. Des fruits tels que le banane le citron, les pommes et les raisins peuvent servir également comme substrats de fermentation pour une gamme de produits s'étendant de l'alcool industriel à bas prix jusqu'à des boissons coûteuses. Le premier est utilisé principalement à l'heure actuelle, comme carburant pur pour les moteurs à combustion interne, comme additif à l'essence ou comme produit de remplacement des additifs classiques destinés à améliorer l'indice d'octane. En principe, toutefois, il peut servir aussi comme matière première pour la production de petites molécules telles que l'éthylène et l'acide acétique ou pour produire des polymères tels que le polyéthylène et le PVC.

Le butanol est un autre produit de fermentation qui reçoit actuellement une attention particulière comme étant l'un des additifs possibles à l'huile pour moteur diesel. De nombreuses huiles végétales peuvent également être utilisées dans les moteurs diesel et ceci souligne l'importance de différents enzymes microbiens qui peuvent améliorer l'efficacité avec laquelle ces huiles peuvent être extraites tout comme des systèmes intégrés de production d'énergie

où les produits résiduels peuvent être réutilisés.

6. Progrès dans la production d'alcool industriel.

Vu que le point de départ dans la production d'alcool industriel est l'amidon, le broyage humide est normalement la première étape car il permet la séparation de sous-produits valables (gluten et huile de maïs), broyage suivi par un chauffage qui disloque les grains d'amidon et par un traitement à l'acide et/ou à l'enzyme qui produit du glucose. Les progrès dans ce domaine ont déjà atteint un point tel que l'amidon devient rapidement concurrentiel par rapport au sucre de canne, même si celui-ci apporte avec lui une source d'énergie supplémentaire (bagasse) qui peut être utilisée pour les procédés de distillation.

Le sucre subit normalement une fermentation avec la levure mais il a été démontré que des productivités plus élevées peuvent être atteintes grâce à certaines bactéries capables de recevoir des vecteurs d'ADN provenant d'autres bactéries (ceci constitue, dans ce contexte, un rappel du rôle du génie génétique). Depuis 1978, des travaux de recherche importants ont été consacrés à la création de plasmides bactériens pouvant transporter un indicateur de gène chromosomiques de la levure et qui peut être amplifié dans le E.coli avant d'être inséré dans les cellules de la levure. Ces travaux ont été essentiellement concentrés sur le transfert de gènes à partir d'animaux supérieurs, de façon à ce qu'ils présentent une stabilité élevée, mais on peut supposer que des souches capables de traiter directement par fermentation l'amidon, la cellulose et le lactose seront finalement mis^{es} au point. D'un intérêt particulier serait une cellule de levure modifiée de façon à convertir les sucres à 5 et 6 atomes de carbone avec la même facilité.

Le fait que certaines bactéries qui grandissent bien à des températures très élevées transportent des plasmides qui sont stables au cours d'une culture continue, indique aussi la possibilité de mettre au point des fermentations industrielles pour la production d'alcools à hautes températures. Ceci est très important pour assurer une séparation économique de l'alcool à partir de la bière, tout comme l'emploi de cellules qui tolèrent des concentrations élevées en sucre (> de 25 %) et en alcool (> de 12 %)

ou de solvants pouvant être utilisés à la place de la distillation pour récupérer le produit utile.

A ces missions qui sont à confier, évidemment, aux spécialistes du génie génétique, il faut ajouter la recherche de caractéristiques souhaitables qui serait compatibles avec une conception peu coûteuse et efficace des réacteurs, tels que des lits contenant des cellules ayant une bonne efficacité, même quand elles sont immobilisées avec des densités très élevées dans ou sur des supports divers (par exemple des copeaux de canne à sucre ou des perles de gel provenant de polymères extraits de certaines plantes marines). Ces systèmes présentent généralement la forme de colonnes où le substrat (par exemple le jus de pamplemousse ou le mou de malt d'orge) s'écoule en courant continu à une extrémité alors que le produit utile (par exemple, une boisson alcoolique) sort à l'autre extrémité. La vitesse de passage est réglée de façon à ce que tout le sucre soit utilisé, et est de quelques heures. Ces colonnes peuvent rester stables pendant des mois si les cellules de levure sont régénérées après quelques semaines grâce à une solution nutritive.

Des systèmes semblables peuvent également traiter les déchets liquides, tels que ceux des fromageries ou bien la liqueur de sulfite usée venant des papeteries. Les déchets solides provenant de l'agriculture ou du papier doivent d'abord être solubilisés mais, comme déjà mentionné précédemment, il existe un grand espoir que cette opération puisse finalement se réaliser à bon marché et efficacement grâce à des enzymes microbiens. Ceci ouvrirait la voie vers des systèmes simples capables de produire des combustibles liquides utilisés dans des marchés captifs tels que des réseaux locaux d'autobus ou les machines agricoles. Le fait que même l'alcool industriel produit à partir de matériaux facilement transformables tels que le sucre ou l'amidon requièrent encore des subsides gouvernementaux ou une aide fiscale afin d'être concurrentiels par rapport aux combustibles liquides classiques, démontre toutefois que de grands efforts sont encore requis avant que la voie de la fermentation puisse être choisie pour produire des combustibles liquides réellement compétitifs à partir de la lignocellulose.

7. La géomicrobiologie considérée comme moyen d'épargner l'énergie.

Les nombreuses possibilités offertes par la bio-technologie pour économiser l'énergie de transport et de production en introduisant des techniques originales de production et des équipements de fermentation, sont envisagées dans d'autres chapitres de cette étude. Toutefois, le potentiel de la microbiologie en tant que moyen d'économiser l'énergie qui serait requise autrement pour assurer la concentration ainsi que pour allonger la période de disponibilité des ressources en combustibles fossiles disponibles mérite d'être soulignée car le génie génétique est susceptible d'influencer ces deux domaines. On sait par exemple que des bactéries améliorées en vue de la lixiviation de minerais tels que ceux de cuivre et d'uranium peuvent être mises au point. Certains micro-organismes sont également très efficaces pour concentrer le phosphore et d'autres assurent un enrichissement en éléments rares de valeur, qui peuvent être récupérés à partir des cendres lorsque les cellules ont été incinérées. Même la très faible concentration en uranium de l'eau de mer pourrait éventuellement donner lieu à une récupération économique. D'autres micro-organismes encore produisent des polymères ayant une capacité remarquable de fixer les métaux lourds, un fait important si l'on envisage les problèmes d'environnement causés par ces métaux quand ils ont été dispersés par l'accroissement des activités industrielles et spécialement par une consommation accrue de combustible^s fossiles. Toutefois, on peut aussi mettre un certain espoir dans le fait que les micro-organismes pourraient aider à éliminer un élément nuisible des combustibles fossiles, même avant leur combustion; il s'agit du soufre.

8. L'élargissement des ressources disponibles en combustibles fossiles.

Enfin, il faut noter que la bio-technologie pourrait jouer un rôle d'une importance croissante dans l'extraction des réserves restantes de combustibles fossiles de la planète. La plupart des puits de pétrole vides, par exemple, contiennent encore de grandes

quantités de pétrole, emprisonnées dans une roche poreuse. Comme cette roche est normalement calcaire, la production d'acide par voie microbienne peut être utilisée pour produire de l'anhydride carbonique qui forcerait les gouttelettes d'huile hors de la roche. Il existe aussi certains produits microbiens qui diminuent la viscosité de l'huile et les spécialistes du génie génétique ont déjà commencé à mettre au point des bactéries ayant la combinaison désirée de propriétés. Un polysaccharide bactérien particulier a été déjà envisagé depuis longtemps pour la récupération tertiaire du pétrole mais la température élevée qui règne dans la plupart des puits de pétrole constitue une difficulté supplémentaire, comme le fait que le micro-organisme en question est un agent pathogène des plantes. Toutefois, les progrès possibles dans ces domaines sont si vastes que de grands efforts visant à surmonter ces obstacles seront probablement acceptés. Ceci est vrai également pour ce qui concerne la recherche de micro-organismes capables de décomposer le pétrole brut à basse température et de composés bon marché de l'azote et du phosphore qui pourraient enrichir le substrat à l'interface pétrole/eau.

La production et l'emploi de micro-organismes qui utilisent les composés carbonés des racines des plantes en échange contre les minéraux et l'eau rendus mobiles dans le sol pourraient aussi devenir un facteur important pour la régénération des sols endommagés par l'extraction en surface du charbon. De telles activités agissant sur le milieu peuvent présenter une importance croissante comme moyen de surmonter certaines oppositions du public à certains aspects de l'emploi des combustibles fossiles.

9. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités.

Positif

- Efforts de recherche coordonnés pour améliorer la technologie du biogaz et pour rendre les matériaux lignocellulosiques attrayants comme matière première pour la production de combustibles liquides.

Négatif

- La technologie existante du biogaz est considérée comme définitive ou du moins suffisamment bonne pour les usages agricoles. Elle est considérée comme insignifiante dans les budgets nationaux de l'énergie.

- L'expérience obtenue avec les plantations de végétaux riches en énergie permet de les rendre également attractifs comme source de matières premières pour l'industrie chimique.

- Les coûts accrus des végétaux et les améliorations dans la technologie des serres et dans l'AEC (Agriculture à Environnement Contrôlé) **rendent intéressant le recyclage** de l'anhydride carbonique et l'emploi de la chaleur perdue provenant des usines de fermentation et des cimenteries.

- La nécessité d'intégrer la production d'énergie avec le recyclage des minéraux et la fixation de l'azote est reconnue par tous.

- Le démarrage d'activités industrielles requiert l'évaluation des effets sur l'environnement tout comme l'évaluation des effets sociaux.

- La gestion des gaspillages de pétrole et la récupération tertiaire du pétrole sont grandement améliorées par des procédés microbiologiques.

- L'opposition aux plantations produisant de l'énergie est due à leur importance limitée dans les budgets totaux de l'énergie. Leur importance comme étape vers l'emploi de biomasse comme matière première est considérée comme négligeable.

- Les possibilités d'économiser l'énergie **par intégration** sont négligées parce qu'elles ne sont pas compatibles avec les méthodes classiques de programmation de l'habitat.

- Les tendances vers la décentralisation sont neutralisées par des modes ou des caprices.

- Le "panier global du grain" se rétrécit progressivement parce que les moissons sont détournées de leur usage normal en vue de produire de l'alcool industriel.

- Une appréhension croissante à propos des dégagements de CO₂ et de SO₃ donne lieu à l'improvisation de programmes mal préparés et très coûteux.

- La photosynthèse microbienne dans des zones confinées des eaux océaniques prend une importance croissante vu que les plantations terrestres en vue de l'obtention d'énergie sont refoulées dans des zones marginales où la plantation, la récolte, l'irrigation et la fertilisation deviennent plus difficiles.

F. ENGRAIS

1. Les micro-organismes et la fertilité du sol

La signification des processus de digestion pour la production du méthane a été mentionnée dans le chapitre précédent. Leur importance pour l'obtention d'engrais peut même devenir plus grande dans les zones où manquent des quantités notables de combustible fossile et les capitaux requis pour la production des engrais par les méthodes classiques. Ceci devient évident si on considère la situation d'un fermier indien produisant 30 m³ de biogaz par jour à partir de 50 kg de matière fécale humaine et animale. Les eaux résiduaires provenant de l'équipement simple requis pour cette opération peuvent être utilisées pour l'irrigation ou pour l'élevage des poissons et la boue ainsi produite possède un potentiel fertilisant correspondant à l'emploi annuel d'environ 100 kg d'urée, 250 kg de superphosphate et 50 kg de phosphate de potassium. Comme la boue est un produit organique, elle améliore la structure du sol et libère les éléments nutritifs assez lentement. Elle aide aussi à maintenir l'humidité du sol et réduit les pertes d'eau, par conséquent elle contrebalance deux conséquences nocives d'une agriculture intensive.

Ceci tend à négliger l'emploi d'engrais inorganiques à dissolution lente à cause de leur prix et appauvrit aussi l'écologie du sol à cause d'un emploi excessif de produits chimiques agricoles. Ce sont là les deux causes principales, parmi de nombreuses autres, de la désertification qui progresse actuellement au taux de 8 millions d'hectares par an. (un taux qui pourrait avoir augmenté de 20 % la surface mondiale des déserts au cours des vingt prochaines années).

Comme indiqué dans le chapitre précédent, la bio-technologie pourrait finalement mettre au point des systèmes biologiques perfectionnés capables de capter l'énergie solaire dans les zones désertiques mais il existe un certain nombre de possibilités plus immédiates pour combattre la désertification. Certaines sont relatives à des micro-organismes qui aident à la survivance d'espèces de plantes empêchant la désertification, d'autres concernent la culture de tissus végétaux utilisés comme moyen rapide de développer des espèces supportant les sols acides ou alcalins, les concentrations élevées en sel ou les longues périodes de sécheresse. De telles plantes pourraient bien être aidées par des micro-organismes capables de fixer l'azote de l'air, de compléter le système racinaire de la plante ou de lutter contre les agents pathogènes. Le génie génétique pourrait jouer un rôle important dans ces progrès mais il existe aussi un certain nombre de méthodes dont l'application est immédiate. Elles comprennent la production et la distribution d'agents inoculants efficaces pour les graines des plantes ayant élaboré des systèmes spéciaux de protection et d'alimentation des fixateurs symbiotiques appropriés de l'azote et pour utiliser l'azote qui, par ces plantes, est extrait de l'air (soya, arachide, alfa, trèfle, etc.). Ces systèmes ne se limitent pas aux espèces végétales communément exploitées mais peuvent également se retrouver chez d'autres, dans certains cas en collaboration avec des micro-organismes qui ont été cultivés seulement très récemment. Il existe de toute évidence ici un vaste domaine pour les innovations scientifiques des généticiens des végétaux et des microbes et des microbiologistes industrielle qui doivent répondre au défi de la production sur grande échelle d'agents inoculants stables. Des fixateurs d'azote autonomes tels que certaines algues sont déjà utilisés comme engrais.

2. La fixation biologique de l'azote,

Dans une perspective à long terme, on peut concevoir que les gènes assurant la codification des enzymes qui contrôlent la fixation de l'azote et leur introduction dans les racines des plantes pourraient être mises à profit pour les cultures des principales céréales. Des vecteurs, comme les virus des plantes ou un certain plasmide bactérien qui cause des tumeurs dans les plantes pourrait être utilisé alors mais il resterait à résoudre un certain nombre de problèmes difficiles et on ne pourra jamais éviter le fait que le processus de fixation dépouille la plante d'une quantité importante de ses produits de photo-synthèse. On sait maintenant qu'une bactérie a besoin de plus d'une douzaine de gènes pour fixer l'azote de l'air mais il reste encore beaucoup à apprendre concernant les gènes végétaux qui jouent un rôle dans l'acceptation et la protection des bactéries actives.

3. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités

Positif

- L'analyse régionale de l'énergie a une grande influence sur la programmation de la production des engrais.
- Des inoculants de Mycorrhiza stabilisés sont produits et distribués sur une large échelle pour compléter les couples de plantes et de fixateurs d'oxygène ayant une efficacité assurée.
- La mise au point coordonnée de réacteurs de biogaz

Négatif

- Les servitudes énergétiques dues au développement de la production d'azote inorganique ne font que s'accroître.
- Les pertes de sol et de phosphore ainsi que les effets négatifs sur l'environnement des oxydes d'azote et des métaux lourds associés à l'emploi d'engrais contribuent à augmenter l'affrontement entre la grosse entreprise et les écologistes.

plus efficaces et plus simples est facilitée par des avantages fiscaux basés sur la production d'engrais.

- Un recyclage à cycle court réduit les besoins engrais.

- On introduit de nouvelles céréales avec fixateur d'engrais.

G. NOURRITURE HUMAINE ET ANIMALE

1. La nécessité urgente d'une action.

La surface de terre arable aura augmenté seulement de 4 % en l'an 2000, alors que la production de produits alimentaires devrait augmenter de 90 % au cours des années allant de 1970 à la fin du siècle. Cela signifie que la majeure partie de l'augmentation est attendue de l'emploi plus intensif de technologies telles que les engrais, les pesticides et l'irrigation. Les prix réels des aliments doivent par conséquent doubler à peu près et comme l'essentiel de l'accroissement de production devrait être destiné aux pays dont la consommation alimentaire par tête d'habitant est déjà assez élevée, la situation pourrait ne s'améliorer que très peu en Asie méridionale ou dans de vastes zones à bas revenu de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. La consommation par tête d'habitant dans les pays de l'Afrique sub-Saharienne devrait probablement décroître. Ceci signifie que la vulnérabilité aux irrégularités climatiques, aux fluctuations économiques et aux difficultés de distribution des aides alimentaires ne fera que s'accroître. Le volume de l'aide alimentaire peut également être réduit par suite de facteurs tels que l'emploi, sur une grande échelle, des céréales pour la production d'alcool pour moteurs et par une appréhension croissante concernant les pertes de sol et les effets nocifs sur l'environnement dans les pays producteurs. Si l'on considère non seulement les pertes de vies causées par

les femmes mais également le fait qu'une alimentation insuffisante peut empêcher les enfants d'atteindre un état normal de développement physique et intellectuel, il est évident que des efforts coordonnés importants deviennent impératifs.

Dans les chapitres précédents, on a cité quelques exemples de microbiologie appliquée à la bio-productivité, par exemple la possibilité d'augmenter la valeur, comme aliment pour le bétail, des produits de déchets agricoles ou de fournir au sol des éléments nutritifs pour la plante. Toutefois, il existe de nombreux autres domaines de production de nourriture humaine et animale où la microbiologie appliquée et la bio-technologie devraient jouer un rôle significatif : contrôle biologique des insectes, médecine vétérinaire, technologie des produits après la moisson et des aliments et, enfin, la production de protéines à cellule unique (PCU).

2. La maîtrise de la prolifération des insectes nuisibles

Un emploi accru des pesticides paraît être une condition sine qua non pour permettre un accroissement rapide des récoltes, en particulier dans les pays en développement, où l'on s'attend à ce que l'emploi des pesticides quadruple au moins pendant la période 1975 - 2000. Toutefois, les pesticides non-dégradables ont déjà des effets nuisibles sur les élevages de poissons dans certaines parties de l'Asie et 15 des 25 espèces principales d'insectes nuisibles existant dans les fermes de Californie sont devenues actuellement résistantes à un ou plusieurs types de pesticides. Ce fait, joint à une forte diminution des ennemis naturels des insectes nuisibles et à une perte importante d'insectes utiles pour la pollinisation, rend probable le fait que l'on donnera une attention croissante à l'emploi d'agents microbiens attaquant une gamme étroite d'espèces à combattre. Ces agents ont déjà démontré leur grand intérêt dans la lutte contre de nombreux vecteurs de maladies qui limitent les zones disponibles pour la production de viande (mouches tse-tse) ou qui réduisent ou qui réduisent la capacité de travail des personnes (moustiques de la malarial). On n'a certainement que l'embaras du choix parmi les agents pathogènes à choisir : 100 espèces de bactéries, 700 virus, 300 protozoaires, et un grand nombre de nématodes; mais quelques-uns

seulement ont déjà fait l'objet d'études de la part des biotechniciens. Actuellement, la production sur grande échelle de nombreux agents pathogènes des insectes est encore assez difficile et les essais de contrôle-sécurité doivent évidemment être très approfondis.

Toutefois, il existe peu de doute que des efforts coordonnés des biotechniciens, des spécialistes de la microbiologie appliquée et du génie génétique puissent offrir de nombreuses nouvelles voies pour permettre un contrôle amélioré des insectes. On pourrait même envisager l'emploi d'agents chimiques résistants pourvu que l'on dispose d'agents microbiens efficaces pour assurer la décontamination. Des études récentes indiquent que des souches spécialisées peuvent même être développées pour désactiver le 2, 4, 5-T et même des produits chimiques redoutables, comme la dioxine. Une bactérie qui cause des tumeurs dans les plantes présente aussi un grand intérêt pour l'introduction de gènes contrôlant non seulement la résistance aux insectes et aux agents microbiens mais aussi aux herbicides.

3. La microbiologie et la production de protéines animales.

Le génie génétique assurera certainement à la médecine vétérinaire la possibilité d'utiliser de nouvelles hormones, des vaccins et des antibiotiques qui pourraient avoir un effet assez spectaculaire sur la production de lait, de viande et de poisson. Citons comme exemple l'hormone de croissance des bovins, mise récemment au point, qui devrait permettre d'augmenter la production de lait de 10 à 20 %. Un autre exemple est une souche de coli qui a été transformée en agent efficace contre la diarrhée des veaux et des cochons. Certains antigènes du virus de la stomatite aphteuse ont également été obtenus dans les coli mais leur utilité est quelque peu douteuse si l'on tient compte de l'efficacité des vaccins qui peuvent être produits avec une relative facilité en lots de plusieurs milliers de litres de cellules de tissu en suspension.

La possibilité de manipuler les micro-organismes dans le tractus digestif des herbivores suggère des possibilités prometteuses d'accroître la production de lait et de viande. Après tout, le

rumen est un digesteur efficace et une bonne partie de l'énergie contenue dans les aliments du bétail est dégradée sous forme de méthane. Des antibiotiques non toxiques, ayant une action spécifique sur la partie produisant du méthane de la population bactérienne pourrait donc avoir une grande importance.

D'autre part, l'accroissement rapide des connaissances de la chimie des sites, permettant aux bactéries d'adhérer aux muqueuses du corps, permet d'imaginer assez raisonnablement la possibilité d'inoculer à la naissance des micro-organismes taillés sur mesure, capables de produire des acides aminés essentiels, de décomposer des composés indésirables tels que les toxines des moisissures et peut-être même de fixer l'azote.

4. La prévention des pertes après la moisson

Plus de 60 % de tous les fruits, légumes et céréales subissent une certaine dégradation microbienne. Dans les pays industrialisés, ceci peut être évité par le recours à l'énergie pour le séchage, le chauffage, le transport rapide, le maintien de chaînes du froid et la production et l'emploi de matériaux d'emballage appropriés et d'agents anti-microbiens. Comme exemples de ces derniers, on peut citer la plasticidine S, la kasugemycine, la valydamicine et les polyoxines. Les agents utilisés en médecine sont évités dans les **techniques de production** et de préservation des aliments, pour ne pas courir le risque de créer des agents pathogènes qui résisteraient à la thérapeutique. Toutefois, ils ne manquent pas de composés pouvant être envisagés pour des applications non-médicales. On connaît environ 40.000 antibiotiques mais environ 40 seulement sont utilisés sur une large échelle. Finalement, il faut souligner que la pression maintenue en vue de l'abaissement du prix des aliments, grâce à des économies d'échelle, a conduit à des contacts très étroits entre les fermiers et les spécialistes de l'industrie alimentaire, ce qui constitue un important facteur de qualité pour les produits. Il va de soi que ce modèle intensif en capital ne peut pas être facilement transposé dans les climats chauds où les transports sont lents, les fermes petites et le chômage très répandu.

Les pays pauvres ont de nombreuses raisons d'utiliser le potentiel de la microbiologie appliquée qui leur offre, par exemple, de nombreuses techniques d'ensilage permettant de transformer des matières organiques périssables en nourriture pour le bétail, stable et riche. Il existe aussi de nombreux processus de fermentation des aliments permettant d'économiser l'énergie en réduisant les durées d'ébullition, d'éliminer des constituants indésirables, de préserver le produit et d'améliorer sa valeur nutritive et sa saveur. Ces techniques qui, normalement, sont dépendantes de populations naturelles de micro-organismes, ont joué longtemps un rôle important, en particulier dans l'Asie du Sud-Est. Toutefois, certains cas d'empoisonnement des aliments et une variabilité importante de nombreux produits ainsi obtenus, montrent que la production et la distribution d'agents inoculants sûrs et puissants, pourrait jouer finalement le même rôle que les amorces de fermentation utilisées maintenant pour produire du fromage, du yoghourt et du vin. Des fermentations rapides et contrôlées des aliments qui permettraient d'éviter les procédés de salage, qui tendent à rendre certains aliments inutilisables pour les enfants, pourraient par exemple avoir un effet significatif sur les possibilités de nutrition. De nombreuses autres technologies alimentaires, mentionnées rapidement dans un chapitre ultérieur (I), consacré aux méthodes industrielles, pourraient également être transformées en technologies appropriées pour les pays pauvres, même si elles sont actuellement orientées avant tout vers les besoins réels ou supposés des pays industrialisés du monde.

5. Les protéines microbiennes comme aliment.

Quelques-uns des produits mentionnés ci-dessus appartiennent à la catégorie PBM (Protéines de la Biomasse Microbienne) car ils contiennent des quantités importantes de substrats. Dans les PCU (Protéines à cellule unique), d'autre part, les micro-organismes jouent un rôle absolument dominant par rapport au substrat dont ils sont normalement enrichis. Dans ce cas, le substrat peut être les n-alkanes liquides ou gazeux dérivés du pétrole ou il peut être constitué de simples sucres et d'alcools ou même d'anhydride carbonique et d'hydrogène. Normalement, les cultures pures de bactéries, de levure ou d'algues sont utilisées pour des procédés de ce genre mais des cultures mixtes bien définies peuvent donner satisfaction.

Le domaine des PCU fait déjà l'objet d'études actives depuis plus d'un quart de siècle et une protéine de levure a été utilisée à des degrés divers dans l'industrie alimentaire depuis un temps considérable. Jusqu'à la crise pétrolière de 1973, il existait un espoir très répandu de pouvoir satisfaire tous les besoins futurs et possibles d'une population mondiale en croissance grâce à la conversion microbienne des hydrocarbures en protéines. Dans certains pays producteurs de pétrole, ce substrat retient encore l'attention car un constituant de ce type dans des systèmes intégrés de production d'aliments pour l'homme et les animaux, pourrait permettre d'économiser l'eau et d'augmenter l'auto-suffisance en oeufs, en volaille, en veau et en bœuf. Toutefois, dans d'autres parties du monde, l'accent est mis maintenant sur l'amidon, les sucres et l'alcool comme substrats, partiellement à cause de la crise pétrolière mais aussi à la suite de l'échec de certaines usines importantes utilisant les n-alkanes et fonctionnant au Japon et en Italie. Dans certains de ces cas, le contrôle des produits peut avoir été inadéquat mais, dans d'autres, l'arrêt des projets a été dû, évidemment, à des raisons plus politiques qu scientifiques. En fait, peu de produits alimentaires actuellement sur le marché répondent aux conditions rigoureuses de qualité qui sont appliquées même aux PCU alimentées en produits animaux. On peut toutefois supposer raisonnablement que les PCU basées sur les alkanes peuvent revenir à l'ordre du jour si leur substrat ne devient pas trop rare. Cette possibilité a évidemment été prise en considération lorsque plusieurs sociétés ont décidé d'envisager le méthane comme une alternative possible. Le méthane peut être utilisé directement par certains micro-organismes et peut être aussi converti chimiquement en méthanol qui peut être obtenu de manière très pure; on a ainsi une bonne source de carbone pour certaines bactéries de levure. En fait, une usine à échelle industrielle, ayant une capacité de production de 50.000 à 70.000 tonnes par an est actuellement exploitée avec plein succès par ICI au Royaume-Uni.

Il est peu douteux que les PCU obtenus à partir d'une grande variété de substrats abondants constitueront une source importante d'aliments pour le bétail à l'avenir. Comme de nombreux micro-organismes peuvent être incités à produire de l'amidon en complé-

ment aux protéines, il est donc permis de dire que les limites de l'approvisionnement du monde en nourriture sont politico-économiques et non techniques. Il est même possible d'imaginer des usines de fermentation flottantes, construites dans les pays industrialisés et remorquées jusqu'à des emplacements où le substrat (par exemple le méthane des champs pétrolifères) est abondant. D'un point de vue purement technique, les pays producteurs de pétrole tout comme de nombreuses nations industrielles pourraient réduire fortement leurs prélèvements sur les sources mondiales de matières premières pour la préparation d'aliments pour le bétail : les protéines de soya et la farine de poisson. Le premier produit provient principalement des Etats-Unis et du Brésil, ce qui souligne un déséquilibre géographique qui s'ajoute aux problèmes géo-politiques relatifs à la localisation des principales zones productrices de céréales. D'autre part, la farine de poisson est une source de protéines qui provient des prises mondiales de poisson qui peuvent difficilement être augmentées et qui devraient aussi être transférées dans une plus large mesure au profit de la consommation humaine. Les PCU constituent déjà une option importante pour l'URSS et l'Europe orientale; d'autre part, des augmentations des prix des protéines de soya doivent être attendues lorsque la culture atteindra des zones marginales et où d'autres produits importants des graines de soya, tels que l'huile, rencontreront une concurrence croissante de la part de l'huile de palme et des autres huiles végétales. Tout ceci est de nature à accélérer la production de PCU dans de nombreuses autres parties du monde. Trouvant son point de départ initial dans la production d'aliments pour bétail, la PCU devrait graduellement s'imposer aussi en alimentation humaine, peut-être par la voie de produits de remplacement de la viande, un domaine où la technologie alimentaire a réalisé de grands progrès au cours de la dernière décennie.

6. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités

Positif

- L'industrie alimentaire prend progressivement une orientation scientifique

Négatif

- Les technologies importées accélèrent la production des cultures industrielles et

et les progrès dans la conception des installations et la technologie chimique ouvrent la voie vers des produits de remplacement de la viande peu coûteux et savoureux, obtenus à partir de protéines végétales et microbiennes.

- Des accords gouvernementaux relatifs à la politique des prix du sucre et de l'amidon aident de nombreux pays en développement et simplifient la programmation des investissements pour les industries de la fermentation.

- Les méthodes microbiologiques de protection des récoltes après la moisson prennent une importance croissante et les fermentations alimentaires sont adoptées dans des zones géographiques toujours plus vastes.

- Un accord international sur les systèmes de production pour un petit nombre de produits essentiels, de base, disponibles à bas prix, influence favorablement la planification des industries alimentaires et pharmaceutiques.

s'opposent au développement des fermentations alimentaires aux méthodes de contrôle biologiques et aux autres contributions à l'autonomie économique.

- Les industries alimentaires deviennent conditionnées par les relations travail direction et par des adaptations à un contrôle bureaucratique croissant.

- L'orientation commerciale des industries alimentaires existantes (brasseries, laiteries, production de viande) amortit l'impact de la bio-technologie moderne.

Une croissance rapide des réglementations de contrôle et des barrières non-tarifaires fait perdre le sens des réalités globales à ceux qui doivent préparer les décisions.

- Les aliments préparés pénètrent sur des marchés où le système social n'est pas prêt à supporter les effets négatifs des produits de prestige et de l'entrée des femmes dans le marché du travail.

- Le gouffre entre ceux qui sont suralimentés et les affamés ne fait que s'accroître.

- La dévaluation de la vie humaine devient plus marquée et on accepte comme inévitable la mentalité égoïste du "chacun pour soi".

H. SANTE

1. Programme de bien-être pour les pays en développement

"La santé est un état de bien-être complet, physique, mental et social et non simplement l'absence de maladie ou d'infirmité."

Préambule à la Constitution de l'O M S.

La santé est le résultat de l'interaction de nombreux facteurs. Elle requiert par exemple un milieu répondant à certaines normes minimales en ce qui concerne le niveau de pollution. Il doit y avoir suffisamment de combustible pour faire bouillir l'eau et préparer la nourriture et pour disposer d'un abri chauffé et éclairé. Finalement, l'état nutritionnel doit être suffisant pour assurer l'efficacité des mécanismes de défense du corps contre les sollicitations et les infections. Evidemment, il s'agit ici de la somme générale de toutes les améliorations possibles mentionnées précédemment dans certains chapitres de cette étude, quoique par exemple la gestion des eaux résiduaires et des déchets ait été discutée avant tout du point de vue de l'alimentation en énergie et en engrais plutôt que du point de vue fondamental de l'état sanitaire. Toutefois, ce dernier est essentiel, par exemple pour le contrôle des parasites intestinaux qui consomment une grande partie de la nourriture ingérée. Celle-ci est également gaspillée par la diarrhée et les maladies fébriles. Par conséquent, l'état nutritionnel peut devenir facilement incapable non seulement de soutenir les mécanismes de défense naturelle du corps contre les maladies causées par les virus et les protozoaires mais même à maintenir une capacité de travail acceptable. En outre, des cas de retard mental acquis ainsi que des maladies chroniques conduisant à la cécité ou à d'autres handicaps sévères font peser une lourde charge sur la société.

Vers l'année 2000, la ville de Mexico devrait avoir plus de 30 millions d'habitants, Calcutta approchera des 20 millions et le Grand-Sombay, le Grand-Le Caire, Djakarta et Séoul devraient atteindre les 15 à 20 millions d'habitants. La plus grande partie des habitants de ces villes vivra dans des bidonvilles qui exerceront des pressions extrêmes sur les installations sanitaires, les adductions d'eau et les soins de santé. Les problèmes de nourriture, d'eau et de santé devraient même être plus graves dans les zones rurales car les habitants les plus dynamiques auront tendance à émigrer vers les villes, alors que le nombre des médecins est extrêmement faible. Pour un pays tel que l'Inde, on a constaté que 80 % de la population est rurale mais que les 4/5 des médecins vivent dans les villes. Cette situation permet donc de mettre en doute la validité du modèle de santé publique mis au point pour les pays riches quand il s'agit de trouver une solution au problème des pays pauvres. Par exemple, ceux-ci pourraient avoir besoin d'une aide plus importante pour l'instruction d'un vaste corps de personnel para-médical que ce n'est nécessaire dans les nations industrialisées. D'autre part, il peut y avoir un grand besoin de nécessaires de diagnostic meilleur marché et plus fiables. Il y a évidemment un vaste domaine libre pour les innovations industrielles dans le domaine des soins de santé.

Les pays industriels sont caractérisés par un haut niveau de spécialisation, dans lequel un microbiologiste est expert dans un seul domaine (agents pathogènes humains, infections animales, maladies des plantes, science du sol, microbiologie de la laiterie, etc.). Par conséquent, il n'y a aucune compréhension du cercle vicieux de pauvreté - malnutrition - infection, ni de la formation multidisciplinaire qu'un **auxiliaire** médical tropical devrait posséder - génie sanitaire, préservation des aliments, contrôle des insectes, etc. - afin de pouvoir combattre les maladies. Il est évident que nous nous trouvons ici devant une accumulation de problèmes d'une importance sans précédent.

2. Un défi pour l'industrie de l'instrumentation.

Les pays industrialisés possèdent une infrastructure qui leur assure des assistants de laboratoire capables d'interpréter des observations visuelles et de traduire des lectures sur instruments en indications pour la thérapeutique. Ils possèdent des ingénieurs d'entretien pour réparer les équipements défectueux et des spécialistes pour débrouiller les situations difficiles. Des initiatives sociales et techniques sont évidemment requises dans les pays en développement afin de compenser l'absence de support technologique. La conception modulaire et les circuits à auto-contrôle devraient par exemple devenir de règle dans le cas des instruments électroniques produits en grande série. Des cliniques mobiles et des équipes de vaccination devraient être prévues non seulement avec un équipement robuste mais également avec des facilités de communication permettant de traiter efficacement les données disponibles et de s'assurer l'aide d'experts compétents.

Il est certainement vrai que la plupart des robots mis au point pour les examens médicaux ou sérologiques ainsi que les différents dispositifs actuellement disponibles pour les essais électrophysiologiques deviennent rapidement inutilisables dans l'humidité des tropiques. Ceci, toutefois, ne démontre pas l'existence de barrières insurmontables de nature technique mais plutôt le fait que les fabricants d'instruments n'ont pas senti la nécessité de faire appel aux matériaux et aux principes techniques qui sont bien connus des producteurs d'équipements militaires.

On peut cependant espérer que le génie des enzymes étant maintenant au centre de l'intérêt des techniciens médicaux, les fabricants d'instruments y trouveront un stimulant pour mettre au point des équipements fiables, plus robustes et plus faciles à utiliser. Les techniciens médicaux font, par exemple, des essais avec des enzymes micro-encapsulés (composés actifs enfermés dans de petites capsules constituées de membranes semi-perméables) ou fixés à des membranes ainsi que d'absorbants qui peuvent être utilisés par des dispositifs compacts et portables de désintoxication qui peuvent être branchés sur la circulation

sanguine comme moyen de remplacement des unités encombrantes de dialyse utilisées maintenant pour le traitement des maladies rénales. Ces organes artificiels, qui pourront incorporer aussi, finalement, des antigènes monoclonaux, et d'autres agents à haute spécificité, devront combiner le "bon marché" et un très haut niveau de fiabilité. L'expérience obtenue en étudiant leur conception peut présenter un grand intérêt pour résoudre les problèmes des pays en développement.

Le génie biomoléculaire nous indique un certain nombre d'autres possibilités pour combler quelques-unes des lacunes mentionnées ci-dessus. Des nécessaires de diagnostic à haute spécificité utilisant des anticorps monoclonaux ont déjà été mis sur le marché à titre d'essai. De tels anticorps peuvent, par exemple, être marqués avec des enzymes qui les rendent faciles à détecter ou qui peuvent être attachés à de fines particules magnétiques permettant de repêcher des agents pathogènes spécifiques dans les matières fécales ou dans une eau ou une nourriture suspecte. Des méthodes nouvelles de détection sanitaire généralisées incorporant des analyses de l'état nutritionnel, peuvent fournir également aujourd'hui la base de stratégies de santé publique générale telles que les campagnes de vaccination.

3. Tendances dans la production des vaccins.

Dans la plupart des cas, ces campagnes ne souffrent pas d'un manque de quantités appropriées de vaccins efficaces. Au cours des dernières années, la biotechnologie a réalisé de grands progrès dans la production sur grande échelle de vaccins à base de virus, dérivés d'abord de tissus animaux et, ensuite, de cellules humaines avec croissance sur des matériaux inertes, soit en milieu immobile, soit sur des particules en suspension dans un milieu liquide approprié. Ces milieux contiennent des concentrations élevées en acides aminés et en protéines, qui sont assez coûteux. Toutefois, de nombreux types de la première espèce peuvent être produits maintenant très efficacement sous leur forme appropriée optiquement active, à l'aide d'enzymes immobilisés et les techniciens de la génétique ont été capables de préparer des bactéries pouvant produire des protéines semblables à

celles qui se trouvent dans les milieux de culture cellulaire.

L'efficacité de la technique japonaise des enzymes, permettant de transformer les mélanges de types d'acides aminés dérivant des synthèses chimiques en forme active désirable, est mise en évidence par le fait qu'un réacteur ayant un volume d'un mètre cube, peut produire 500 kg d'un acide aminé particulier par jour. Le procédé en continu a fonctionné pendant plus de deux mois avant que l'activité n'ait décliné de moitié. Dans un cas où la matière première a été transformée à raison de 99 %, une tonne de cellules immobilisées de E-coli a produit 1.700 kg toutes les 24 heures.

La productivité des bactéries modifiée de façon à produire les protéines caractérisant les animaux supérieurs est également impressionnante. Par exemple, 70.000 molécules d'albumine de l'oeuf de poule par cellule de E-coli.

Toutefois, la question qui se pose est de savoir s'il y a un motif de s'intéresser à des moyens de culture de tissus meilleur marché. Après tout, il est maintenant possible de se passer complètement des tissus et de mettre au point des bactéries qui produisent des antigènes, des virus, des bactéries et des parasites pouvant être utilisés soit comme vaccins sous-unitaires, soit comme réactifs de diagnostic. Une grande part de ces produits sont maintenant non seulement coûteux mais également dangereux à fabriquer si bien que leur production par la voie des fermentations bactériennes sera certainement exploitée prochainement. Ceci semble particulièrement vraisemblable dans le cas des petites molécules qui peuvent être assez facilement isolées et analysées. Comme exemple, on peut citer l'antigène provenant du micro-organisme qui cause le choléra. Il semble induire une résistance à cette maladie redoutable et peut être actif également contre certains autres agents pathogènes qui causent la diarrhée.

La diarrhée est une affection commune dans de nombreux pays en développement. Dans ces zones où, en moyenne, les enfants souffrent de cet état pendant deux mois sur douze, il existe une masse d'agents pathogènes facile à imaginer et que les épidémiologistes doivent contenir et réduire. Heureusement, de nombreuses nouvelles solutions sont actuellement disponibles, par exemple, les enzymes

peuvent détacher des chaînes latérales immunologiquement actives de leur support inerte et des constituants toxiques. Ayant obtenu de tels fragments, il est intéressant de les utiliser pour bloquer les sites où un agent pathogène adhère normalement au corps, tandis qu'une autre possibilité consiste à les rendre antigènes en les attachant à des molécules porteuses appropriées. Il faut noter également que le généticien microbien peut proposer maintenant un certain nombre de voies diverses conduisant à une atténuation des vaccins vivants, pouvant être utilisés en toute sécurité contre des maladies telles que la typhoïde, la dysenterie et le choléra.

4. Le génie génétique pour la production de médicaments.

Le génie génétique peut influencer également la lutte contre les maladies infectieuses en libérant la production de certains antibiotiques et d'inhibiteurs enzymatiques spécifiques, ayant un intérêt médical, de la dépendance vis-à-vis des moisissures dont la croissance peut être difficile à réaliser et cela grâce au recours à des bactéries qui sont faciles à manipuler. Des modifications précises seront certainement réalisées aussi dans les codes génétiques qui déterminent la structure de tels agents thérapeutiques. Leur toxicité peut donc être réduite et leur efficacité thérapeutique accrue. Finalement, l'importance des agents antiviraux tels que l'interferon, produits en grandes quantités par les techniques de fermentation ne doit pas être sous-estimée. Ceci est vrai également pour les antigènes monospécifiques qui peuvent devenir utiles à long terme comme dispositifs d'accueil pour des médicaments puissants, actifs contre les tumeurs et les parasites.

Toutefois, il est difficile de dire dans quelle mesure les efforts mentionnés ci-dessus seront concentrés sur les problèmes de santé des pays pauvres. Le fait qu'un nouvel antibiotique, l'ivermectine, a été mis au point pour les animaux de salon plutôt que pour l'homme donne lieu à certaines réflexions. Il est efficace contre la filariose des chiens, mais présente un grand intérêt potentiel pour le traitement de la cécité causée par la pollution des eaux de rivière.

On connaît aussi des agents microbiens qui ont une grande activité anti-tumorale; d'autres présentent des promesses pour le traitement des ulcères gastriques, des caillots sanguins de l'hypertension et de la dépendance alcoolique; toutefois, dans tous ces cas, le développement paraît devoir être lent par suite des réglementations de contrôle sévères existant dans la plupart des pays. Compte tenu de leur structure relativement simple et de leur utilité médicale potentielle, il est naturel que les hormones polypeptidiques aient attiré l'attention dès que leurs gènes humains ont pu être modifiés de façon à s'adapter à la machinerie métabolique du cheval de trait du généticien : le E-coli. Les gènes synthétisés chimiquement ont été utilisés d'abord pour produire de la somatostatine, mais ensuite également de l'hormone thymosine-alpha-1 et les deux éléments constitutifs de l'insuline ont été obtenus par cette méthode. Des molécules synthétiques d'information ont aussi été utilisées comme moules pour la synthèse enzymatique des gènes qui assurent la codification de l'hormone humaine **de croissance et de la pro-insuline**. En utilisant de tels moules, on a préparé maintenant différents types d'interféron ainsi que certains antigènes des virus à action superficielle. Dans un cas (hépatite B), les techniciens de la génétique ont été capables non seulement de produire l'antigène de surface mais aussi le constituant du noyau.

Différents autres médicaments ayant une importance thérapeutique peuvent également être produits à l'aide de micro-organismes génétiquement modifiés et de nombreux autres sont à des phases avancées de développement (les globulines humaine alpha, bêta et gamma et certains agents de coagulation ainsi que une enzyme qui dissout les caillots sanguins, sans parler d'un couple d'hormones : (la gonadotropine chorionique et la somatomammotropine). Une combinaison de manipulations génétiques avec des techniques d'anticorps monocloniques pourront finalement assurer une nouvelle méthode de production efficace d'anticorps convenant pour le diagnostic et le traitement de maladies spécifiques.

Les progrès en génie génétique sont donc impressionnants mais la synthèse chimique des hormones polypeptidiques de plus petite taille présente une solution alternative valable et à long terme, des agents induisant la production naturelle de l'interféron dans le corps peuvent être préférés aux molécules produites artificiellement. Enfin, il faudrait mentionner que le génie enzymatique peut rendre, dans certains cas, très compétitif un produit naturel. Un exemple intéressant est l'insuline bovine, extraite des glandes recueillies dans les abattoirs. Cette insuline peut maintenant être rendue humaine par le simple remplacement d'un acide aminé.

Toutefois, il est peu douteux que diverses techniques nouvelles qui induisent les micro-organismes à sécréter le produit désiré et qui, par conséquent, éliminent la nécessité de les séparer de la masse cellulaire, ouvrent de nouvelles perspectives au génie génétique. En outre, l'emploi de cellules de levure modifiées permet d'espérer raisonnablement qu'on pourra produire des systèmes de production qui seront à la fois stables et capables de fournir de nombreux polypeptides ayant une importance biologique et auxquels des résidus hydrocarbonés spécifiques sont fixés.

5. Les possibilités de culture des tissus végétaux.

Outre l'emploi de micro-organismes ayant subi des manipulations génétiques, l'industrie pharmaceutique utilisera aussi certainement les techniques microbiologiques pour le traitement des cultures de tissus végétaux afin de produire des médicaments ayant une grande valeur ajoutée et à faible volume. Environ 25 % des médicaments prescrits proviennent du domaine végétal et, très souvent, de larges plantations situées dans des zones politiquement instables, avec de mauvaises conditions climatiques, et une large gamme d'infestations. La nécessité d'assurer un approvisionnement constant et le fait que la synthèse par le chemin de micro-organismes génétiquement modifiés est probablement un chemin assez long (les médicaments végétaux sont normalement les produits finaux de processus très complexes), explique les efforts qui sont maintenant consacrés à la culture des tissus végétaux. Grâce aux amélio-

rations des milieux nutritifs (composition définie, produits chimiques meilleur marché) et des techniques de culture (cellules immobilisées, réacteurs à suspension par air pulsé), les progrès réalisés ont été importants au cours des dernières années. En fait, les enzymes de diagnostic comme la phosphodiesterase du tabac, sont maintenant en vente commercialement et certains alcaloïdes ainsi que la digoxine, utilisée pour la thérapeutique du coeur, sont produites en quantités importantes. Dans de nombreux cas (antraquinons, ajuralacine et serpentine, diosgenine, saponine du ginseng et nicotine), on a déjà atteint des niveaux de concentration qui dépassent ceux observés dans les plantes. Il faut mentionner encore que la diosgenine est un précurseur des médicaments utilisés pour les pilules contraceptives, un produit d'un intérêt évident pour les pays en développement.

En fait, une sélection soigneuse et une manipulation appropriée peuvent conduire souvent à des résultats qui rendent intéressant d'analyser les cultures de tissus végétaux, non seulement pour en retirer des alcaloïdes et des glycosides cardiaques mais également des agents antibactériens et anti-viraux, des inhibiteurs enzymatiques et d'autres substances actives contre le leucémie ainsi que des opiates, des hormones et des stéroïdes. Le fait que seulement environ 2.500 parmi les 250.000 espèces de végétaux supérieurs existant sur terre ont été soumis à un examen systématique sur le plan pharmacologique indique qu'il existe là une ressource encore inexploitée. Toutefois, il reste à voir si ce seront les médicaments thérapeutiquement importants qui auront le plus grand impact ou si ce seront des insecticides, des hormones végétaux, des huiles, des arômes, des pigments et des parfums, dont la production, à partir de cultures de cellules végétales, a également été mentionnée. Beaucoup dépend du coût des essais d'efficacité et de régularité qui, dans le domaine pharmaceutique, représente souvent jusqu'à 80 % du coût de la mise au point.

6. L'utilisation de la technologie des enzymes pour la mise au point de nouveaux médicaments.

Il est évident que le génie génétique et la technologie des cultures sont aptes à contribuer fortement à la mise au point de nouveaux médicaments mais le génie enzymatique apportera aussi sa contribution, par exemple en exposant les structures de base des antibiotiques à des modifications chimiques (par exemple, utilisation d'enzymes immobilisés pour produire des pénicillines semi-synthétiques) ou en produisant des hormones à partir de matières premières appropriées (par exemple l'emploi de cellules immobilisées pour convertir le cortisol en prednisolone). Comme de nombreux produits de ce dernier type peuvent être obtenus dans les pays en développement, leurs scientifiques accorderont un intérêt au bénéfice économique du génie enzymatique utilisé pour améliorer les taux d'extraction et pour ennoblir les produits naturels.

7. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités.

Positif

- Face au succès des campagnes d'éradication de la variole et de la peste bovine et aux progrès dans le contrôle biologique, l'immunologie et le génie génétique, les programmes de l'O.M.S. consacrés aux maladies tropicales et diarrhéiques sont fortement développés.
- Il existe une coordination nationale des activités de réglementation destinées à accélérer la diffusion de la plupart des innovations médicales utiles.

Négatif

- La programmation de l'aide médicale continue à se baser sur une liaison supposée entre l'esprit missionnaire et la compétence.
- Les systèmes de prestations de soins médicaux continuent à être conçus pour des établissements à grande échelle et pour des équipements perfectionnés. Les médicaments coûteux et les organes artificiels reçoivent la priorité dans les applications des progrès du génie biomoléculaire.

- Il existe des efforts coordonnés pour mettre au point un équipement spécialement conçu pour l'emploi dans les pays en développement.

- Les ressources naturelles sont systématiquement exploitées en vue d'en extraire de nouveaux médicaments.

- On observe un antagonisme croissant entre une élite médicale importée de l'étranger et le personnel para-médical.

- Les infrastructures insuffisantes des pays en développement sont incapables de répondre aux espoirs de progrès rapides.

- Le traitement des épidémies dans les bidonvilles et des maladies parasitiques devient de plus en plus difficile.

- On considère comme inévitable d'accepter une mentalité égoïste du "chacun pour soi".

I. INDUSTRIE - PERSPECTIVES ET DANGERS

1. La dimension actuelle et future de l'industrie des fermentations.

Tous les chapitres précédents ont fourni des exemples d'emplois industriels de la microbiologie appliquée et du génie biomoléculaire mais le volume attendu de ces activités a été esquissé seulement en termes très généraux. Nous envisageons évidemment ici une activité industrielle qui est déjà importante tant en ce qui concerne le nombre de sociétés intéressées que les tonnages produits. Une étude de 1977 note que 145 sociétés d'importance mondiale utilisent les fermentations pour la production de produits chimiques fins et de substances thérapeutiques, et que 85 sociétés produisent des levures pour l'alimentation humaine et animale. En 1979, le monde a vu la production de quelque 80 millions de tonnes de bière, de 13,5 millions de tonnes de fromage

et de 11 millions de tonnes de levure de boulanger, outre 200.000 tonnes d'acide citrique et 10.000 tonnes de pénicilline benzylique.

Il y a quelques années, le pays dominant en technologie des fermentations, le Japon, utilisait des procédés microbiologiques dans ses industries avec un chiffre d'affaires annuel d'environ 10 milliards de dollars américains. Les produits, qui contribuaient pour 5 % aux revenus fiscaux du gouvernement, comportaient quelque 200.000 tonnes d'acide glutamique et 20.000 tonnes de lysine, qui sont d'importants additifs en alimentation humaine et animale.

Un sol fertile pour le développement récent de la technologie biomoléculaire existe évidemment dans de nombreux pays mais dans quelle mesure sera-t-il approprié ?

Pour répondre à cette question, il est intéressant de mentionner quelques chiffres tirés du rapport "L'impact de la génétique : applications aux micro-organismes, aux animaux et aux plantes", publié récemment par le Bureau du Congrès pour les Evaluations Technologiques à Washington. Ce rapport ne prévoit aucun remplacement direct d'une industrie classique au cours des vingt prochaines années mais estime que l'impact économique annuel général du génie génétique sur l'industrie chimique pourra se mesurer en milliards de dollars. On s'attend à ce que les médicaments basés sur le génie génétique deviennent importants, avec, en tête, l'interféron ayant un chiffre d'affaires de 1.400 millions de dollars US, suivi par les antibiotiques synthétiques (1.100 millions de dollars US), les vaccins (260 millions de dollars US), l'insuline humaine (235 millions \$ US) et les hormones (100 millions \$ US).

Le rapport exprime l'opinion que l'industrie chimique sera influencée en particulier, pour ce qui concerne l'emploi des ressources renouvelables, le retour à des conditions physiques plus douces, les procédés de reproduction en une étape et la réduction de la pollution. Ce dernier aspect peut revêtir une importance particu-

lière si l'on tient compte du fait que l'agence américaine pour la protection de l'environnement a estimé que le coût total du contrôle de la pollution entre 1977 et 1986 sera de plus de 360 milliards de dollars. Environ 7 % de ces coûts seront supportés directement par les industries chimiques et apparentées et ceci signifie que les processus industriels les plus propres et les systèmes de traitement des déchets les meilleurs qui sont offerts par le génie génétique permettront d'épargner de grandes sommes d'argent. Toutefois, il est nécessaire de noter que les industries de fermentation peuvent par elles-mêmes donner lieu à des problèmes de pollution du milieu d'une importance considérable. Les eaux usées provenant d'une simple brasserie peuvent, par exemple, avoir un volume de 10.000 m³ par jour et ceci crée une pollution équivalente à celle d'une population de 200.000 personnes. Toutefois, contrairement au résidu de la plupart des industries chimiques classiques, les déchets provenant des industries biologiques sont dégradables et, en principe, peuvent être traités souvent par des techniques microbiologiques qui les transforment en produits utiles. D'autre part, de nombreux processus de production peuvent être modifiés de façon à réduire de manière significative l'importance du problème des eaux résiduaires. Dans certains endroits, au Japon, les mélasses ont été remplacées par l'acide acétique comme support nutritif pour les levures et pour la production de mono-glutamate de sodium.

L'impact du génie biomoléculaire sur la production de produits de haute valeur et de faible volume est assez facilement prévisible mais son influence sur l'industrie chimique lourde est plus difficile à estimer.

Un groupe d'experts du Massachusetts Institute of Technology et des représentants d'une firme spécialisée en génie génétique estiment toutefois que la production des produits chimiques suivants pourra être influencée par le génie génétique au cours des vingt prochaines années : acide acétique, acide acrylique, acide adipique, éthanol, éthylène-glycol, oxyde d'éthylène, glycérine et propylène glycol.

2. La concurrence entre les procédés chimiques et biologiques.

Sauf lorsque des considérations stratégiques rendent impératif de subsidier des produits de fermentation tels que l'éthanol, l'acide acétique, l'acétone, le butanol, l'isopropanol et la glycérine, les procédés de l'industrie pétrochimique sont difficiles à surpasser. Ceux-ci utilisent des matières premières qui sont faciles à stocker et à transporter, ils sont souples et bien connus. Ils assurent des productions de carbone plus grandes que les fermentations et, finalement, ils sont adaptés pour la production sur grande échelle avec réduction des coûts. Le défenseur des fermentations doit tenir compte du fait que certaines choses sont mieux faites par des procédés non-microbiologiques et que le potentiel de la microbiologie sera démontré essentiellement dans la production de substances complexes et de produits chimiques spéciaux, par exemple les molécules optiquement actives qui peuvent être utilisées comme précurseurs des polymères.

Ceci étant dit, il faut toutefois noter que les techniques d'hybridation de l'ADN ont déjà été appliquées à l'oxydation enzymatique de l'éthylène et du propylène et à la production d'alcool industriel et que ces méthodes se sont avérées suffisamment prometteuses que pour mettre en route des usines-pilotes. Un développement très frappant doit être cité ici : le génome des micro-organismes qui transforme le méthanol et l'ammoniaque en masse cellulaire a été récemment manipulé de façon à obtenir une utilisation améliorée de l'ammoniaque. Ces bactéries, possédant un pouvoir exceptionnel d'utilisation des molécules simples, qui peuvent être obtenues à partir d'une vaste gamme de matières premières, entrent donc maintenant évidemment en scène comme producteurs d'une grande variété de produits chimiques.

3. La biotechnologie et l'industrie alimentaire.

Pour ce qui concerne les produits complexes des fermentations, la biotechnologie jouera un rôle d'une importance croissante dans la fabrication de produits tels que la bière et le fromage. Dans les deux cas, les procédés en continu ont été mis au point et les enzymes

microbiens, y compris le remplacement du malt pour le brassage, trouvent des applications croissantes. De nouveaux produits, tels que la bière sans alcool, les yoghourts aromatiques, les produits de laiterie exempts de lactose (auxquels certaine personnes sont allergiques) et le lait avec propriété de conservation améliorée, sont déjà apparus sur le marché. Dans l'industrie de la boulangerie, des enzymes de moisissure peuvent être utilisés pour augmenter le niveau de sucre fermentable et pour rendre la pâte plus facile à travailler. Comme avantage complémentaire, on peut citer un accroissement de volume et une meilleure croûte du pain. La rennet microbienne est utilisée sur une grande échelle pour la fabrication de fromage et des enzymes protéolytiques sélectionnés sont utilisés pour modifier les propriétés fonctionnelles des protéines animales et végétales. D'autres types d'enzymes sont utilisés pour augmenter la viscosité d'aliments préparés, pour éliminer le trouble du vin et l'amertume des jus de fruits, pour peler les tomates, pour éprouver les qualités de conservation des produits à base d'oeufs, etc. Un emploi nettement amélioré des déchets d'abattoir et des industries traitant le poisson constitue une autre conséquence naturelle des progrès en génie enzymatique. Finalement, il faut noter que l'industrie alimentaire témoigne d'un grand intérêt pour la culture de tissus végétaux en tant que source potentielle d'arômes, de pigments et d'huiles essentielles, tout comme de polysaccharides microbiens qui peuvent devenir utiles pour la formulation de différents aliments tout préparés. L'industrie sucrière est certainement bien consciente du fait que le sucre est le facteur de coût dominant dans les milieux de culture de tissus végétaux. C'est également la matière première normale pour la production des polysaccharides microbiens.

Comme indiqué précédemment, le génie génétique pourra également jouer un rôle dans de nombreux domaines de ce genre et des protéines ayant des propriétés fonctionnelles importantes pourront être produites bientôt grâce à des micro-organismes ayant subi des modifications génétiques. La signification des acides aminés et des vitamines essentielles produites par voie microbiologique est si évidente qu'elle ne demande pas de démonstration.

4. La biotechnologie et les produits de remplacement.

Pendant longtemps encore, ce sera certainement le sucre qui sera la source de carbone principale pour la majorité des fermentations; toutefois, ce produit est traditionnellement soumis à de grandes fluctuations de prix qui rendent la planification également difficile pour le directeur de l'usine de fermentation et pour le ministre des finances du pays qui dépend de l'exportation du sucre.

Deux articles voisins du Financial Times du 10 avril 1981 résument très bien ce problème. Un des articles mentionne que les prix mondiaux du sucre sont tombés le 9 avril à leur niveau le plus bas sur une période de 12 mois. Ce déclin est en relation évidente avec la politique de la C.E.E. de subsidier les exportations de sucre blanc mais il faut noter également que la consommation américaine de sucre a diminué brusquement en 1980. L'autre article mentionne la volonté du gouvernement jamaïcain d'accepter la proposition d'un groupe britannique de reprendre l'industrie sucrière chancelante de cette île pour une période de 7 ans. Cette proposition s'applique aux sucreries appartenant à l'état, lesquelles produisent 75 % du sucre brut de l'île, les mêmes sucreries, en fait, qui étaient dirigées par un groupe britannique avant d'être reprises par le gouvernement, huit ans plus tôt.

Comme les édulcorants industriels des boissons, des aliments, des bonbons, etc. représentent une fraction importante de la consommation sucrière dans les pays techniquement développés, il est raisonnable de supposer que c'est l'abandon du sucre de canne (sucrose) au profit de l'amidon qui a été un facteur important de la réduction de la consommation américaine de sucre. L'amidon est un sous-produit aux USA et il est facilement transformé en glucose par les enzymes microbiens. Ce glucose n'a que 40 % du pouvoir édulcorant du sucrose mais peut atteindre le degré d'édulcoration de celui-ci s'il est partiellement converti en fructose, lequel est de 120 à 180 % plus doux que le sucrose. Ceci se réalise grâce à des enzymes immobilisés, si bien qu'il est raisonnable de dire que le génie enzymatique a déjà radicalement modifié le marché américain des sirops à haute teneur en fructose. En fait, 30 % du marché ont déjà été conquis il y a deux ans et ces techniques assurent maintenant la base de production de plus de 2 millions de tonnes de

produits édulcorants hydrocarbonés par an. En 1985, le chiffre d'affaires atteindra probablement 4 millions de tonnes. Le biocatalyseur immobilisé mentionné ci-dessus peut être combiné aussi avec les enzymes qui attaquent le sucre du petit lait, ouvrant donc une voie à la conversion de ce produit résiduaire en sirop encore plus doux.

Le génie génétique est appelé à devenir bientôt un facteur important de l'industrie des édulcorants. La raison est qu'un produit naturel qui est plus de 1.000 fois plus édulcorant que le sucre peut être produit maintenant par des bactéries plutôt que par une plante tropicale. Ceci constitue un nouvel avertissement pour les pays qui n'ont pas encore diversifié ou amélioré leur culture afin d'atteindre un degré raisonnable d'autonomie.

Toutefois, il faut souligner qu'une mutation biologique dans les industries nécessite une solide plate-forme de décollage. Pour réaliser des fermentations fournissant des produits de haute valeur, il est nécessaire de disposer d'une infrastructure que peu de pays en développement possèdent déjà. D'autre part, leurs marchés locaux pour certains produits sont si vastes qu'une base solide en vue de ventes ultérieures à l'étranger peut y être trouvée. Toutefois, les produits doivent posséder alors une qualité qui leur permet de satisfaire aux spécifications réglementaires les plus sévères.

5. Scénarios alternatifs pour les solutions et les priorités.

Positif

- Un développement systématique de la technologie industrielle et du traitement séquentielle, combiné avec un niveau de compétence élevé contrebalance les tendances au bradage et le manque d'attention pour les risques industriels qui peuvent constituer des pièges pour les pays qui pénètrent

Négatif

- Des espoirs non justifiés de rentabilité rapide d'investissements en technologie bio-moléculaire, combinés avec un manque d'attention pour les besoins en infrastructure donne lieu à de sévères **désillusions**.

-La situation qui s'est présentée avec les édulcorants industriels

trop rapidement dans le domaine de la microbiologie appliquée.

- Le méthanol, considéré comme un substrat et une matière première pour l'industrie chimique, attire une attention croissante des spécialistes de la génétique.

- Les polymères microbiens présentent une importance croissante.

- La technologie des serres et des digesteurs ainsi que la production de petites plantes, d'amorces et de cartouches d'enzymes, attire l'attention des industriels.

se répète avec d'autres substitutions, ce qui provoque un effet négatif dans les pays axés sur l'exportation de matières premières.

J. LA NECESSITE DE POLITIQUES NATIONALES DES RESSOURCES BIOLOGIQUES DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT

Dans les chapitres précédents, on a choisi différents besoins essentiels comme exemples illustrant la vaste gamme des activités industrielles qui intéressent les pays en développement et qui seront stimulées par les progrès récents en génétique microbienne, en génie enzymatique et en technologie des fermentations. Le raison de cet exposé était de réfuter la fausse conception courante suivant laquelle les domaines principaux où se feront sentir les effets industriels de la microbiologie appliquée et de la biotechnologie se trouvent dans l'industrie pharmaceutique et alimentaire. L'importance de ces industries est indéniable mais si on ne possède pas une vue plus large du problème, des erreurs coûteuses seront probables dans la planification à long terme des programmes d'instruction.

Dans les pays industriels possédant des réseaux d'information efficaces, des signes précurseurs apparaissent orécocement, qui permettent de prendre les mesures correctives appropriées. Dans les pays en développement, d'autre part, les décisions stratégiques sont coûteuses et nécessitent par conséquent des efforts et des organisations susceptibles de compenser la faiblesse de l'infrastructure de base. Il ne manque certainement pas de revues, de résumés et d'articles, de rapports concernant des études intéressantes et, si l'on additionne le nombre croissant des données de base, il devient évident que l'impasse pour les pays en développement sera le processus de triage des informations requises pour préparer les décisions. Si ce triage est tout juste une opération passive, cela signifie que l'avantage spécifique d'un pays déterminé peut passer facilement inaperçu et qu'une situation de dépendance perpétuelle peut se maintenir. Les progrès doivent être évalués dans le contexte de la force et de la faiblesse du pays en question et les conséquences d'actions alternatives doivent être évaluées en se basant sur l'expérience acquise dans des régions présentant un profil similaire quant aux besoins et aux ressources. Ceci, évidemment, nous ramène à la nécessité d'avoir des politiques nationales des ressources biologiques permettant la solution à long terme de l'équation combustible/aliment, de façon à protéger l'environnement et à améliorer la situation économique. A ce point de vue, le choix des domaines de l'activité industrielle est d'une importance cruciale. Dans la plupart des cas, l'enoblissement des ressources locales doit recevoir une priorité évidente mais il existe d'autres cas où les efforts consacrés à l'amélioration de la productivité primaire doivent recevoir la priorité. La commande d'un micro-organisme ayant subi une manipulation génétique chez l'une des firmes spécialisées qui ont foisonné au cours des dernières années, ne constitue qu'une petite étape qu'un pays en développement doit souhaiter parcourir dans la direction de la diversification et de l'anoblissement de ses produits agricoles. Toutefois, le fait que les laboratoires appropriés, les installations-pilotes et les usines peuvent maintenant, du moins en principe, être commandées "clef sur porte", n'est pas d'un grand secours si l'acheteur ne se rend pas compte de la complexité des matières premières biologiques et de leur soumission aux fluctuations saisonnières et au processus de dégradation qui influence leur qualité; ou que les procédés industriels requièrent

normalement de l'eau de bonne qualité et une alimentation fiable en énergie et/ou en fluide de refroidissement. Finalement, il faut noter aussi que les processus situés en aval sont souvent aussi exigeants que le processus de fermentation lui-même s'il est nécessaire d'éliminer des résidus toxiques, des facteurs anti-nutritionnels et des arômes indésirables contenus dans les produits à bas de PCU ou de BPM et que les molécules fébrilisantes doivent être éliminées, par mesure de sécurité, des produits conçus pour les injections.

L'issue de la concurrence entre les industries de la fermentation et les industries chimiques dans différents pays dépendra aussi des politiques agro-industrielles, des ressources économiques, de la capacité d'intégrer différents courants d'énergie produits et - last but not least - de la capacité de mobiliser le "know-how" approprié. Ce dernier peut se rapporter par exemple à des procédés alternatifs de récupération du produit à partir des dissolutions ou des suspensions diluées qui sont courantes dans les processus de fermentation. Fréquemment, il est question aussi de choisir entre les techniques discontinues, discontinues avec recyclage ou en continu et de choisir des méthodes qui réduisent les coûts en énergie requis pour stériliser les milieux de culture et pour agiter et aérer celles-ci. Finalement, il est important de mettre en balance le coût requis pour un contrôle par micro-processeur et pour une programmation élaborée sur ordinateur avec les coûts de la main-d'oeuvre.

Ces commentaires nous ramènent à la conclusion que les plus grandes possibilités offertes par le génie génétique doivent être complétées par une bonne dose de technologie des procédés avant que celle-ci ne puisse avoir un impact général important sur les pays en développement. Tant que les solutions par processus unitaire en biotechnologie n'auront pas atteint le même degré de perfectionnement qu'en génie chimique, la période d'amortissement de **l'équipement requis** sera courte et les coûts en capitaux seront importants. Ceux-ci resteront probablement élevés aussi longtemps que nos efforts pour mettre au point des fermentateurs construits en matériaux non classiques resteront faibles et qu'on ne prendra pas pleinement conscience du rôle que devrait jouer la micro-électronique. Un échange ayant un effet de régulation mutuelle

devrait prendre place entre les pays en développement et les pays industrialisés dans ces divers domaines car il est certain que des innovations basées sur l'écologie microbienne appliquée apparaîtront grâce à des équipes de développement biologique des ressources. Si celles-ci peuvent être pourvues d'installations-pilotes mobiles, elles pourront aider de nombreux pays pauvres à démarrer rapidement vers la bioconversion. Elles pourraient remplir ainsi une fonction critique importante d'éducation tout en assurant l'investigation des domaines végétaux et microbiens afin d'y découvrir de nouveaux matériaux pouvant être exploités dans l'intérêt de l'économie nationale. La plupart des chapitres de cette étude donnent des exemples de l'importance des activités qui se déroulent à la surface entre différentes disciplines. Ceci met en lumière une des faiblesses de nos systèmes d'instruction qui, au niveau élémentaire, font rarement appel à la microbiologie comme voie d'introduction vers la biologie de la nutrition, vers l'hygiène, vers l'écologie et les cycles de la nature et qui, au niveau universitaire, n'assure pas une formation trans-disciplinaire qui est certainement l'essence de la technologie biomoléculaire. En réalité, les programmes d'instruction peuvent bien constituer le facteur le plus critique pour les développements futurs dans les domaines envisagés dans cette étude.

K. REMARQUES FINALES

Les directions dans lesquelles la technologie biomoléculaire se développera dépendent de l'équilibre entre la traction exercée par les forces économiques et par les besoins humains d'une part et par la poussée exercée par le pouvoir d'invention en biologie et dans les domaines apparentés de la technologie, d'autre part.

Dans les pays industrialisés, les forces économiques sont puissantes et l'infrastructure est capable de répondre rapidement à cet effet d'attraction et de poussée. Toutefois, leur préoccupation courante causée par des problèmes importants relatifs au choix des énergies, à la situation monétaire internationale et à des adaptations industrielles douloureuses, rendent trop borné leur horizon de programmation pour permettre des efforts coordonnés orientés vers une optimisation de l'impact social de la génétique

microbienne, de la technologie des enzymes et de la technologie des fermentations.

Dans les pays en développement, les forces économiques sont faibles et, dans la plupart des cas, l'infrastructure est trop indifférenciée que pour permettre l'examen de toute alternative au développement différent de la croissance économique résultant simplement des industries traditionnelles. Ces dernières sont en fait souvent favorisées au détriment de la base fondamentale qui est l'économie agricole et forestière.

Les préoccupations relatives à l'environnement dans les pays industrialisés ainsi que leurs besoins à long terme d'adapter leurs processus de production à l'emploi de ressources renouvelables ou réellement illimitées, confèrent à la technologie biomoléculaire une importance stratégique exceptionnelle. Ceci est souligné par le fait que son développement peut assurer une contribution significative à la résolution de nombreux problèmes de survie dans les pays en développement. Si ces problèmes ne sont pas résolus, toute la programmation industrielle est dépourvue de sens car les ressources requises par l'industrie, tant physique que génétique, seront perdues au cours d'un effondrement social catastrophique. Comme le Recteur Soedjatmoko, de l'Université des Nations-Unies, l'a exprimé au cours d'une allocution récente, "l'équité n'est plus seulement, maintenant, un objectif désirable d'un point de vue moral mais est devenue également une nécessité fondamentale, compte tenu des prix élevés de l'énergie et des conséquences sociales, économiques et écologiques qui en découlent."

Il existe donc un besoin évident pour un mécanisme international permettant d'aider les pays en développement à utiliser efficacement le potentiel de progrès à long terme offert par la technologie biomoléculaire pour le développement industriel, pour la programmation démographique, et pour les programmes de santé considérés dans le contexte des problèmes globaux de combustibles, d'engrais et de nourriture. Par conséquent, un Centre International de Génie Génétique et de Biotechnologie devrait être établi.

Une proposition détaillée pour l'établissement d'un Centre de ce type a été faite par une commission d'experts, conduite par l'auteur, après des discussions avec des responsables politiques, des scientifiques et des techniciens de 12 pays développés et en développement.



* L'Etablissement d'un Centre International de Génie Génétique et de Biotecnologie (ICGEB), Rapport d'un groupe d'experts, UNIDO/IS.254.

82-06-09