

Les nouvelles technologies sont-elles une menace pour l'environnement ou le moyen de nourrir l'humanité au 21^e siècle ?

Sylvie Bonny

« **A**vec une logique implacable, l'agriculture intensive impose partout son mode de développement destructeur, dont les dégâts sont de moins en moins compensés par les avantages (...) : surpâturage, pollution des eaux, érosion, destruction des forêts, dessiccation des nappes phréatiques entrent en jeu, tandis que la population continue de croître avec les besoins alimentaires. En Europe ou en Amérique du Nord, pour survivre, l'agriculteur doit rester compétitif et donc améliorer sa productivité en cultivant des sols nivelés, remembrés, déboisés, permettant de rentabiliser un outillage toujours plus performant, en se spécialisant sur les mêmes variétés les plus productives. Il est pris dans un cycle infernal où la monoculture et l'élevage d'espèces hypersélectionnées de plus en plus fragiles et vulnérables exigent toujours davantage d'engrais, de pesticides et de produits phytosanitaires contre des parasites de plus en plus résistants à des traitements de plus en plus dangereux et coûteux. S'il survit, c'est en faisant disparaître ses frères moins efficaces (...). C'est pourtant cette agriculture, la plus endettée et la moins rentable si l'on tient compte des coûts cachés que les marchés imposent partout (...). Les paysans du Nord et du Sud sont confrontés aux mêmes problèmes : dépendance, exode rural, dégradations de l'environnement et des conditions de vie. A terme, une crise mondiale de l'alimentation n'est pas improbable tandis que la guerre alimentaire est déjà une réalité. Or, les ressources sont très largement suffisantes pour satisfaire les besoins de tous les humains » (de Brie, 1995).

Comme le montrent ces quelques lignes l'évolution technologique en agriculture a fait l'objet de nombreuses critiques portant essentiellement sur

l'industrialisation de l'agriculture, sa logique productiviste parfois destructrice et son artificialisation qui conduiraient à « une agriculture contre nature ». Pourtant ce type d'agriculture, qui s'est surtout diffusé en France dans les décennies d'après 1945, a eu également des effets positifs indéniables. En particulier le niveau de productivité agricole qui était fort bas (d'où un prix des produits agricoles élevé et de substantielles importations en France) a considérablement augmenté, permettant une alimentation abondante à moindre coût relatif.

Aujourd'hui de nouvelles évolutions technologiques apparaissent dans l'agriculture occidentale, d'une part, en raison des modifications dans la demande des consommateurs et des citoyens envers l'agriculture, d'autre part, pour pallier certains effets négatifs par exemple sur le plan environnemental et faire face au nouveau contexte socio-économique, enfin du fait de l'apparition d'une nouvelle vague d'innovations technologiques. Ces dernières sont liées notamment à une meilleure connaissance du vivant et aux Nouvelles technologies de l'information (NTI). Dans le même temps commence à devenir sensible le souci d'un développement durable, et la question de « la capacité de charge » de la planète¹ – en particulier celle de pouvoir nourrir dans quelques décennies près de 10 milliards d'hommes – est fréquemment posée. L'évolution technologique en cours et probable dans un futur proche en agriculture, et en particulier les nouvelles technologies, seront-elles un moyen pour nourrir l'humanité au XXI^e siècle, ou bien présentent-elles des menaces comme celles que certains dénoncent actuellement pour le modèle industrialisé ? Même, si leur diffusion ne se fera

1. Ces deux notions « développement durable » et « capacité de charge » de la planète nécessiteraient des précisions dans leurs significations : en effet, si elles sont souvent reprises, c'est avec des interprétations parfois fort différentes dans leur acception et surtout en matière de conséquences à en tirer (ex. Mc Manus, 1996 ; Cohen, 1995).

Sylvie Bonny
Chercheur

INRA-ESR
BP 01
78850 Grignon

que progressivement, en substitution ou en complémentarité des techniques actuelles. L'analyse conduite ici est axée sur ces nouvelles technologies qui sont souvent mal connues.

Dans un premier temps on esquisse un bilan de l'évolution technologique des dernières décennies en agriculture. On examine ensuite les répercussions possibles d'une meilleure connaissance du vivant, notamment des biotechnologies et du génie génétique, ainsi que les conséquences potentielles de l'emploi accru d'information et des NTI. Enfin, on s'interroge sur les possibilités de nourrir la population mondiale au XXI^e siècle. On prend comme exemple l'agriculture française en particulier dans les premières parties, mais les considérations seront ensuite élargies à l'échelle mondiale, notamment dans la dernière partie.

Bilan socio-économique et écologique de l'évolution technologique des dernières décennies dans l'agriculture occidentale : une esquisse à partir du cas français

Le modèle productif mis en œuvre en agriculture dans les décennies d'après-guerre visait notamment à accroître la production et la productivité de la terre et du travail, qui étaient fort basses. L'orientation très nette dans cette direction correspondait aux nécessités de cette période où la France était très déficitaire au niveau agro-alimentaire. Cette orientation a conduit à une amélioration notable des performances économiques et techniques de l'agriculture mais, à partir de 1975, diverses limites sont apparues à ce modèle. Toutefois si certains acteurs les ont soulignées et dénoncées de façon croissante depuis deux décennies, pour d'autres au contraire, en particulier pour les représentants de la profession, le modèle productiviste demeure souvent la référence et la voie de l'avenir.

On a cherché à esquisser un bilan rapide du modèle productiviste en France, sous l'angle notamment de sa durabilité, en établissant à la fois ses aspects positifs et ses impacts négatifs² aux niveaux socio-économique et écologique (tableau 1). Le modèle productiviste des décennies d'après-guerre paraît devenu actuellement moins bien adapté du fait du changement du contexte socio-économique général, de limites apparues de plus en plus

manifestes, de l'évolution de la demande adressée à l'agriculture, des modifications des réglementations internationales. Cependant, une nouvelle vague d'innovations scientifiques et technologiques commence à se diffuser : peut-elle être porteuse d'une possibilité de sortie de crise pour l'agriculture, ou au contraire risque-t-elle de la renforcer ? On retrouve là un questionnement proche de celui de Schumpeter, et de Freeman et Perez (1988) à propos des cycles Kondratieff. Certes les innovations techniques, même importantes, ne sont pas des *deus ex machina* résolvant les crises par miracle : leur impact dépend notamment de ceux qui les produisent et les mettent en œuvre, et elles doivent souvent aller de pair avec des innovations institutionnelles et sociales. Autrement dit, une évolution du modèle productif agricole vers une plus grande durabilité dépend de nombreux facteurs : la dimension technologique n'en est qu'un aspect.

Les répercussions possibles d'une meilleure connaissance et du maniement du vivant, et plus particulièrement des biotechnologies et du génie génétique

L'exploitation par l'homme du milieu naturel et du vivant est très ancienne et commence dès l'apparition de l'agriculture il y a 10 000 ans, voire même avant. Si les moyens d'intervention sont demeurés pendant des millénaires fort empiriques, ils ont pu cependant avoir un impact notable sur le milieu. Ainsi, il y a 2 000 ans, la région méditerranéenne a été déboisée et a souffert en certaines zones de surpâturage et d'érosion. Une première révolution agricole s'amorce au XVIII^e siècle en Europe occidentale : elle se traduit par la mise en culture des jachères et des pâturages indivis et par le développement des cultures fourragères permettant un doublement du chargement en bétail et donc des disponibilités en fumure organique et en force de traction animale. L'amélioration du travail et de la fertilité qui en résulte permet un accroissement de la production céréalière et le développement des plantes sarclées (betteraves, pommes de terre, etc.). Cette transformation technique est permise par la fin de l'Ancien Régime qui supprime diverses servitudes (assolement obligatoire, ouverture des chaumes et des jachères au

2. Cette présentation pourra paraître trop dichotomique alors qu'en fait les aspects positifs et négatifs sont souvent dialectiquement liés. On l'a adoptée dans le tableau car elle a l'avantage de condenser l'information, le lecteur pouvant établir lui-même la dialectique entre les différents aspects.

Tableau 1 - Une esquisse de bilan du modèle agricole « productiviste » occidental sous l'angle de sa durabilité à partir du cas français.



Aspects positifs du modèle productiviste	Impacts négatifs
<p>Au niveau socio-économique</p> <ul style="list-style-type: none">– Production abondante, diversifiée, à bas prix (le soutien des prix provenant notamment de leur bas niveau).– Amélioration du niveau de vie paysan.– Diminution des coûts de production des produits.– Sécurité alimentaire assurée sur le plan quantitatif, et qualitatif en général.– Passage d'un déficit agro-alimentaire à des excédents.– Amélioration de la productivité du travail, et moindre pénibilité de ce dernier.– L'exode agricole donne aux enfants d'agriculteurs la possibilité d'aller travailler dans d'autres secteurs.– La modernisation de l'agriculture revalorise ce métier jugé naguère comme routinier, archaïque et arriéré.– Réglementation de pratiques sociales anciennes abusives (ex. : le statut du fermage et du métayage). <p>Au niveau écologique</p> <ul style="list-style-type: none">– L'accroissement de la production par des techniques plus rationnelles permet d'éviter une pression humaine et animale trop forte en certaines zones entraînant surpâturage et érosion par exemple.– La qualité de la production s'améliore : le bétail et les plantes sont moins affectés de maladies (lutte contre la bruxellose et la tuberculose animale par exemple).– La meilleure connaissance des besoins nutritifs des végétaux et des animaux permet d'adapter les apports nutritionnels à leurs besoins et évite donc les carences limitant la production et entraînant des pertes.– L'emploi de pesticides diminue les pertes, accroît la production et permet d'éviter certaines toxines naturelles dangereuses (par exemple les mycotoxines) ; la réglementation des pesticides devient progressivement plus sévère et limite certains abus du passé en ce domaine.– L'injection d'énergie fossile (bien que faible) permet d'accroître fortement la production agricole, donc la captation d'énergie solaire par photosynthèse.– Les conditions d'élevage des animaux s'améliorent pour certains aspects, les bâtiments du passé étant souvent obscurs, mal aérés et insalubres.	<p>Au niveau socio-économique</p> <ul style="list-style-type: none">– Forte croissance des intrants d'origine industrielle et du capital nécessaire, d'où nécessité souvent pour l'exploitant de s'endetter lourdement.– Les gains de productivité de l'agriculture sont captés en grande partie par ses clients. L'agriculteur doit produire de plus en plus pour pouvoir rester dans la profession.– Fort exode agricole, d'où dépeuplement et quasi-abandon de certaines régions.– Apparition d'excédents coûteux à stocker, à dénaturer, ou à vendre sur le marché mondial.– Ces exportations agricoles vendues au cours mondial (bas) découragent la production locale des paysans dans divers pays en développement, les enfonçant davantage dans la dépendance.– L'agriculture devient de plus en plus tributaire des IAA et de la grande distribution.– Les aides publiques à l'agriculture atteignent un coût budgétaire important.– Disparition des cultures paysannes et des savoir-faire traditionnels. <p>Au niveau écologique</p> <ul style="list-style-type: none">– Gaspillage et pollution par les déjections animales du fait de la séparation entre cultures et élevage (remplaçant les systèmes de naguère qui les associaient) et concentration excessive des productions en certaines zones.– Diminution de la biodiversité au sein même d'une espèce (diversité génétique), du nombre des espèces (diversité spécifique) et dans les écosystèmes (diversité écologique).– Présence de résidus de pesticides et de métaux lourds dans les aliments, les sols et les écosystèmes.– Pollution des eaux par les nitrates et les phosphates.– Utilisation de ressources fossiles notamment de pétrole.– Inégalités spatiales avec surintensification en certaines régions où les pollutions sont fortes et dépeuplement en d'autres où le territoire n'est plus entretenu.– Dégradation des sols en certaines zones (érosion, baisse du taux d'humus).– Appauvrissement des paysages (disparition des haies, moindre diversité des agrosystèmes).

pâturage collectif, impossibilité de mettre en valeur les terres indivises, etc.) ainsi que les très lourdes charges pesant sur la paysannerie. Ces servitudes et ces charges bloquaient le système productif d'où crises et disettes, et ont été une des causes de la Révolution française (Mazoyer, 1982). Cette première révolution agricole a reposé ainsi largement au niveau technique sur les forces productives paysannes.

Une deuxième révolution agricole se produit au XX^e siècle (après 1945 en France) et se traduit par l'industrialisation de l'agriculture : emploi de tracteurs, d'engrais et pesticides chimiques, de nouvelles races et variétés fortement sélectionnées, et d'aliments concentrés fabriqués par l'industrie ; à l'aval transformation des produits agricoles par l'industrie agro-alimentaire et distribution finale par l'intermédiaire de grandes centrales. La production agricole croît fortement tandis que ses prix baissent. L'artificialisation de la nature s'accroît : si le milieu naturel avait déjà été très fortement modifié par les activités humaines dans le passé, le pouvoir d'action de l'homme s'accroît nettement et se traduit par le remembrement, la suppression de beaucoup de haies et de chemins creux, le développement du drainage et de l'irrigation, la production hors saison sous serre, l'élevage hors sol de certains animaux (porcs, volailles notamment), etc.

À partir des décennies 1980-1990 une nouvelle vague d'innovations majeures commence à se diffuser, fondée sur les NTI et les biotechnologies (Freeman et Perez, 1988 ; OCDE, 1989). La connaissance et les possibilités d'intervention sur le vivant s'accroissent considérablement. En effet à ces dernières, naguère empiriques, se substitue progressivement une compréhension des mécanismes intimes en jeu, donnant un pouvoir d'action beaucoup plus important. Si la révolution industrielle des XIX^e et XX^e siècles a été basée sur l'exploitation de la matière inerte (énergie, chimie, matériaux, etc.), des voies nouvelles apparaissent pour le XXI^e siècle avec les possibilités de manie- ment du vivant. Aussi, parle-t-on parfois de « l'ère de la génétique » (Blanc, 1986) ou de « la civilisation du gène » (Gros, 1989).

Le génie génétique permet en particulier de s'affranchir de la barrière d'espèce et même de règne : alors que pendant des millénaires en amélioration génétique on ne pouvait croiser entre eux

que des plantes ou des animaux de même espèce (ou d'espèces extrêmement proches), on peut désormais – du moins en théorie – prendre un gène dans n'importe quel organisme vivant et l'insérer dans n'importe quel autre pour obtenir une propriété recherchée (dans la réalité on se heurte bien sûr à des difficultés techniques qui font que le transfert et l'expression des gènes ne sont pas toujours aisés). Ainsi le génie génétique donne « la possibilité d'un asservissement génétique partiel de n'importe quel être vivant au message génétique d'un autre être vivant » (Kahn, 1996).

Les biotechnologies recouvrent d'autres techniques que le seul génie génétique : elles utilisent les avancées des dernières années et décennies en biologie moléculaire, microbiologie, enzymologie, génétique et physiologie. Divers secteurs de l'économie sont concernés : la pharmacie, la médecine, la chimie, l'énergie, l'environnement, l'industrie alimentaire, l'agriculture. Pour celle-ci les principales biotechniques utilisées sont la micropropagation (vitroculture), la transgénèse, la cartographie du génome, les nouveaux kits de diagnostic et vaccins, l'ingénierie biologique en matière de reproduction animale (fécondation *in vitro*, transfert d'embryon, clonage, etc.).

Les applications que l'on peut attendre pour les cultures sont nombreuses :

– des moyens nouveaux pour l'étude des organismes, permettant la compréhension de certains mécanismes fondamentaux, ce qui donne des clés pour pouvoir intervenir sur ceux-ci ;

– de nouvelles possibilités en matière d'amélioration des plantes, en particulier grâce à la transgénèse. On peut obtenir des variétés tolérantes aux herbicides, ou résistantes aux agents de maladies, aux insectes, aux virus, des variétés mieux adaptées à la sécheresse ou à la salinité des sols, des variétés enrichies en certaines protéines ou acides gras en fonction de leur utilisation dans l'alimentation humaine ou l'industrie, etc. ;

– on peut également faire produire diverses molécules pharmaceutiques ou substances par des plantes génétiquement modifiées ;

– on peut multiplier plus rapidement les plantes (clonage, micropropagation) et gagner du temps en matière de sélection grâce à la cartographie du génome, à l'haplodiploïdisation, etc.

Chez les animaux, les biotechnologies permettent également entre autres :

- une meilleure compréhension des mécanismes physiologiques ;
- une sélection génétique plus rapide ;
- le transfert de nouvelles caractéristiques en amélioration du bétail (animaux résistants aux maladies, modification de la composition du lait, etc.) ;
- l'utilisation des nouvelles techniques de reproduction (transfert d'embryon, clonage, etc.) ;
- la mise au point de nouveaux types de vaccins ;
- diverses applications en thérapeutique humaine, par exemple la production de protéines thérapeutiques dans le lait, l'utilisation d'animaux génétiquement modifiés comme modèles expérimentaux pour étudier des maladies humaines et leurs traitements, et peut-être demain la production d'organes « humanisés » greffables à l'homme palliant la pénurie d'organes humains.

Que peut-on attendre en agriculture de cette nouvelle vague d'innovations (Bonny, 1996) ? Les technologies sont souvent ambivalentes et tout dépend de l'utilisation qui en est faite. Ainsi, les biotechnologies peuvent se traduire par des effets fort divers, par exemple :

- accroître la production et par là les surplus (et les guerres commerciales) dans les pays riches, ou diminuer les intrants employés à niveau de production égal et améliorer la productivité de l'agriculture des Pays en Voie de Développement (PVD) ;
- réduire les quantités de pesticides utilisées, mais majorer le coût des semences et rendre leur achat nécessaire à chaque campagne en raison du développement des hybrides ;
- diminuer la diversité génétique avec le clonage et la micropropagation, ou l'augmenter grâce à la transgénèse, aux banques de gènes, au transfert d'embryons (utilisé pour sauver des races menacées) et à la meilleure connaissance des différents génotypes permise par la cartographie génétique ;
- produire des aliments de qualité (grâce à l'emploi de kits de diagnostic et à la transgénèse permettant de donner certaines caractéristiques désirées aux produits), ou bien polluer l'environ-

nement en cas de passage inopportun de gènes transférés à d'autres organismes ou induire chez l'homme des effets allergènes ;

– contribuer à une agriculture plus propre (utilisant moins de pesticides notamment), mais avec des transferts de gènes d'un organisme à un autre pouvant paraître « contre nature », et peut-être dangereux à long terme ;

– permettre par insertion de gènes dans des bactéries, des plantes ou des animaux, d'obtenir des protéines thérapeutiques indemnes de virus, mais relâcher dans l'environnement des Organismes Génétiquement Modifiés (OGM) pouvant entraîner des risques ;

– améliorer les capacités de production dans les PVD leur permettant une meilleure satisfaction de leurs besoins alimentaires, ou accroître le fossé entre le Nord et le Sud, en raison de la sophistication de certaines techniques les rendant parfois inaccessibles et de la perte par des pays agro-exportateurs du Sud de certains marchés si le Nord produit par voie biotechnologique certaines substances qu'ils exportent actuellement (Bouguerra, 1993 ; Kennedy, 1994 ; Solagral, 1993 ; Leisinger, 1995) ;

– mieux connaître le vivant et ses mécanismes, mais breveter les plantes transgéniques, ce qui privatiserait une partie des ressources génétiques auxquelles l'accès deviendrait coûteux ;

– naturaliser les techniques, ou bien au contraire artificialiser davantage le vivant.

Les biotechnologies et plus généralement la meilleure connaissance du vivant vont-elles conduire à une agriculture plus durable ou au contraire peuvent-elles induire des dangers pour l'environnement et le développement ? Les opinions sont partagées en ce domaine. Dans le tableau 2, nous avons cherché à esquisser un bilan bénéfiques/risques des biotechnologies en agriculture, notamment en ce qui concerne le génie génétique : cette technique est en effet celle qui fait principalement l'objet de controverses. Les points de vue dépendent en particulier des acteurs impliqués : firmes qui ont investi dans ce secteur, organismes de recherches publics, scientifiques de ce secteur, associations écologistes, associations de consommateurs, organisations non gouvernementales, autorités publiques, agriculteurs et leurs représentants pro-

Tableau 2. – Esquisse de bilan bénéfices/risques des biotechnologies en agriculture, notamment du transfert de gène (les avantages ou inconvénients mentionnés ne sont pas classés par ordre d'importance). ▼

Avantages potentiels	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure connaissance des mécanismes de fonctionnement du vivant : progrès du savoir, moyens d'intervention moins empiriques et plus précis. - Connaissance du génome ⇒ amélioration génétique plus efficace et plus raisonnée; meilleure évaluation de la diversité génétique. - Possibilité d'accroître la production (plantes adaptées à la sécheresse, à la salinité, résistantes à certains agresseurs, etc.) : ceci paraît indispensable face à la croissance prévue de la population. - Diminution des coûts de production, amélioration de l'efficacité de la production. - Production pouvant être plus facile pour l'agriculteur si les plantes et les animaux ont de meilleures défenses contre leurs agresseurs. - Diminution de la quantité de pesticides utilisés. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limitations des pertes avant ou après récolte. - Adaptation des plantes aux différents usages industriels ou types de consommateurs ⇒ produits agricoles ayant certaines caractéristiques souhaitées et amélioration de leur valeur nutritive, d'où moins de carences nutritionnelles. - Produits plus compétitifs que ceux obtenus par les méthodes classiques. - Nouvelles voies pour certaines thérapeutiques : production de molécules pharmaceutiques, et chez certains animaux d'organes « humanisés » greffables à l'homme. - Rentabilisation des investissements faits en ce domaine. - Naturalisation et biologisation des techniques utilisées en agriculture.
Risques potentiels liés à l'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> - Vision réductionniste du monde vivant, prenant mal en compte la complexité des organismes et des écosystèmes. - Risques de transfert de gènes à d'autres organismes, indésirable et difficile à contrôler. - Dangers éventuels liés à une transgression de la nature comme la transgénèse enfreint les limites entre espèces. - Risques environnementaux, perturbations des écosystèmes. - Risque d'allergénicité ou de toxicité pour l'homme des plantes transgéniques. - Risques d'apparition de nouveaux pathogènes. - Utilisation en grande quantité de certaines molécules intéressantes favorisant l'apparition de résistances, d'où perte de leur efficacité. - Risques imprévus par cascade de modifications ⇒ manquement au principe de précaution. 	<ul style="list-style-type: none"> - Forte pression pour une brevetisation du vivant et une privatisation de certaines ressources génétiques. - Dépendance accrue des agriculteurs par rapport à l'agrofourmiture. - Les biotechnologies visent principalement les marchés solvables, et non les besoins des zones où elles seraient le plus utiles. - Risque d'une croissance des écarts entre le Nord et le Sud (eg. perte de débouchés pour certains PVD agro-exportateurs). - Méfiance de l'opinion publique, d'où boycott des firmes impliquées et suspicion accrue envers les produits de l'agriculture. - Technique perçue comme « non nécessaire » (on peut s'en passer, d'autres méthodes existent, alors pourquoi aller dans une voie peut-être risquée ?). - Artificialisation et sophistication trop poussées de la production agricole.
Inconvénients si refus	<ul style="list-style-type: none"> - Ralentissement du progrès des connaissances dans le domaine du vivant. - Risque de refuser un progrès génétique qui demain aurait été indispensable pour pouvoir nourrir 10 milliards d'hommes = manquement au principe de précaution. - Si les pays occidentaux ont en général assez de terre pour produire sans cela, c'est moins le cas en Asie de l'Est qui risque d'accroître sa dépendance alimentaire. - Pour augmenter la production sans cela, on accroîtra d'autres risques environnementaux, notamment si on doit mettre en culture des terres fragiles : érosion, salinisation des sols, déforestation, etc. - Nécessité d'utiliser davantage de pesticides et de traitements chimiques, et d'en mettre au point sans cesse de nouveaux car les parasites développent des résistances¹). - Persistance de pertes de production importantes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Accroissement de l'emploi des ressources fossiles, la végétalochimie ayant du mal à remplacer la pétrochimie sans l'apport de la transgénèse. - Aggravation de la pollution car les biotechnologies auraient pu permettre de détoxifier certaines substances et d'employer moins de produits chimiques. - Limitations des possibilités de guérir certaines maladies humaines. - Non rentabilité des investissements faits en ce domaine d'où risque de faillite de certaines entreprises. - Perte de compétitivité des pays qui le refuseraient par rapport à ceux qui l'emploient. - Migration des firmes de ce secteur dans d'autres pays plus accueillants, d'où retard technologique des pays qui n'adopteraient pas les biotechnologies.

1. Quand on insère un gène de résistance dans une plante, les parasites peuvent également contourner celle-ci, ce qui conduit à devoir diversifier les stratégies ou utiliser plusieurs gènes de résistance.

fessionnels, firmes agro-alimentaires du secteur de la distribution, etc.

Comme pour toute technique, les répercussions des biotechnologies et de la meilleure connaissance du vivant dépendent notamment des orientations qu'on leur donne. Or, pour les biotechnologies, il y a beaucoup d'incertitudes. Incertitudes scientifiques et techniques : comme elles en sont à leurs débuts, elles nécessitent de nombreuses recherches et pourraient avoir des développements ou répercussions inattendus. Fortes incertitudes également en matière d'acceptabilité par l'opinion publique, ce qui influe sur la réglementation et les autorisations de mise sur le marché. Incertitudes aussi en matière des stratégies des acteurs impliqués : les firmes privées occupent une place prépondérante en matière de recherches en ce domaine, elles risquent fort de privilégier des orientations correspondant à la demande des marchés solvables plutôt que des voies permettant l'amélioration de la situation agricole et alimentaire des populations à très faible pouvoir d'achat : « *companies go where the money is, and there is more money to be made (...) for Americans than (...) for Africans* » (Mellon, 1996).

Toutefois les biotechnologies et le génie génétique sont aussi utilisés dans les Centres internationaux de recherche agronomique (CGIAR), par des organismes de recherche de certains pays en développement³, par ceux des pays développés axés vers la coopération (comme en France l'ORSTOM ou le CIRAD⁴) et par ailleurs, l'Organisation des Nations-Unies pour le Développement Industriel (ONUDI) a créé un Centre international pour le génie génétique et la biotechnologie (l'ICGEB). Autrement dit, certaines recherches en ce domaine sont tournées vers les pays en développement, mais elles souffrent assez souvent d'un manque de ressources. Anderson, Pardey et Roseboom (1994) ont ainsi établi que sur la période 1981-1985, les dépenses en recherche agricole par actif de l'agriculture étaient de 3,1\$ en 1980 (PPA) en Afrique subsaharienne (37 pays) contre 213,5 \$ en 1980 (PPA) dans les 18 pays les plus développés du monde⁵ ; de plus les ressources affectées à la recherche agronomique dans les pays les plus pauvres ont souvent régressé ces dernières années (Pardey et Alston, 1995). Ainsi, l'un des risques majeurs des biotechnologies est qu'elles ne soient pas suffisamment orientées vers la demande de ceux qui en auraient le plus besoin.

Les conséquences potentielles de l'emploi accru d'information, de connaissances et de NTI

Une autre évolution technique en cours actuellement en agriculture est l'emploi croissant d'information. Cela recouvre deux aspects : le premier correspond à l'information au sens de connaissances, de formation, de savoir, et aussi de données à recueillir, à analyser et interpréter pour décider des interventions à faire dans les cultures ou en élevage. Le deuxième aspect renvoie aux NTI prises dans un sens large : informatique, télématique, électronique dans le matériel, systèmes de capteurs et de monitoring, télédétection, réseaux internationaux de transmission d'informations, etc. On notera que tous les niveaux de la production sont concernés depuis la parcelle et l'exploitation jusqu'à l'échelle planétaire sans oublier les échelons local, régional ou national.

Si cette vague d'innovations provient au départ essentiellement d'avancées scientifiques et techniques, la recherche publique et les firmes en ont tiré diverses applications permettant d'adapter plus finement les apports d'intrants aux besoins des cultures et des élevages, d'une part, dans un souci d'efficacité et de réduction des coûts, d'autre part, pour diminuer les pollutions et ainsi améliorer l'image de marque des entreprises et celle de l'agriculture, eu égard aux préoccupations environnementales (Bonny, 1994 a).

Ces applications pouvant contribuer à une plus grande durabilité grâce à un meilleur ajustement des apports aux besoins reposent sur (Bonny, 1994 b) :

- une meilleure connaissance des besoins des plantes et des animaux à leurs différents stades de croissance. En matière de nutrition minérale des végétaux, on est parvenu à une connaissance fine des exigences des diverses plantes à leurs différentes phases de croissance. En alimentation des porcs et des volailles, on cherche à mieux adapter les apports protéiques aux besoins exacts ; ceci évite notamment les apports en excès pour satisfaire les besoins en acides aminés limitants, d'où la possibilité de réduire les rejets azotés et les pollutions ;
- l'emploi de divers outils de diagnostic ou de pilotage des cultures pour évaluer les besoins des plantes à chaque période en engrais, en traitements

3. La Chine cultivait déjà en 1994-95 près d'1 million d'ha de plantes transgéniques, en particulier celle du tabac (cette plante est une des plus faciles à transporter (James, Krattiger, 1996).

4. ORSTOM : Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération. CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

5. Les PPA (parités de pouvoir d'achat) sont un taux de conversion égalisant le pouvoir d'achat des différentes monnaies : 1 \$ PPA permet d'acheter le même panier de biens et services dans différents pays.

phytosanitaires et en eau. Ainsi, en fertilisation, on peut utiliser les techniques de fertilisation raisonnée (méthode des bilans), puis le dosage des nitrates dans le jus de base de tige pour le blé pour déterminer la quantité d'azote à épandre ; des logiciels ont aussi été mis au point pour l'aide à la décision en matière de gestion des effluents et de fertilisation. En protection des plantes, on peut évaluer les risques par avertissements agrométéorologiques (basés sur divers modèles) diffusés par le Service de protection des végétaux, repérage voire comptage des insectes présents dans la parcelle, kits de détection des agents pathogènes, etc. : cela peut permettre d'adapter les épandages en conséquence au lieu de faire des traitements systématiques d'assurance. En matière d'irrigation, il est aussi possible d'économiser l'eau, d'établir plus précisément les doses nécessaires, de détecter le moment où l'irrigation est indispensable à l'aide de divers capteurs évaluant les besoins ; on s'efforce aussi de gérer la production en trouvant des variétés ou espèces adaptées et en déterminant quelles cultures il vaut mieux irriguer ; on commence également à préserver la qualité de l'eau en évitant le lessivage d'engrais par excès d'eau. En production sous serre, on cherche aussi à gérer finement l'irrigation, la fertilisation, le climat (chauffage) en fonction des besoins des cultures et du coût des intrants grâce à des capteurs, des mécanismes de régulation électroniques et des ordinateurs spécialisés, et on recycle de plus en plus les rejets de solutions nutritives ;

– l'emploi de diverses méthodes pour faire les apports juste là où il y en a besoin : essai d'application plus précise des traitements phytosanitaires sur les plantes sans déborder en zone nue, épandage localisé des engrais dans la parcelle grâce à une carte mémorisée de ses hétérogénéités, traitement herbicide appliqué dans le champ en fonction de la présence d'adventices, irrigation localisée, dans les serres chauffage en des zones déterminées, etc.

Il faut toutefois se garder du mirage technologique en ce domaine. Certaines de ces techniques rencontrent des difficultés dans leur diffusion : elles réclament souvent plus de temps en observations, en relevés, en données à analyser que de simples traitements systématiques selon un calendrier préétabli et elles peuvent en outre faire courir un risque de réduction de rendement. Certaines peuvent être assez difficilement accessibles en termes de formation ou d'investissement nécessaires. De ce fait, les incitations à leur emploi sont sou-

vent insuffisantes, d'autant plus que le prix de divers intrants est plutôt bas. Par ailleurs, l'épandage localisé des engrais dans la parcelle grâce à une carte de ses hétérogénéités de rendement à la récolte précédente ne va pas de soi : encore faut-il pouvoir émettre un diagnostic précis sur la cause des rendements moins élevés et en déduire des tactiques de conduite en conséquence pour la culture suivante.

L'emploi croissant d'information et de NTI est également susceptible de contribuer à une plus grande durabilité par d'autres voies :

– une diminution des consommations d'énergie par unité de produit car les mécanismes de régulation peuvent améliorer l'efficacité énergétique ; l'adaptation plus fine des apports d'intrants aux besoins des cultures va également dans ce sens. Plus généralement, l'information est un moyen de réduire les dépenses d'énergie car elle est néguentropique : elle rend souvent possibles des économies d'énergie, d'intrants et d'interventions culturales (Bonny, 1993). De son côté la connaissance des processus du vivant (au sens large), son utilisation et la formation en ces domaines peuvent permettre de limiter le recours aux produits chimiques en valorisant mieux les mécanismes biologiques et en faisant davantage appel à eux (ex. le développement de variétés résistantes aux agresseurs, la lutte biologique et intégrée, les possibilités de synergie entre les plantes et certains micro-organismes) ;

– des interventions plus rapides dans le domaine phytosanitaire ou économique, ainsi qu'une plus grande vigilance, ce qui peut permettre d'accroître la réactivité des producteurs ;

– une amélioration des conditions de travail grâce aux automatismes (moindre pénibilité par exemple pour la conduite du tracteur et diminution de tâches répétitives).

Mais d'autres aspects de l'information et des NTI paraissent plus mitigés et parfois même négatifs :

– à l'échelle mondiale, les NTI entraînent une circulation quasi instantanée d'informations, ce qui peut accentuer les fluctuations des prix des produits agricoles et provoquer des mouvements de spéculation, aggravant ainsi l'instabilité des marchés en fonction d'indications ou de rumeurs sur le climat, les mouvements politiques ou économiques, etc. (voir la théorie du chaos) ;

– les nouvelles technologies permettent l'accès à un grand nombre d'informations et de données. Qui en aura la maîtrise et le contrôle ? Parfois l'agriculteur, chez qui l'informatique contribue à une meilleure connaissance de certains flux et à une plus grande vigilance. Parfois une collectivité ou une administration régionale, nationale ou internationale : la télédétection peut permettre ainsi une observation et une meilleure gestion du territoire ou de la planète (on peut par exemple évaluer l'étendue des déforestations ou d'une sécheresse). Parfois enfin ce peut être une firme ou une nation l'utilisant dans la guerre commerciale (ou la guerre tout court) ;

– les NTI sont adoptées en premier lieu par de grandes exploitations ou par des agriculteurs ayant un niveau de formation élevé (notamment pour l'informatique) : de ce fait elles paraissent plutôt un facteur de renforcement des disparités entre exploitations et entre pays ;

– les NTI peuvent permettre à l'agriculteur de s'occuper de plus d'hectares ou d'animaux, ce qui accroît la productivité du travail et peut contribuer à diminuer les coûts de production, mais aussi l'emploi agricole. Toutefois, d'autres voies sont envisageables pour maintenir une activité rurale (produits de qualité, transformation et vente à la ferme, activités de services, etc.). Par ailleurs, le télétravail et les NTI pourraient contribuer à créer des emplois à la campagne. Cette tendance est encore assez limitée, mais elle pourrait se développer dans la mesure où en France beaucoup d'urbains aspirent à vivre à la campagne et où par ailleurs un renchérissement pétrolier risque de rendre un jour les déplacements du domicile à la ville voisine coûteux ;

– le travail agricole devient plus abstrait, avec une certaine diminution du contact direct avec les animaux et une médiation plus fréquente par la machine ou l'écran, ce qui peut le rendre plus difficilement accessible à certains ;

– la standardisation des façons de produire risque de s'accroître, allant de pair avec une *quasi* disparition des cultures paysannes locales. Or, une certaine diversité mérite aussi d'être préservée en ce domaine, sans tomber dans l'idéalisation d'un passé souvent dur et bien éloigné de l'image bucolique qui en est parfois présentée.

Plus généralement, avec une meilleure formation et des connaissances scientifiques et techniques

accrues, on a les moyens de mieux gérer les ressources naturelles. Mais d'une part, même dans les pays riches, les techniques plus efficaces et moins polluantes évoquées ci-dessus peuvent se heurter à des obstacles économiques limitant leur adoption : il faut que leur coût en investissement et en temps soit inférieur aux traitements économisés, ou que les incitations à une production plus respectueuse de l'environnement soient suffisamment fortes. Or actuellement, le bas prix de l'eau ou du pétrole ne conduit guère à chercher à réduire leur consommation, alors que pourtant de graves tensions pourraient apparaître demain pour ces ressources et sont déjà fortes en certaines régions du monde. D'autre part, dans les pays moins développés, il serait souhaitable de mieux allier les préconisations techniques aux savoirs traditionnels et, plutôt que d'adopter une démarche descendante dans le développement, de partir davantage des connaissances et des besoins des paysans. La recherche d'un développement durable nécessite des techniques adaptées et appropriables, question complexe qui a déjà fait couler beaucoup d'encre...

Les possibilités de nourrir la population mondiale en croissance

■ *Un rappel sur la situation actuelle et les interrogations pour l'avenir*

La FAO (1996a) estime que 20 % de la population des pays en développement (ce qui représente environ les trois quarts de l'humanité) souffrent de la faim, c'est-à-dire d'une carence en énergie alimentaire. Ce chiffre ne comprend pas les populations qui en sont aussi affectées dans les pays industrialisés et dans les économies en transition. Dans les pays en développement, environ un tiers des enfants présentent un déficit pondéral et davantage encore ont une croissance insuffisante. La proportion de personnes sous-alimentées atteignait 37 % en Afrique subsaharienne et 24 % en Asie du Sud dans les années 1988-90 (Alexandratos, 1995).

Klatzmann (1991) dressait un bilan encore plus pessimiste et estimait qu'en 1990 pour une population totale de plus de cinq milliards d'hommes :

– plus d'1/2 milliard ont une alimentation trop riche (excès de graisses et sucres rapides induisant diverses pathologies) ;

- quelques centaines de millions ont une alimentation satisfaisante ;
- 1,5 milliard ont un apport calorique suffisant, mais souffrent de malnutrition protéique ;
- 1,5 milliard d'hommes au moins souffrent de sous-alimentation (apport calorique insuffisant et mal équilibré) ;
- quelques centaines de millions, peut-être un 1/2 milliard, souffrent quotidiennement de la faim.

On ne rentrera pas ici dans les facteurs expliquant les différences d'estimation et les nombreux éléments à considérer (depuis les carences en vitamines et en minéraux à prendre aussi en compte jusqu'à la répartition inégale des consommations dans chaque pays et même chaque famille). Le point important est qu'en 2025 la population mondiale atteindra environ 8,3 milliards d'hommes et devra se rapprocher de 10 milliards après 2050. La terre pourra-t-elle nourrir durablement près de dix milliards d'hommes alors que dès aujourd'hui avec moins de six milliards la malnutrition est forte en diverses régions ?

Cette question a fait l'objet de nombreux débats opposant par exemple les « éco-pessimistes » à des « techno-optimistes ». Pour les premiers, il ne paraît pas possible de nourrir convenablement dix milliards d'hommes sans détruire le milieu naturel – du moins en certains lieux – ce qui en annulerait rapidement la possibilité. Pour les seconds, le progrès technique à venir résoudra peu à peu les problèmes d'autant plus que, quand des ressources deviennent rares, leur prix augmente ce qui incite à les économiser et à mettre au point des technologies plus économes en ces facteurs. Cependant, de graves problèmes qui limitent déjà actuellement la production en certaines zones risquent de s'accroître, par exemple l'insuffisance de ressources en eau, la salinisation des sols, l'érosion, etc.

Un autre aspect est aussi l'objet de débats et de conjectures. Outre l'accroissement du nombre des hommes, l'évolution du modèle de consommation alimentaire joue un rôle important (Collomb, 1996). Divers auteurs dont Lester Brown ont souligné que, si l'alimentation des pays en cours d'industrialisation rapide comme la Chine s'orientait avec leur croissance vers une part importante de produits carnés, comme c'est le cas en Occident, on risquait de manquer de céréales (Worldwatch Institute,

1995). En effet, à côté de formes d'élevage plutôt extensif sur des terres difficilement cultivables, où il n'y a pas de concurrence entre cultures et élevage mais plus souvent complémentarité, s'est développé depuis quelques décennies l'élevage intensif et hors sol utilisant une forte proportion de céréales et de protéagineux. Or, le rendement de la conversion des calories végétales en calories animales étant faible, une alimentation avec une proportion importante de viande nécessite beaucoup de calories végétales initiales dont une forte part sert à nourrir les animaux. Pourtant, une nourriture équilibrée est possible avec une proportion assez réduite de calories d'origine animale, à condition de suivre quelques règles dans la composition des repas en complémentant, par exemple, les aliments à base de céréales par des légumineuses, ce que la plupart des peuples du monde ont mis au point depuis longtemps. Avec ce type de modèle alimentaire moins carné, le volume de la production agricole à prévoir est moindre. Mais les choix nutritionnels dépendent de multiples facteurs : habitudes de l'enfance, coutumes régionales, sociales et/ou religieuses, revenus, aspirations diverses, et ne suivent pas nécessairement les impératifs éthiques...

■ *Les problèmes en cause : un bref aperçu*

La production actuelle de la terre serait suffisante si elle était répartie équitablement pour nourrir les 5,7 milliards d'hommes de 1995. La malnutrition et la famine, dans certains pays ou certaines populations, et les risques pour l'avenir, proviennent de divers facteurs :

- la pauvreté empêchant d'acheter les denrées alimentaires ;
- une surface en terres arables par actif agricole ou par habitant très faible (tableau 3). Ainsi, en Chine, en 1994, l'actif agricole disposait en moyenne de 0,2 ha contre plus de 110 ha au Canada et en Australie !
- des potentiels agropédoclimatiques et des ressources en eau trop limités en certains pays ;
- une pénurie en moyens de production, en capital et en formation. Ainsi, un actif agricole américain a près de deux tracteurs (en général puissants) à sa disposition, ce qui lui permet de cultiver une vaste surface et d'avoir une productivité du travail élevée. Au Bangladesh, au Népal, dans divers pays

	Surface moyenne cultivée par actif agricole (1994) (ha) ¹	Nombre de tracteurs pour 1 000 actifs agricoles (1994)	Engrais utilisés (kg d'éléments fertilisants par ha) ²	Proportion de la surface cultivée irriguée (1994) (%)	Rendement céréalier moyen (q/ha) (1994-96) ³	Production agricole par actif en tonnes d'équivalent-céréales ⁴
Monde entier	1,13	20,2	83	17	28,0	3,16
Australie	113	754	35	4	16,34	185
Canada	113	1832	49	2	26,73	301
USA	53	1358	103	11	51,02	271
France	17,3	1279	242	8	66,45	115
Royaume-Uni	9,8	817	384	2	66,97	66
Pays-Bas	3,1	595	545	60	78,00	24
Japon	1,15	533	411	63	61,15	7
Inde	0,69	5,1	73	28	21,40	1,48
Chine	0,19	1,4	618	52	46,43	0,88
Bangladesh	0,27	0,14	108	34	25,32	0,68
Népal	0,25	0,49	38	36	19,01	0,48
Égypte	0,46	10,2	243	100	59,56	2,74
Congo	0,36	1,5	11	1	9,36	0,34
Burundi	0,39	0,06	3	1	12,74	0,50
Rwanda	0,31	0,02	1	0	14,9	0,46

1. Cette surface comprend les cultures temporaires et les cultures permanentes (arbres fruitiers, vigne) mais exclut les pâturages permanents.

2. Somme des engrais azotés, phosphatés et potassiques achetés dans le commerce utilisés par ha de terres cultivées en 1994.

3. Rendement moyen annuel toutes céréales comprises (blé, riz, maïs, mil, sorgho, etc.). S'il y a deux cultures la même année sur une même surface, le rendement annuel moyen est obtenu en additionnant les deux productions.

4. Cette valeur est obtenue en multipliant la surface cultivée par actif agricole par le rendement céréalier moyen. Ce n'est donc pas la production céréalienne réelle, mais l'équivalent céréalier de la production. Les productions animales ne sont pas prises en compte (ni celles conduites sur les pâturages permanents, ni celles obtenues avec une alimentation concentrée). En Europe la surface cultivée par actif étant plus importante en grandes cultures, la production par actif y est plus élevée que les quantités indiquées.

NB. Toutes ces données – bien qu'issues de statistiques officielles – sont approximatives, et ne prennent pas en compte les disparités à l'intérieur de chaque pays, mais elles fournissent des éléments de comparaison en ordre de grandeur.

▲ Tableau 3. – Inégalités des moyens de production et de la production moyenne par actif agricole (*) entre divers pays (tableau établi à partir des statistiques de la FAO).

africains, il y a moins d'un tracteur pour 1 000 actifs agricoles ; le travail est effectué par l'homme ou l'animal de trait, ce qui limite considérablement la productivité malgré leur dur labeur. En effet, la puissance musculaire humaine est d'environ 70 W alors qu'un tracteur atteint souvent 70 kW, soit 1 000 fois plus.

De la sorte, aux États-Unis ou au Canada, l'actif agricole peut produire l'équivalent de 300 tonnes de céréales par an (et même beaucoup plus pour les producteurs spécialisés), tandis qu'en Afrique

ou en Asie, vu les moyens très limités dont il dispose, il n'obtient souvent que l'équivalent d'une demi à une tonne de céréales par an, ce qui lui permet à peine de nourrir sa famille (tableau 3). La faible rémunération du travail dans les PVD ne saurait compenser un tel écart de productivité. Les pâturages permanents disponibles sont également plus importants par actif dans les pays développés que dans le Tiers-Monde où de surcroît leur productivité est souvent très basse (tableau 4).

D'autres facteurs expliquent la faible productivité

de l'agriculture du Tiers-Monde. Par exemple, dans certains cas les paysans pourraient produire davantage. Mais les importations agro-alimentaires à bas prix et certains types d'aide alimentaire (hors situations d'urgence ou de catastrophe) en provenance des pays occidentaux déstructurent et découragent leur production pas assez compétitive, et les habitants des villes préfèrent désormais de plus en plus les produits importés. Cela contribue à l'exode des paysans vers les banlieues des

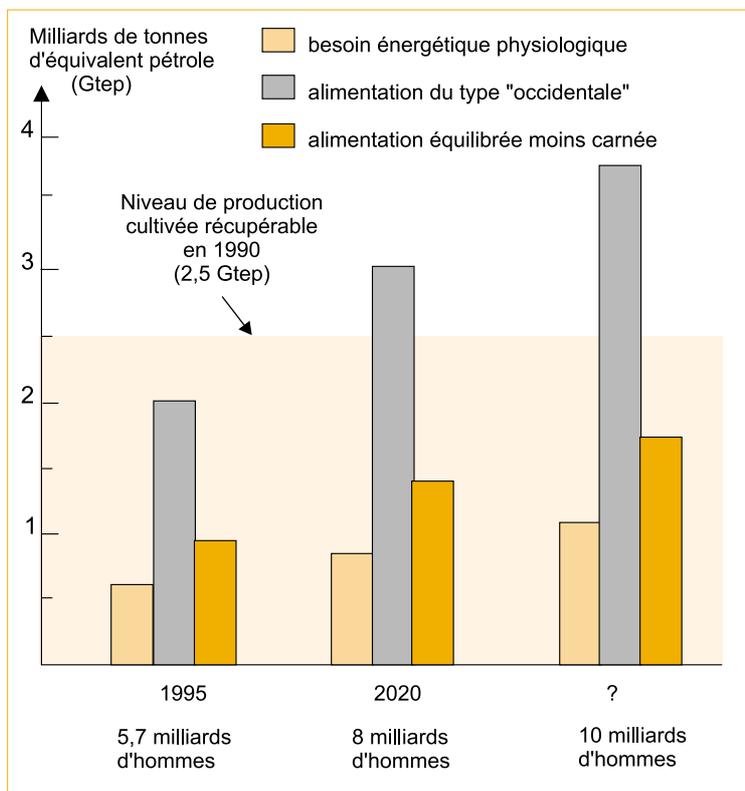
mégapoles où se créent des conditions de vie souvent invivables et explosives. Mais dans le même temps, les importations alimentaires depuis le marché mondial à un cours plutôt bas permettent à une proportion plus importante d'urbains d'acheter leurs aliments, ce qui évite (ou repousse) de graves crises, des « émeutes de la faim ».

Tableau 4. – Surfaces moyennes disponibles par actif agricole (*) en 1994 (ha) - (Evaluations à partir des statistiques de la FAO). ▼

	Terres cultivées	Pâturages permanents
Monde entier	1,13	32,6
Pays développés	15,5	28,2
Pays en développement	0,72	2,0
Asie	0,47	0,79
Chine	0,19	0,78
Inde	0,69	0,05

(*) Ne sont comptées que les personnes économiquement actives en agriculture (et non l'ensemble de la population agricole), mais une proportion sensible peut l'être à temps partiel.

Figure 1. – Estimation approximative des besoins alimentaires humains au XXI^e siècle selon divers types d'alimentation. ▼



■ Quelques solutions envisageables pour améliorer les disponibilités alimentaires

La production des terres cultivées en 1990-1995 était suffisante – si elle avait été mieux répartie – pour nourrir correctement les 5,5 milliards d'hommes d'alors (tableau 5 et figure 1). Et cela malgré un niveau moyen de productivité à l'ha bas : le rendement céréalier mondial était en moyenne de 28 q/ha en 1994-96 (moyenne triennale) avec de fortes variations selon les pays. Ainsi, il était de l'ordre de 3 à 4 q/ha au Niger, en Angola, au Soudan contre 78 q/ha en Hollande et environ 66-67 q au Royaume-Uni et en France. Bien que le rendement global de la photosynthèse soit faible (Bonny, 1997a), la production d'énergie végétale nette sur terre est considérable comparée aux besoins humains. Certes, la majeure partie est produite dans les océans, forêts et savanes (Barbault, 1995), mais même si l'on ne considère que la production des terres mises en valeur aujourd'hui et à leur niveau actuel de rendement, elle est suffisante globalement pour couvrir les besoins nutritionnels de 10 milliards d'hommes s'ils ont une alimentation équilibrée mais peu carnée (tableau 5) ; une évaluation similaire a été faite par Waggoner (1994).

Pour améliorer l'état nutritionnel de tous dans chaque pays (ce qui supposerait une meilleure répartition des richesses) et faire face à la croissance de la population de façon durable, il faudrait :

- accroître le niveau de développement des plus pauvres pour faciliter leur accès à la nourriture et à de meilleures conditions de vie (eau potable, hygiène, etc.) ;

- favoriser et augmenter la production agricole dans les PVD tout en respectant l'environnement pour éviter une dépendance alimentaire trop forte et un développement agricole non viable ; améliorer les conditions de transport et de stockage après récolte est aussi indispensable car actuellement les pertes y sont notables.

Tableau 5. – Comparaison des besoins humains avec la production d'énergie végétale nette chaque année et celle récupérable pour l'alimentation à l'échelle de l'ensemble de la planète (évaluations approximatives : il s'agit d'ordres de grandeur). ▼

	Quantité	en % de l'énergie contenue dans la production	
		végétale totale nette	cultivée récupérable (1990)
– Production végétale nette chaque année (*)	182 Gt	-	-
– Quantité d'énergie contenue dans cette production (sur la base de 0,43 tep/t)	73 Gtep	100	-
– Quantité d'énergie (fossile et renouvelable) consommée en 1990 pour les besoins humains (transports, chaleur, moteurs, etc.)	8,8 Gtep	12,1	-
– production des terres cultivées vers 1990	11 Gt		
☞ soit une quantité d'énergie de	4,4 Gtep	6,0	-
– Production récupérable des terres cultivées et des pâturages permanents (**)	2,5 Gtep	3,4	100
– Besoins alimentaires :			
☞ en 1995, pour 5,7 milliards d'hommes			
• base physiologique (3 000 kcal/jour)	0,62 Gtep	0,8	25
• équivalent en énergie végétale primaire d'une alimentation			
- de type occidental avec 33 % de calories d'origine animale, soit un équivalent en énergie végétale initiale de 10 400 kcal	2,01 Gtep	2,8	80
- équilibrée mais moins carnée (3 000 kcal/jour avec 10 % de calories d'origine animale, soit une énergie végétale primaire de 4 800 kcal)	0,93 Gtep	1,3	37
☞ en 2020 pour 8 milliards d'hommes			
• base physiologique	0,88 Gtep	1,2	35
• alimentation occidentale	3,04 Gtep	4,2	122
• alimentation équilibrée moins carnée	1,40 Gtep	1,9	56
☞ pour 10 milliards d'hommes			
• base physiologique	1,10 Gtep	1,5	44
• alimentation occidentale	3,80 Gtep	5,2	152
• alimentation équilibrée moins carnée	1,75 Gtep	2,4	70

G = giga = 10⁹

tep = tonne équivalent pétrole. (1 tep = 41,8 GJoules = 10¹⁰ calories)

(*) Production spontanée ou cultivée, végétaux terrestres et marins (la production des continents représente environ les deux tiers du total). Il s'agit d'une production nette : l'énergie nécessaire à la respiration des plantes est déduite (source : Barbault 1995, p. 218).

(**) On ne peut récupérer que la moitié au plus de la production des terres cultivées compte tenu des parties non consommables par l'homme ; à cela on doit déduire les semences et certaines pertes difficilement évitables. On y a ajouté une estimation très approximative de la production des pâturages permanents récupérable par le bétail et transformable en produits animaux. Il ne faut pas oublier par ailleurs que dans les pays en développement on utilise des animaux de trait.

NB. Volontairement il n'a pas été tenu compte de l'évolution possible des rendements ou des surfaces cultivées dans l'avenir (sur ces points, cf. par exemple Luyten, 1995). Par ailleurs il s'agit là de considérations « physiques » ne prenant pas en compte les aspects socio-économiques, ni les problèmes de répartition.

Accroître la production alimentaire ou le niveau de développement dans le Tiers-Monde paraît « techniquement » possible, les obstacles étant surtout d'ordre socio-économique, géopolitique et institutionnel. Cependant, les possibilités d'accroître fortement la production agricole et alimentaire tout en préservant l'environnement pour assurer la durabilité de la production font l'objet d'un important questionnement. De nombreux auteurs (entre autres Klatzmann, 1991 ; Worldwatch Institute, 1995) ont soulevé divers problèmes en cause. On évoque notamment le manque de terres arables dans certaines régions : ainsi, en Chine il y a actuellement 0,08 ha (800 m²) de terres cultivées par habitant, et les possibilités de les étendre paraissent réduites. Toutefois, le Japon ou la Hollande ont encore moins de terres cultivées par habitant (respectivement 0,04 ha/habitant et 0,06 ha/habitant) ce qui ne les empêche pas d'avoir un haut niveau de développement (qu'on le mesure en valeur du PIB par personne ou en indice de développement humain). En effet, au Japon, les exportations de biens et services non agricoles compensent des importations agro-alimentaires importantes. Quant à la Hollande, elle est même fortement agro-exportatrice grâce à une productivité agricole très élevée. On objectera que cela y est obtenu dans un contexte agroclimatique favorable, avec beaucoup d'importations de matières premières et une pollution sensible. Toutefois, le souci de diminuer cette dernière commence à porter ses fruits, et un facteur particulièrement déterminant de la productivité est le haut niveau de connaissances scientifiques et techniques mobilisées dans la production agricole.

Sur le plan économique et commercial, pour satisfaire les besoins alimentaires de tous à l'échelle mondiale sans dégrader l'environnement, on peut théoriquement envisager plusieurs possibilités :

– un haut niveau d'échanges internationaux. La Chine par exemple exporterait des biens industriels et importerait une partie de ses besoins alimentaires. À l'inverse les États-Unis, la France, etc. exporteraient des produits agricoles (leur potentiel productif en ce domaine est important), et importeraient une part assez notable de leurs biens manufacturés. Toutefois, ce scénario, s'il est très accentué présente l'inconvénient d'un fort niveau de dépendance alimentaire – domaine où une certaine sécurité est au contraire recherchée pour éviter

tout chantage à l'embargo alimentaire en cas de conflit –, et par ailleurs il risque de poser des problèmes en matière d'emploi et de chômage ; et cela d'autant plus qu'il va actuellement de pair avec une compétition féroce ;

– une recherche assez marquée d'autosuffisance avec un certain protectionnisme. Les dangers de cette option, si elle est trop accentuée, sont connus : niveau de vie plus bas, mais aussi risques de dégradation écologique plus aigus car les ressources en eau, énergie, terres arables, etc. sont réparties inégalement par le monde. Cependant, il paraît souhaitable d'encourager la production locale, en particulier en Afrique, mais en respectant et tirant mieux parti de l'environnement ;

– un développement des échanges inter-régionaux, une amélioration de la production dans chaque grande région et une recherche de coopération. Une équipe hollandaise a cherché à établir si la terre pouvait nourrir la population en 2040 (Penning de Vries, Van Keulen, Rabbinge, 1995). Les calculs ont été faits en découpant le monde en quinze grandes régions avec trois scénarios de croissance de la population (en 2040, elle est dans le scénario intermédiaire de 9,4 milliards), trois types de modèles de consommation alimentaire (plus ou moins riche en viande) et deux façons de cultiver (haut ou bas niveau d'intrants). Il en ressort que le potentiel productif agricole dépasse en général largement la demande, sauf en Asie du Sud dans le cas où la population a une nourriture riche en produits animaux mais où on emploie peu d'intrants. Certes, cette estimation repose sur un potentiel productif des cultures alors que les rendements réels pourront être différents ; cependant elle a l'intérêt de montrer que les possibilités techniques existent, ce sont plutôt des aspects socio-économiques qui font obstacle.

■ **Les possibilités techniques**

Pour accroître la nourriture disponible, améliorer sa répartition et la durabilité de celle-ci, de nombreuses possibilités sont envisageables et pourraient être combinées :

– une alimentation moins riche en viande dans certaines catégories de population des pays riches serait souhaitable d'un point de vue diététique ; des quantités supplémentaires de céréales, protéagineux, etc. seraient alors disponibles. Mais, cela suppose que les pays du Tiers-Monde puis-

sent les acheter, donc développent d'autres activités leur assurant des ressources suffisantes. Les producteurs des pays riches touchés par une moindre consommation de viande devraient de leur côté pouvoir se diversifier vers d'autres orientations (Bonny, 1997 b). Mais cette vision normative n'est pas aisée à mettre en pratique...

– d'autres types de protéines que celles d'origine animale peuvent être utilisées pour assurer une ration alimentaire équilibrée et éviter par exemple les carences en lysine. Il s'agit non seulement des protéines provenant des légumineuses (soja, pois chiches, lentilles, etc.), mais aussi de celles issues de micro-organismes (levures, bactéries ou algues microscopiques). Certes, les essais de production de POU (Protéines d'organismes unicellulaires) lancés au début des années 1970 ont rencontré divers obstacles et ne se sont pas développés (Byé et Mounier, 1984). Mais 30 ou 40 ans plus tard, le contexte et les connaissances ayant évolué, les POU pourraient faire une réapparition inattendue. Autrement dit, les pays d'Asie pourraient peut-être demain assurer une part de leurs besoins en protéines par ce moyen (ou d'autres), d'autant plus qu'il existe une tradition d'utilisation de produits fermentés et d'algues dans leur alimentation. Mais des recherches sont nécessaires en ce domaine ;

– une réduction des pertes entre le champ et l'assiette, qui sont actuellement importantes.

Le niveau actuel de productivité de l'agriculture mondiale est bas comparé à son potentiel productif même si des limites notables existent (climat, ressources en eau, etc.). Ainsi, en France, où pourtant les rendements sont parmi les plus élevés du monde, il est possible de les accroître encore en respectant l'environnement, en particulier par une adaptation fine des apports d'intrants (engrais, traitements, eau) aux besoins des cultures à chaque période (Bonny, 1997a). Mais l'orientation de la conduite des cultures en ce sens nécessite des incitations économiques et autres. Les avancées scientifiques en matière de connaissances du vivant et des écosystèmes et l'emploi accru d'information peuvent tout à fait être utilisés en vue d'une agriculture productive et respectueuse de l'environnement, basée sur une meilleure valorisation du potentiel du vivant et une réduction des intrants par unité de produit. Les avancées dans les connaissances et le progrès technique ne doivent pas être diabolisés systématiquement en eux-mêmes

comme ils le sont parfois. Par contre, il conviendrait d'être très vigilant sur leurs orientations et leurs utilisations ; or, celles-ci se font surtout selon les lois du marché, et non selon les besoins des plus démunis et le souci de préserver les ressources naturelles.

Dans les PVD, comment produire davantage sans dégrader le milieu ? Une première nécessité est d'encourager la production locale en évitant que des importations à bas prix la déstructurent. Le deuxième impératif est de produire en harmonie avec l'environnement, de dépasser le concept de système de production au profit de celui d'écosystème productif (Griffon et Weber, 1995). Même si beaucoup de recherches doivent être faites en la matière, des connaissances existent aujourd'hui pour produire en respectant davantage l'environnement ; mais elles ne sont pas toujours mises en œuvre par manque de capital, ou de formation, ou de diffusion insuffisante. Les projets de développement auraient plus de chance de réussite s'ils adoptaient davantage une démarche de bas en haut. Comme l'ont souligné divers auteurs (Conseil Mondial de l'Alimentation, 1993 ; FAO, 1996a) un développement durable nécessite d'allier les avancées scientifiques et techniques aux ressources et conditions locales, humaines et naturelles.

Cette démarche aboutit à préconiser une « nouvelle révolution verte » dont les trois objectifs de base sont la productivité, la durabilité et l'équité (CMA, 1993). Depuis 1994, le Groupe consultatif pour la recherche agronomique internationale et le CIRAD (Conway, 1994) recommandent ainsi une « révolution doublement verte » visant à la fois la productivité et la durabilité.

« La démarche proposée par la Révolution doublement verte tire profit de la complexité, de la diversité et de la variabilité écosystémique, économique et sociale. Elle repose sur la recherche d'un développement viable à long terme, qui tire le meilleur parti possible des écosystèmes, sous des conditions économiques et sociales variables, sans obérer leur capacité de reproduction. La démarche proposée vise donc également une limitation des effets d'irréversibilité. La Révolution doublement verte devra reposer sur :

– l'adaptation des modèles techniques à des situations locales diverses. Les savoirs locaux devront être pleinement pris en compte, au prix d'une évaluation scientifique permettant leur validation et leur étalonnage ;

– la prise en compte des habitudes alimentaires, comme levier pour la diversification des cultures. Le fait que plus de 50 % de l'alimentation mondiale repose sur trois plantes ne peut être viable à long terme, dans un contexte de probable changement climatique. La Révolution doublement verte s'oppose à l'homogénéisation croissante des comportements alimentaires et des styles de vie. Elle vise la diversification de l'offre et la multiplication des marchés locaux, la globalisation n'étant pas contradictoire avec leur diversité.

Enfin, la Révolution doublement verte pose la diversité culturelle et sociale comme une richesse, au même titre que la diversité biologique. Elle n'est pas compatible avec des logiques centralisatrices et uniformisantes » (Griffon et Weber, 1996).

On observe ainsi un changement de paradigme en matière de développement et de sécurité alimentaire (Maxwell, 1996). Les nouvelles technologies évoquées ci-dessus peuvent aller vers une agriculture davantage durable si elles sont orientées et utilisées dans ce sens, ce qui n'est pas nécessairement le cas. En particulier l'emploi de connaissances et d'information peut permettre d'adapter finement les apports d'intrants aux besoins et d'éviter les gaspillages ; de même une meilleure connaissance du fonctionnement du vivant et des écosystèmes rend possible de les respecter, de travailler davantage avec la nature au lieu de travailler contre elle, de faire une nouvelle alliance entre l'homme et la biosphère, entre l'humanité et la planète Terre (l'homme a plus besoin de la planète que celle-ci n'a besoin de lui !). Toutefois, cela suppose un niveau élevé de connaissance

pratique mais aussi de formation technique. Or, dans de nombreux pays du Tiers-Monde, une fraction importante des adultes est illettrée (tableau 6). Et dans les pays riches la recherche de la rentabilité immédiate est souvent prédominante ...

De leur côté également, les biotechnologies peuvent permettre une agriculture plus productive, en particulier si l'on parvient à mettre au point des végétaux résistants aux agents de maladies, aux insectes, à divers parasites ; si l'on parvient à mieux les adapter aux besoins alimentaires et à sélectionner des plantes tolérant mieux la sécheresse, les sols salés, etc. Mais, d'une part, le génie génétique doit être géré avec prudence car il peut avoir des effets environnementaux négatifs. Par ailleurs, les recherches en matière de transfert de gène sont actuellement effectuées en majeure partie par des firmes privées qui orientent souvent leurs produits vers les marchés solvables. Aussi, serait-il souhaitable que la recherche agronomique effectuée dans les PVD ou tournée vers ceux-ci ait les moyens de jouer également un rôle important...

Enfin la Révolution doublement verte suppose des transformations économiques et institutionnelles notables (Griffon, Weber, 1995) : comme l'ont montré la première et la deuxième révolution agricole en France, changement technique et changement social vont souvent de pair. Or, les évolutions institutionnelles et économiques en cours vont-elles dans le sens d'une plus grande équité et possibilité de développement de tous à l'échelle mondiale ?

Conclusion

Parmi les questions cruciales pour le XXI^e siècle sur le plan humain et environnemental, figure notamment celle de la possibilité de nourrir durablement près de dix milliards d'hommes sans détruire le milieu naturel, c'est-à-dire de façon vivable et viable. De fortes inquiétudes s'expriment en ce domaine. Dans ce contexte certains attendent beaucoup du progrès technique, de l'avancée des connaissances, mais dans le même temps d'autres s'interrogent sur le progrès, sur les orientations scientifiques et techniques (Salomon, 1993 ; Bouguerra, 1993) ; ainsi certains ont souligné les effets néfastes de l'industrialisation, de l'agriculture et de l'artificialisation trop poussée de la nature aussi bien dans les pays développés que dans le Tiers-Monde.

Tableau 6 – Pourcentage d'adultes analphabètes dans divers pays en 1995 (Banque mondiale 1996, d'après les données de l'UNESCO).

	Femmes	Hommes
Afrique subsaharienne	54	35
Burkina Faso	91	70
Niger	93	79
Asie	-	-
Chine	27	10
Inde	62	35
Népal	86	59
Bangladesh	74	51
Pakistan	76	50
Moyen-Orient et Afrique du Nord	50	28
Égypte	61	36
Amérique Latine et Caraïbes	14	12
Brésil	17	17

Dans ce texte nous avons fait porter l'analyse sur la nouvelle vague d'innovations qui commence à se diffuser, avec d'une part l'emploi accru de connaissances, de savoir et d'information et les nouvelles technologies en ce domaine, d'autre part une meilleure connaissance et le maniement du vivant. Ces techniques peuvent effectivement apporter une contribution importante pour une agriculture plus respectueuse de l'environnement, mais elles comportent aussi divers risques selon la façon dont elles sont orientées dans la phase de Recherche-Développement, puis utilisées ensuite.

Pourra-t-on au XXI^e siècle nourrir l'humanité sans épuiser certaines ressources ou dégrader certains milieux, ce qui en anéantirait rapidement la possibilité ? On redoute notamment des tensions dans les pays ayant une surface en terres arables par habitant limitée, ou une productivité agricole faible, ou des ressources en eau réduites comparées aux besoins, et où dans le même temps le niveau de développement est bas, ce qui ne permet pas de compenser la faible production agricole par des importations comme au Japon par exemple. Ces tensions risquent même de dégénérer en conflits, par exemple pour l'eau, quand les prélèvements par un pays amont réduisent les ressources dans le pays aval. Les pays pauvres, à faible production agricole, pourront-ils éviter de dégrader le milieu naturel pour survivre, entraînant érosion, déforestation, progression du désert, etc. ? Parviendront-ils à éviter l'enfoncement dans la misère ? Ce qui est le plus insoutenable dans le monde actuel est la paupérisation et l'exclusion d'une partie de l'humanité (qui peuvent conduire à des comportements

désespérés) alors que « techniquement » les possibilités existent pour y remédier. Mais les pays riches, de leur côté, dégradent aussi l'environnement de façon notable car le bas prix de divers facteurs employés (eau, énergie, engrais et souvent pesticides) n'incite pas toujours à les économiser, alors qu'une utilisation plus rationnelle, moins gaspilleuse est là aussi « techniquement » possible.

Pourtant nourrir l'humanité au XXI^e siècle sans détruire l'environnement paraît techniquement possible. Avec le savoir, la connaissance, on peut produire et consommer en utilisant moins de ressources naturelles et en respectant davantage l'environnement. Mais cela nécessiterait une intense mobilisation en ce sens, ainsi que plus généralement en matière de développement ; or, celle-ci semble actuellement insuffisante malgré de nombreuses initiatives. Par ailleurs, du fait du problème de son financement, la recherche est davantage orientée vers la demande des populations riches et des marchés solvables que vers ceux qui en auraient le plus besoin. Aussi, l'avenir paraît-il bien incertain bien qu'il dépende pour beaucoup de l'action des hommes. Pourtant il faut agir maintenant tant qu'il est encore temps. « *A commitment must be made now to improve world food security, otherwise we will pay many times over in the years to come for our complacency today* ». (Pinstrup-Andersen et Pandya-Lorch, 1994). Peut-on être optimiste en ce domaine et reprendre avec E. Morin et A.B. Kern (1993) la phrase d'Hölderlin : « *là où croît le péril, croît aussi ce qui sauve* » ? ■

Résumé

L'évolution technologique de l'agriculture occidentale durant les dernières décennies a conduit à des succès indéniables, mais a fait aussi l'objet de nombreuses critiques sur le plan de sa durabilité et de sa reproductibilité. Qu'en sera-t-il au XXI^e siècle ? On esquisse en premier lieu un bilan socio-économique et écologique de cette évolution à partir du cas français en essayant de faire le point entre aspects positifs et impacts négatifs. La deuxième partie aborde les répercussions possibles d'une importante vague d'innovations qui commence à se diffuser : la meilleure connaissance et le maniement du vivant avec notamment les biotechnologies et le génie génétique ; on tente d'indiquer leurs avantages potentiels et leurs risques possibles au niveau socio-économique et environnemental. Une autre évolution technologique en cours, également fort importante, est présentée dans la troisième partie : l'emploi accru d'information, de connaissances et des nouvelles technologies de l'information dans le secteur agricole ; on examine également leurs effets possibles sur le plan socio-économique et environnemental. La dernière partie s'interroge sur les capacités à nourrir la population mondiale en croissance. Il paraît indispensable d'accroître la production alimentaire mais sans détériorer l'environnement, ce qui nécessite une « révolution doublement verte ». Sous certaines conditions, les biotechnologies et l'emploi accru d'information pourraient aller dans ce sens, mais bien d'autres conditions sont requises, en particulier une intense mobilisation au niveau socio-économique et institutionnel.

Abstract

Technological development of western agriculture has known undeniable success over the last decades; however, its sustainability has been questioned. What will be the situation in the 21st century ? First, a socio-economic and ecological assessment of the recent development is sketched from the French situation taking into account both its favourable and negative sides. The second part deals with the possible impacts of a major wave of innovations which is beginning to come into use: a better knowledge and handling of the living matter, particularly with biotechnology and genetic engineering. Their potential advantages and possible risks are sketched out from a socio-economic and environmental point of view. Another technological ongoing development which is also quite significant, is presented in the third part: growing utilization of knowledge, of information and of the new information technologies in the agricultural sector. Their possible impacts are also examined from a socio-economic and environmental point of view. The last section questions the capacities to feed the human growing population. It seems essential to increase food production, but without damaging the environment: this requires a «double green revolution». Under certain conditions biotechnology and the use of knowledge could go in this way, but many other conditions are required, particularly an intensive mobilization at both a socio-economic and institutional level.

Bibliographie

- ANDERSON, J.-R., PARDEY, P.-G., ROSEBOOM, J., 1994. Sustaining growth in agriculture : a quantitative review of agricultural research investments, *Agricultural Economics*, (10) : 107-123.
- ALEXANDRATOS, B., (dir), 1995. *Agriculture mondiale*. Horizon 2010, étude de la FAO, Rome, FAO et Paris, Polytechnica, 442 p.
- BANQUE MONDIALE, 1996. *Rapport sur le développement dans le monde 1996*, Washington, World Bank, 275 p.
- BARBAULT, R., 1995. *Écologie générale : structure et fonctionnement de la biosphère*, Paris, Masson, 275 p.
- BONNY, S., 1993. Is agriculture using more and more energy ? A French case study, *Agricultural Systems*, (43)1 : 51-66

- BONNY, S., 1994a. Vers une agriculture plus respectueuse de l'environnement ? La dynamique de la production de techniques agricoles plus écologiques en France, *Cahiers Agricultures*, 3(6), nov-déc 1994 : 385-396.
- BONNY, S., 1994b. Les possibilités d'un modèle de développement durable en agriculture : le cas de la France, *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, (23), novembre 1994 : 5-15.
- BONNY, S., 1996. Les biotechnologies en agriculture : perspectives et enjeux. *Futuribles*, (211), juillet-août 1996 : 51-76.
- BONNY, S., 1997a. *Quels rendements demain ? Perspectives d'évolution des rendements des grandes cultures en France : le cas du blé* Grignon, INRA-ESR, 88 p.
- BONNY, S., 1997b. Quelles perspectives d'évolution possibles pour l'agriculture française face aux mutations en cours ? *Norôis*, 44 (173), janvier-mars 1997 : 121-140.
- BOUGUERRA, M.-L., 1993. *La recherche contre le Tiers Monde*, Paris, PUF, 296 p.
- de BRIE, C., 1995. Pour une agriculture écologique. Paysans sans frontières, *Le Monde Diplomatique*, juillet 1995 : 12.
- BYÉ, P., MOUNIER, A., 1994. Les futurs alimentaires et énergétiques des biotechnologies. Économies et Sociétés, *Cahiers de l'ISMEA*, hors-série n° 27, 363 p.
- CMA, 1993. Sustainable agriculture and a new green revolution. Texte du secrétariat du Conseil Mondial de l'Alimentation présenté au « Symposium international sur l'agriculture durable et le développement rural ». Pékin, 25-28 May 1993, 21 p.
- COHEN, J.-E. 1995. How many people can the earth support ? *The Sciences*, Nov.-Dec. 1995 : 18-23 - Population growth and Earth's human carrying capacity, *Science* (269), 21 July 1995 : 341-346.
- COLLOMB, Ph., 1996. Besoins alimentaires et croissance démographique, Rome, FAO, Sommet mondial de l'alimentation, *document d'information technique*, n° 4.
- COLLOMB, Ph., 1996. L'alimentation de la population mondiale en 2050, *Population et Sociétés* (312), avril 1996, 4 p.
- CONWAY, G., 1994. Une agriculture durable pour la sécurité alimentaire mondiale. *Rapport* du groupe consultatif pour la recherche agricole internationale (GCRAI), Paris, CIRAD, traduction française, 36 p.
- FAO, 1996a. Sécurité alimentaire et nutrition, Sommet mondial de l'alimentation, *document d'information technique*, Rome, FAO, n°5.
- FAO, 1996b. Les leçons de la révolution verte. Vers une nouvelle révolution verte. Rome, FAO, Sommet mondial de l'alimentation, *document d'information technique*, n°6.
- GRIFFON, M., WEBER, J., 1995. Les aspects économiques et institutionnels de la révolution doublement verte. Séminaire « vers une révolution doublement verte », Poitiers, 8-9 novembre 1995, Paris, CIRAD-URPA, 19 p.
- GRIFFON M., WEBER J., 1996. La « Révolution doublement verte » : économie et institutions. *Cahiers Agricultures* (5) : 239-242.
- GROS, F., 1989. *La civilisation du gène*, Paris, Hachette, 150 p.
- FREEMAN, C., PEREZ, C., 1988. Structural crises of adjustment, business cycles and investment behaviour, *In : Dosi et al, Technical change and economic theory*, Londres et New-York, Pinter Publishers, 646 p.
- JAMES C., KRATTIGER A.-F., 1996. Global review of the field testing and commercialization of transgenic plants, 1986 to 1995: the first decade of crop biotechnology, *ISAAA Briefs* n°1, ISAAA (International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications), New York, Ithaca, 31 p.

- KAHN, A., 1995. Les biotechnologies in : Loos F. *Les visions du futur*, Paris, M & M Conseil : 55-62.
- KENNEDY, P., 1994. *Préparer le XXI^e siècle*. Paris, éditions Odile Jacob, 508 p. (traduit de l'américain).
- KLATZMANN, J., 1991. *Nourrir l'humanité. Espoirs et inquiétudes*, Paris. INRA, Économica, 128 p.
- LEISINGER, K.-M., 1995. Socio-political Effects of New Biotechnologies in Developing Countries. Washington, IFPRI, Food, Agriculture and the Environment Discussion Paper 2, 14 p.
- LUYTEN, J.-C., 1995. *Sustainable World food production and environment*, Delft (NL), AB-DLO, 159 p. + ann.
- Mc MANUS, P., 1996. Contested terrains : politics, stories and discourses of sustainability, *Environmental Politics*, 5(1), Spring 1996 : 48-71.
- MAXWELL, S., 1996. Food security : a post-modern perspective. *Food Policy* (21) 2 : 155-170.
- MAZOYER, M., 1982. Origines et mécanismes de reproduction des inégalités régionales de développement agricole en Europe, *Économie Rurale* (150-151), juillet-septembre 1996 : 25-33.
- MELLON, M., 1996. Ripen-on-command : In a society with ample food, why bother ? *Nature Biotechnology*, vol 14, July 1996 : 800.
- MORIN, E., KERN, A.-B., 1993. *Terre-Patrie*, Paris, Seuil, 217 p.
- OCDE, 1989. *Biotechnologie. Effets économiques et autres répercussions*, Paris, OCDE, 128 p.
- PARDEY, P.-G., ALSTON, J., 1995. Rewamping agricultural R&D. *2020 Brief* (of IFPRI), n°24, juin 1995.
- PENNING DE VRIES, F.-W.-T., VAN KEULEN, H., RABBINGE, R., 1995. Natural resources and limits of food production. In : Bouma J. et al, (éd). *Eco-regional approaches for sustainable land use and food production*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers : 65-67.
- PINSTRUP-ANDERSEN, P., PANDYA-LORCH, R., 1995. Prospects for World food security and distribution in : BOUMA J. et al. (Ed). *Eco-regional approaches for sustainable land use and food production*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, : 89-111.
- SALOMON, J.-J., 1992. *Le destin technologique*, Paris, Balland, 327 p. (réédition Gallimard/Folio, 1993)
- SOLAGRAL, 1993. *Les biotechnologies et leurs enjeux internationaux*, Lyon, Solagral Formation, 137 p.
- WAGGONER, P.-E., 1994. How much land can ten billion people spare for nature ? Ames (Iowa), Council for Agricultural Science and Technology, *Task Report Force* (121), February 1994, 64 p.
- WORLDWATCH Institute, 1995. *L'état de la planète, 1995/1996* (et éditions antérieures), Paris, La Découverte (traduit de l'américain).