



THE LIMITS TO

growth



Donella H. Meadows

Dennis L. Meadows

Jørgen Randers

William W. Behrens III

THE LIMITS TO GROWTH



UNIVERSE

*A Report for THE CLUB OF ROME'S Project on the
Predicament of Mankind*



A POTOMAC ASSOCIATES BOOK

\$ 2.75

A POTOMAC ASSOCIATES BOOK

THE LIMITS TO growth

A REPORT FOR
THE CLUB OF ROME'S PROJECT ON
THE PREDICAMENT OF MANKIND

Donella H. Meadows

Dennis L. Meadows

Jørgen Randers

William W. Behrens III



Universe Books
NEW YORK

The MIT Project Team

Dr. Dennis L. Meadows, director, United States

DR. ALISON A. ANDERSON, United States (*pollution*)

DR. JAY M. ANDERSON, United States (*pollution*)

ILYAS BAYAR, Turkey (*agriculture*)

WILLIAM W. BEHRENS III, United States (*resources*)

FARHAD HAKIMZADEH, Iran (*population*)

DR. STEFFEN HARBORDT, Germany (*socio-political trends*)

JUDITH A. MACHEN, United States (*administration*)

DR. DONELLA H. MEADOWS, United States (*population*)

PETER MILLING, Germany (*capital*)

NIRMALA S. MURTHY, India (*population*)

ROGER F. NAILL, United States (*resources*)

JØRGEN RANDERS, Norway (*pollution*)

STEPHEN SHANTZIS, United States (*agriculture*)

JOHN A. SEEGER, United States (*administration*)

MARILYN WILLIAMS, United States (*documentation*)

DR. ERICH K. O. ZAHN, Germany (*agriculture*)

II

RAPPORT SUR LES LIMITES A LA CROISSANCE

par Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows,
Jørgen Randers et William W. Behrens III
du Massachusetts Institute of Technology

A AURÉLIO PECCEI, ce sont ses préoccupations pour l'humanité et son avenir, qui nous ont incités nous et bien d'autres, à entreprendre une réflexion à long terme sur notre monde.

Présentation par le Club de Rome

Le Club de Rome, groupe de personnalités de toutes cultures, inquiètes de l'avenir d'un monde où l'humanité doit affronter l'irrésistible montée de problèmes complexes et mystérieusement liés les uns aux autres, a demandé en août 1970, au Groupe d'Étude de Dynamique des Systèmes du Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) d'entreprendre l'étude des tendances d'un certain nombre des facteurs, qui dérèglent notre société planétaire, et de leurs interactions. Ce travail est une partie d'un ensemble de recherches plus vastes : « Dilemmes de l'Humanité » (*Predicament of Mankind*), que le Club de Rome compte poursuivre au cours des prochaines années. Il constitue une contribution à une meilleure compréhension des choix possibles pour l'avenir, choix que doivent faire les hommes et les nations, à présent, alors que nous arrivons à un tournant crucial de notre histoire. Le but de l'étude du M.I.T. soutenue, financièrement par la Fondation Volkswagen, est de définir clairement les limites matérielles qui s'opposent à la multiplication des hommes et les contraintes résultant de leurs activités sur notre planète : d'où le titre « Les limites à la croissance », rapport pour les travaux du Club de Rome sur les « Dilemmes de l'Humanité ».

Le rapport de ce groupe de scientifiques est dès maintenant utilisable et nous sommes heureux de le présenter au public et aux gouvernants. Ses conclusions prouvent que l'humanité ne peut pas continuer à proliférer et à aspirer essentiellement au développement matériel, sans rencontrer de sérieux obstacles sur cette route. Elles nous mettent en face d'une alternative : trouver de nouveaux objectifs et prendre notre destinée en main ou bien nous résigner et accepter les conséquences inévitables et dures d'une croissance sans frein. Le rapport est riche en informations qui peuvent aider ceux qui s'inquiètent de l'évolution actuelle et de ses causes profondes, et il offre à ceux qui ont

des opinions contraires ou des informations différentes la possibilité de réfuter nos données et d'exposer leurs propres arguments. Ce document doit être étudié avec une grande attention et appelle la discussion critique. Il est certain qu'avant d'obtenir une base solide qui puisse aider à une prise de décision nous devons encore approfondir, affiner nos recherches et vérifier, à nouveau, de nombreuses données. Cependant, même à cette étape des travaux, il est clair que nous devons changer radicalement notre optique du monde, notre conception de la vie et nos comportements.

Pour ouvrir le dialogue, nous donnons les raisons qui ont conduit le Club de Rome à entreprendre cette première approche.

La condition humaine

Depuis des millénaires, l'homme a lutté pour survivre, et, à travers le temps, la technologie, même sommaire, a été son principal auxiliaire. Le feu, la roue, la charrue, une métallurgie rudimentaire ont permis l'agriculture, la construction de villes, et l'apparition de l'artisanat. La révolution industrielle a été un point critique au cours de cette évolution et a amené une explosion d'activisme, de laideur et d'opulence qui nous ont conduits au monde que nous connaissons dans les pays dits développés. La science, en découvrant les secrets de la matière et les lois physiques, a sérieusement accéléré le processus, préparant la voie à toutes sortes d'industries mécaniques, chimiques et électriques dont les produits, aujourd'hui communs, constituent le support de la société matérialiste actuelle : société de consommation et de déchets qui règne sur une partie de notre terre. Alors que pendant le même temps la majorité des hommes vivant dans le Tiers Monde, quoique entraînés dans le tourbillon du changement, n'ont que les miettes de l'abondance.

Les progrès spectaculaires de la recherche scientifique accompagnèrent le « développement ». Les crédits importants alloués par les pays industrialisés alimentent un conservatoire du savoir riche et coûteux d'où, un nouveau développement technologique, plus extensif encore, sortira, entraînant pour les générations à venir des conséquences considérables, conséquences que nous pressentons avec anxiété. Nous ne pouvons pas ne pas reconnaître les étonnants succès de la science et de la technologie, nous leur sommes redevables d'une

prospérité sans précédent et d'une croissance économique rapide; grâce à ces progrès nous jouissons d'une nourriture plus riche, de vies plus longues et des millions de personnes lui doivent santé et loisirs. Pour nos arrière-grands-parents, cette opulence eût symbolisé l'âge d'or.

Mais la science et la technologie, avec tous leurs avantages, furent aussi les agents principaux de la complexité de la situation actuelle, elles ont permis l'extraordinaire poussée démographique, amené la pollution et autres nuisances et effets nocifs et annexes de l'industrialisation. Nous ne souhaitons nullement retourner quelques siècles en arrière où famine et maladies mettaient frein à l'expansion démographique et étaient sources de misère et de larmes, mais nous n'avons pas encore appris à maîtriser le présent. Et, faute d'une image de l'avenir que nous souhaiterions, nous ignorons dans quel sens canaliser ces forces considérables que sont la recherche scientifique et technologique — forces porteuses de progrès ou de destruction.

Au point où nous sommes parvenus, à peine sortis des vieilles luttes pour échapper à la pauvreté, la maladie et l'esclavage du travail, nous sentons le doute et la désillusion s'insinuer. Nous percevons que chaque pas en avant de notre société technologique rend l'homme plus faible en même temps que plus puissant, chaque nouvelle conquête sur la nature se révèle être également un pouvoir sur l'homme. La science et la technologie nous apportent, en même temps que la santé et la prospérité, la menace d'une apocalypse nucléaire; la population croît, son drainage par les villes suscite des formes de pauvreté dégradantes jusqu'alors inconnues, et nous enferme dans un urbanisme sordide, bruyant, avilissant; la motorisation a allégé le poids du travail physique mais lui a retiré toute signification; l'automobile accroît la liberté de mouvement mais aussi le fétichisme de la machine et empoisonne nos villes. L'effet boomerang de la technologie n'est que trop évident. Elle menace notre environnement naturel, et cette menace pourrait devenir irréversible. Les individus subissent des contraintes de plus en plus insupportables et rejettent l'autorité; la drogue, le crime et la délinquance augmentent; la foi disparaît, que ce soit celle de la religion soutien des hommes au cours des siècles, que ce soit la confiance en la démarche des partis politiques ou en l'efficacité des réformes sociales. Toutes ces difficultés semblent accompagner la prospérité.

Cependant, quoique l'on nous incite, encore, à produire et à

consommer, un sentiment d'angoisse commence à se répandre devant une vie qui se vide de toute qualité, et les bases mêmes du système sont mises en doute. Parallèlement, la situation dans les pays moins développés est encore plus inquiétante. Là, les contrastes sont bien plus criants entre les espoirs que fait miroiter une technologie auréolée de magie et la petite part que ces pays peuvent en attendre. Bref, dans le sillage du progrès scientifique et technologique, des brèches s'ouvrent, un écart intolérable, aussi bien psychologique que politique et économique oppose, dans le monde, les nantis et ceux qui ne le sont pas. Une aggravation de ces déséquilibres rendrait les crises explosives inévitables.

En ces temps de changement rapide, nous commençons ainsi à réaliser que l'homme est une créature qui pressent — quoique confusément — son origine, qui a quelque pouvoir sur son propre avenir mais qui est privée de tout sens de l'orientation. La technologie a augmenté et étendu grandement le pouvoir matériel de l'homme mais semble n'avoir en rien contribué à améliorer sa logique et sa sagesse. Nous ne pouvons tabler sur une mutation, l'évolution organique demande des millénaires pour mettre au point une nouvelle espèce! Pour échapper à ces contradictions, le temps est venu où les hommes doivent entreprendre un effort important pour imaginer et ouvrir une voie entièrement nouvelle à une évolution culturelle.

La problématique mondiale — Les symptômes et la maladie

Dans ce contexte, partout, les hommes sont confrontés à des théories de problèmes étrangement irréductibles et tout aussi insaisissables : détérioration de l'environnement, crise des institutions, bureaucratie, extension incontrôlable des villes, insécurité de l'emploi, aliénation de la jeunesse, refus de plus en plus fréquent des systèmes de valeurs reconnus dans nos sociétés, inflation et autres dérèglements monétaires et économiques, etc. Ces problèmes en apparence différents ont, en commun, trois caractéristiques. Premièrement : ils s'étendent à toute la planète et y apparaissent à partir d'un certain seuil de développement quels que soient les systèmes sociaux ou politiques dominants. Deuxièmement : ils sont complexes et varient en fonction d'éléments techniques, sociaux, économiques et politiques. Finalement,

ils agissent fortement les uns sur les autres et cela d'une manière que nous ne comprenons pas encore.

C'est cet entrelacs de problèmes que nous désignons sous le terme de « problématique ». Les interrelations y sont devenues si déterminantes, si critiques qu'il n'est plus possible d'isoler un seul des éléments essentiels de ce magma qu'est la problématique et de le traiter séparément. Tenter une intervention de ce genre ne peut qu'accroître les difficultés dans les autres secteurs de l'ensemble, et ce de manière souvent imprévisible. Pour les mêmes raisons pas une nation, même la plus puissante, ne peut espérer résoudre ses propres problèmes si tous ceux qui pèsent sur le système global restent sans solution. Nos méthodes habituelles d'analyse, d'approche, nos politiques et les structures de nos gouvernements sont impuissantes face à des situations aussi complexes. Nous ne savons même pas quelles seront les conséquences futures ou les conséquences indirectes des quelques solutions actuellement proposées. Ce sont les « *DILEMMES DE L'HUMANITÉ* » : *nous ne pouvons percevoir les symptômes du profond malaise de la société qu'un à un. Nous restons inaptes à comprendre leur signification et les interrelations de leurs myriades de composantes. Nous sommes impuissants à diagnostiquer leurs causes fondamentales. Et, donc, nous sommes incapables d'imaginer les réponses appropriées.*

C'est à la suite de ce constat et pour répondre à la nécessité de rechercher les issues possibles que le Club de Rome a lancé son projet. Notre souci est celui de l'avenir de l'humanité : elle a beaucoup appris, beaucoup réalisé, mais sans faire preuve d'un brin de sagesse, sans montrer le moindre sens de l'orientation. Nous ne pouvons plus esquiver la réalité d'une situation faite de la convergence et de l'accumulation des effets, pendant une brève et unique période de notre histoire, de la croissance intense et désordonnée de la population, des réalisations de la science et de la technique, des performances de l'économie.

Nous sommes convaincus que notre organisation socio-politique présente, les plans à court terme, l'approche parcellaire, et, par-dessus tout, nos systèmes de valeurs actuels sont inaptes à nous aider à résoudre la problématique moderne, chaque jour plus complexe, chaque jour plus globale, et même simplement à nous aider à appréhender sa vraie nature. Pour redresser la situation mondiale, nous avons à réaliser de très profonds changements, avant qu'il ne soit trop tard. Toutefois, nous ne pouvons pas tenter d'infléchir l'évolution actuelle

avant d'avoir compris comment les nouvelles réalités, auxquelles nous nous affrontons, diffèrent de celles auxquelles l'humanité a eu à faire face au cours des siècles et qui ont conditionné son évolution biologique et psycho-sociale; comment ces réalités se sont transformées par suite des manipulations des hommes; comment — et c'est primordial — se comportent les nouvelles réalités, ces hybrides minéraux mi-artificiels, qui maintenant régissent la vie sur la planète.

L'étude de l'équipe du Massachusetts Institute of Technology

La première étape de toute démarche scientifique consiste à pleinement identifier, cerner et définir son sujet. Notre premier objectif fut donc d'examiner la problématique mondiale, sa nature, ses dimensions et sa dynamique. Dans ce but nous avons d'abord cherché la méthode adéquate. Quelle méthode analytique pourrait permettre d'intégrer les quelques variables qu'il fallait étudier pour obtenir une évaluation générale de la situation actuelle du monde? Après plusieurs mois de recherches et de discussions, nous avons choisi une technique spécifique, mise au point par le professeur Jay W. Forrester au M.I.T., c'est la dynamique des systèmes. Cette méthode, élaborée à l'origine pour l'étude des problèmes industriels, a déjà été utilisée pour analyser bien d'autres processus complexes, y compris le déclin des villes, les phénomènes biologiques, et les problèmes sociaux.

Pour répondre à nos besoins, le professeur J. Forrester appliqua sa méthode pour construire un modèle global préliminaire, y introduisant quelques relations parmi les plus importantes qui sous-tendent le complexe de problèmes critiques identifiés par le Club de Rome. Cette technique nous a paru pleine de promesses : nous espérons arriver à simuler les interactions de quelques-unes des principales variables inhérentes au système qu'est la problématique mondiale.

La dynamique des systèmes permet une représentation graphique ou numérique de toutes ces relations planétaires, en termes facilement compréhensibles. Il n'est pas indispensable d'être expert en mathématiques pour assimiler, utiliser les résultats de cette étude ou y participer. Ainsi les démographes, les économistes, les responsables politiques et autres peuvent, chacun dans son domaine propre, retrouver les résultats déjà prêts et s'en servir.

L'objectif principal du travail fait au M.I.T. était la reconnaissance dans un contexte mondial des interdépendances et interactions de cinq facteurs critiques : explosion démographique, production alimentaire, industrialisation, épuisement des ressources naturelles et pollution. Cela demandait la sélection d'un réseau d'hypothèses concernant les relations entre chacun des éléments, appuyée sur la connaissance déjà existante du monde réel. Les structures de chacun des éléments constitutifs des modèles et les données de base ont été vérifiées par de nombreux experts. Cela ne peut éliminer un relatif degré de subjectivité qui ne peut être, en aucune façon, supérieur à celui que l'on trouve dans les modèles mentaux sur lesquels se basent, habituellement, les décisions humaines.

Un rapport technique complet est d'ailleurs disponible qui donne les références détaillées et des précisions sur les données utilisées, précise les hypothèses adoptées, les descriptions des techniques employées et fournit des informations complètes sur les organigrammes informatiques utilisés. Pour certains axes d'intérêt on a dû construire des sous-systèmes, ils sont décrits dans des rapports particuliers.

En présentant ce rapport général, synthèse des travaux réalisés, de leurs développements, des éléments — marquants qu'ils ont mis en évidence, des conclusions préliminaires et les observations qu'elles ont suggérées à ceux qui ont entrepris ce singulier effort — nous désirons exprimer publiquement notre satisfaction profonde à Dennis Meadows et à toute son équipe pour la contribution qu'ils apportent à la compréhension de situations nouvelles et délicates que nous affrontons collectivement dans notre monde changeant.

A la fin de cet ouvrage nous dirons dans quelle mesure ce que nous attendions, quand nous avons demandé au M.I.T. d'entreprendre cette étude, a été obtenu et nous préciserons la place qui doit être donnée aux conclusions du rapport dans le cadre de notre projet général sur les « DILEMMES DE L'HUMANITÉ »

Alexander King

Saburo Okita

Aurélio Peccei

Édouard Pestel

Hugo Thiemann

Caroll Wilson

Introduction

« Je ne voudrais pas dramatiser, mais la seule conclusion que je puisse tirer des informations en ma possession c'est qu'il reste à peine dix ans aux nations membres de l'O.N.U. pour oublier leurs anciennes querelles et s'associer pour mettre un terme à la course aux armements; pour sauver l'environnement, pour freiner l'expansion démographique, et pour donner l'impulsion nécessaire au développement des contrées les moins privilégiées.

« Si l'on ne parvient pas à un tel accord au cours de la prochaine décennie j'ai bien peur que les problèmes que j'ai soulevés aient pris une ampleur telle qu'il sera devenu totalement impossible de les surmonter. »

U THANT, 1969

Les problèmes dont parle U Thant — course aux armements, dégradation de l'environnement, explosion démographique et stagnation économique — sont souvent considérés comme les problèmes fondamentaux à long terme de l'humanité actuelle.

Nombreux sont ceux qui pensent que le devenir des sociétés humaines dépend de la rapidité et de l'efficacité avec lesquelles une réponse sera donnée à ces problèmes. Mais seule une faible partie de la population mondiale se préoccupe actuellement de les comprendre et de leur chercher une solution.

L'étendue des perspectives humaines

Tout individu est soumis à une série de pressions et de problèmes qui l'obligent à réfléchir et l'incitent à réagir. Les questions qu'il se pose, se situent à différents niveaux. Cela peut être la recherche de la pitance du lendemain pour sa famille et pour lui-même. Il peut s'inquiéter de son image de marque ou de la puissance de sa patrie, ou se préoccuper d'une éventuelle guerre mondiale ou d'un conflit possible avec un clan ou une tribu rivale.

Les perspectives de chaque homme sont liées à sa culture, à son expérience, et à l'imminence des problèmes auxquels il se trouvera confronté (voir fig. 1.). La plupart des gens ont résolu avec succès leurs problèmes dans un contexte spatio-temporel restreint avant de se sentir concernés par des problèmes moins immédiats dans un contexte plus large. En général plus les problèmes sont à longue échéance et leur impact étendu, plus est restreint le nombre des individus réellement soucieux de leur trouver une solution.

Bien des personnes consacrant toute leur énergie à résoudre un problème local et immédiat voient leurs efforts annihilés par des événements survenant dans un contexte plus large. Un fermier peut voir les champs qu'il entretient avec un soin jaloux détruits lors d'un conflit international. Les plans des responsables locaux peuvent être contrariés par une politique nationale. L'économie d'un pays peut être étouffée par le manque de débouchés sur le marché mondial... Il devient de plus en plus évident, aujourd'hui, que la plupart des projets des hommes et des plans des nations sont susceptibles d'être finalement réduits à néant par des échéances à long terme telles celles décrites par U Thant.

Les incidences de ces tendances globales sont-elles si lourdes de menaces que la nécessité d'y faire face soit plus urgente que la résolution de problèmes locaux à court terme?

Est-il vrai, comme l'a déclaré U Thant, qu'il ne nous reste que dix ans pour agir?

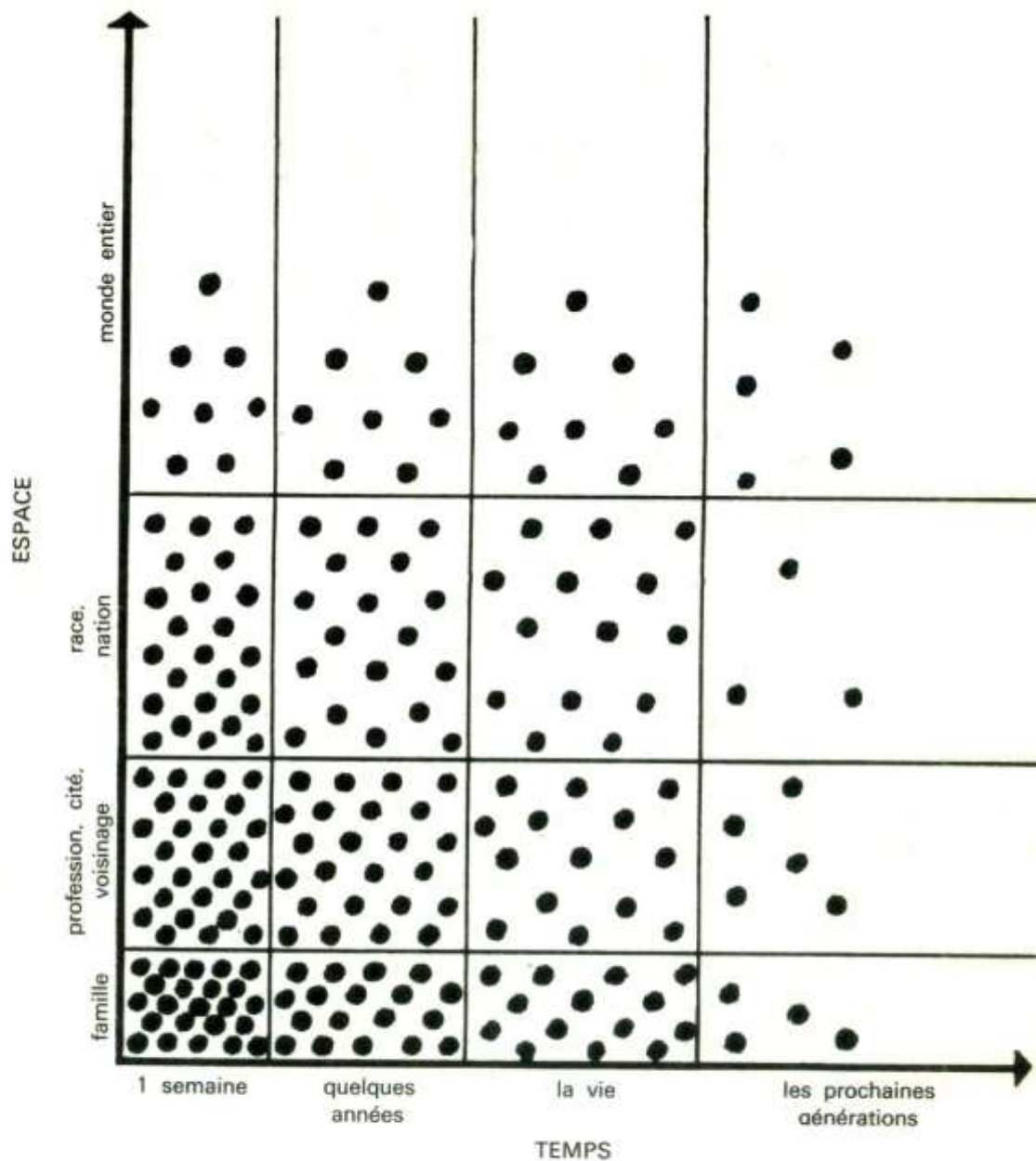
Qu'arrivera-t-il si nous ne trouvons pas de solution?

Quelles méthodes choisir? Quels résultats peut-on en attendre?

Quel sera le prix?

Cesont là les points étudiés dans le cadre de la phase préliminaire du Projet du Club de Rome sur *Les Dilemmes de l'Humanité*. Nos préoccupations se placent donc dans le coin supérieur droit du graphique spatio-temporel.

Figure 1. — Perspectives humaines



Les hommes sont intéressés par des événements situés plus ou moins loin dans l'espace ou dans le temps. Quelques-uns seulement ont une perspective globale à long terme.

Problèmes et modèles

Face à une difficulté à résoudre, tout individu, où qu'il se situe sur notre graphique, est amené à utiliser un modèle. Un modèle est un ensemble ordonné d'hypothèses à propos d'un système complexe. C'est une tentative pour comprendre un aspect donné d'un ensemble

de phénomènes diversifiés. Cette tentative procède d'un choix d'observations et d'enseignements et a pour but d'établir un ensemble d'idées générales applicables au sujet à traiter.

Pour choisir la nature de ses cultures, un fermier construit un modèle mental dans lequel il introduit ses terres (leur nature, leur surface), ses disponibilités financières, les conditions météorologiques moyennes qu'il connaît par expérience et la tendance du marché. Un économiste se sert de modèles mathématiques pour comprendre et prévoir la conjoncture du commerce mondial.

Les gouvernants et, en général, tous ceux qui ont un pouvoir de décision, se servent, inconsciemment, de modèles mentaux pour effectuer un choix entre les diverses politiques qui façonneront le monde. Ces modèles mentaux sont forcément simplistes par rapport à la réalité dont ils sont abstraits. Un cerveau humain, aussi remarquable qu'il soit, ne peut garder trace que d'un nombre restreint des interactions complexes et simultanées qui déterminent la nature même du monde réel.

Nous avons eu, nous aussi, recours à un modèle. Le nôtre tente de donner une représentation, la plus fidèle possible, de l'écosystème mondial¹. Son but : tenter d'améliorer notre représentation mentale des problèmes planétaires à long terme en combinant et accumulant la masse d'informations stockées dans les mémoires humaines et dans les statistiques, en nous servant des moyens les plus récents de traitement de l'information : méthodes scientifiques de traitement, analyse des systèmes et ordinateurs les plus modernes.

Notre modèle global a été construit essentiellement pour traiter cinq des tendances fondamentales qui sont d'intérêt universel — l'industrialisation accélérée, la croissance rapide de la population, la très large étendue de la malnutrition, l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables, et la dégradation de l'environnement. Entre ces tendances est tissé un réseau très dense et très divers de relations : l'évolution de ces tendances est une affaire de décennies, voire de siècles, et non de mois ou d'années. Grâce à notre modèle nous pouvons chercher à en saisir les causes profondes, les imbrications, et leurs conséquences à un siècle de distance.

1. Le premier modèle qui a servi de base à notre étude est celui du Pr Jay Forrester du Massachusetts Institute of Technology. Ce modèle a été décrit dans « *World Dynamics* » (Cambridge, Mass. : Wright Allen Press, 1971).

Tout comme n'importe quel modèle, il est imparfait, schématique, et incomplet. Nous connaissons parfaitement ses lacunes, mais nous pensons qu'à l'heure actuelle, c'est encore le plus efficace dont nous puissions disposer pour traiter de problèmes se situant hors des limites du graphique spatio-temporel de la figure 1. A notre connaissance c'est le seul modèle existant, qui présente un caractère d'universalité, dont l'horizon, raisonnablement quantifié, s'étende bien au-delà de trente ans et qui incorpore des variables importantes telles la pollution, la population et la production de denrées alimentaires, non pas en tant que variables indépendantes mais sous la forme d'éléments en interaction correctement représentatifs du comportement du monde réel.

Du fait de sa forme, de sa nature mathématique, il présente deux avantages considérables par rapport aux modèles mentaux. Premièrement : toute hypothèse que nous formulons est présentée sous forme écrite, accessible à tous et de ce fait sujette à contrôle et à critique. Deuxièmement : lorsque toutes les hypothèses ont été minutieusement examinées, critiquées, révisées, et rendues compatibles avec les données de notre expérience, leur incidence sur le comportement futur de l'écosystème mondial peut être déterminée, sans risque d'erreur, à l'aide des ordinateurs, quelle que soit la complexité de ce corps d'hypothèses.

Si nous estimons que sa structure même lui confère des avantages évidents par rapport à tous les modèles mentaux ou mathématiques, de notre écosystème, existants à ce jour, nous n'en sommes pas pour autant entièrement satisfaits. Il est perfectible et nous entendons le modifier, l'étendre et l'affiner au fur et à mesure que nos connaissances et les données dont nous disposerons deviendront plus claires et plus précises.

En dépit des imperfections inhérentes au caractère de prototype de ce modèle, nous estimons devoir le faire connaître dès maintenant et publier les résultats qu'il nous a permis d'obtenir. Chaque jour, dans le monde entier, des décisions sont prises, qui vont peser pendant des dizaines d'années sur l'environnement, l'économie et la situation sociale de toutes les régions du globe : il est impensable de les retarder jusqu'à ce qu'un modèle irréprochable soit mis au point ou jusqu'à ce que soit acquise une parfaite connaissance de tous les mécanismes de notre écosystème. De toute façon, les décisions seraient prises avec l'aide de quelque autre type de modèle mental ou mathématique.

Nous pensons que le nôtre est déjà suffisamment développé pour aider les gouvernants à prendre leurs décisions en connaissance de cause : le comportement du monde que, dans ses structures profondes, simule le modèle, ne nous semble pas devoir être remis en question quelles que soient les améliorations qui seront ultérieurement apportées aux données d'entrée.

Ce rapport n'a pas pour objet de décrire point par point, dans son intégralité scientifique, les données et les fonctions contenues dans le modèle. Cette description fera l'objet d'un rapport technique qui sera publié dans quelques mois. Dans un premier temps nous avons jugé préférable de résumer les caractéristiques essentielles du modèle et nos conclusions, en évitant de donner à notre exposé un caractère trop technique. Nous avons tenu à mettre l'accent, non pas sur les équations ou sur le réseau de relations qui en constituent la trame, mais plutôt sur les aspects essentiels de l'écosystème mondial qu'il met en évidence. L'ordinateur a été pour nous un outil : il nous a permis de mieux comprendre les causes et conséquences de processus d'évolution accélérée. Il n'est cependant pas nécessaire d'être un spécialiste de l'informatique pour appréhender nos conclusions et les discuter. Cette évolution accélérée aboutit à des résultats que leur nature même place hors des limites d'un document purement scientifique. Ces résultats doivent être étudiés, discutés en dehors d'un cénacle de spécialistes. Ce que nous cherchons ici, c'est à ouvrir largement le débat.

Nous avons tiré de nos travaux des conclusions qui peuvent mener loin, mais nous ne sommes ni les seuls ni les premiers, à les avoir pressenties. Au cours des dernières décennies, les conclusions que nous résumons ci-après ont déjà été perçues par des chercheurs qui considéraient le monde dans une perspective globale et à long terme. Néanmoins la grande majorité des hommes politiques semble vouloir s'obstiner à prendre des décisions allant à l'encontre des évidences.

Nous donnons quelques conclusions dans ce premier rapport, elles remettent tant d'idées reçues en cause et suscitent tellement de questions que nous nous sentons actuellement dépassés par l'ampleur de la tâche. Nous espérons que cet ouvrage connaîtra un certain retentissement, partout dans le monde, et qu'il incitera beaucoup de nos lecteurs à élargir leur horizon et à contribuer avec nous à la préparation de l'indispensable transition qui amènera le monde de l'état d'expansion continue sans issue qui est le sien actuellement, à un état d'équilibre souhaitable pour tous.

1.

Le caractère exponentiel de la croissance

On pense généralement, de nos jours, qu'il faut au moins cinq garçons dans chaque famille. Si chaque fils a, à son tour, cinq garçons, on se trouve déjà avec 25 descendants directs avant la mort du grand-père. Il y a donc davantage de monde et moins de richesses. Chacun peine durement et reçoit peu.

*Han Fei-tsou (Dynastie Tchou,
500 av. J.-C.)*

Dès que l'on aborde les problèmes relatifs aux activités humaines, on se trouve en présence de phénomènes de nature exponentielle. Les cinq paramètres fondamentaux de l'étude ci-après : population, production alimentaire, industrialisation, pollution et utilisation des ressources naturelles non renouvelables, évoluent selon une progression géométrique.

La quasi-totalité des activités humaines, qu'il s'agisse du développement des centres urbains, ou de la consommation d'engrais, obéissent également à cette même loi.

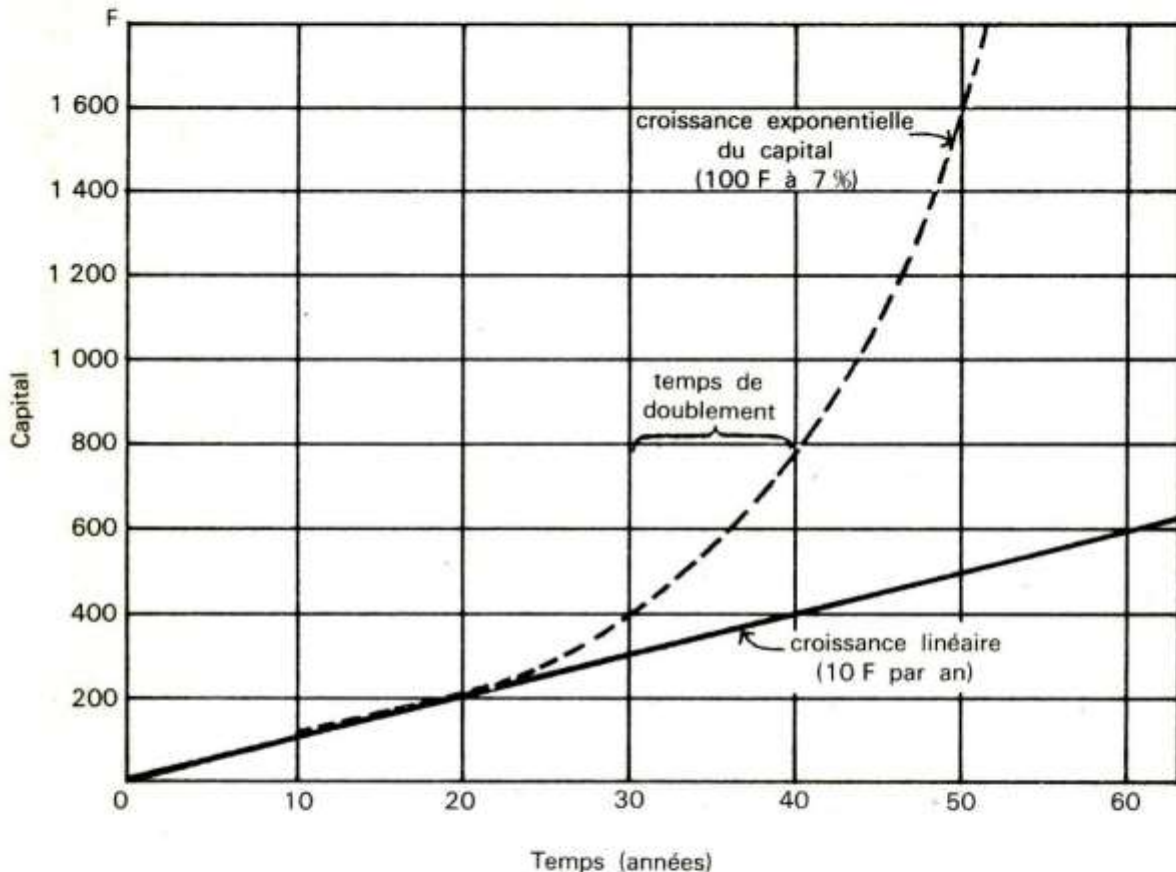
Cette étude traitant essentiellement des causes et conséquences de ces lois de croissance, définissons tout d'abord la fonction exponentielle.

Dynamique de la croissance exponentielle

La plupart des gens pensent en termes de progression arithmétique, ou si l'on préfère en termes de fonctions *linéaires* : un enfant dont la taille augmente de deux centimètres par an grandit « linéairement » ; un mendiant qui cache chaque année 1 000 F sous sa paillassse voit

ses économies croître linéairement. En revanche, une quantité croît « exponentiellement » si elle augmente d'un pourcentage constant au cours d'un intervalle de temps donné. L'exemple classique est celui d'un placement d'argent à intérêts composés (fig. 2).

Figure 2. — La capitalisation à intérêts composés : une fonction exponentielle



Dix francs accumulés chaque année dans une tirelire aboutissent à un capital de 500 F en 50 ans. Si, au bout de 10 ans, les 100 F économisés sont placés à 7 %, le capital obtenu au bout de 50 ans atteint 1 600 F. Il croît exponentiellement : $1\,600 = 100 (1,07^{40} - 1)$.

Si notre mendiant, au lieu de cacher son magot, trouve pour ses 1 000 F un emprunteur au taux de 10 %, au bout d'un an son capital sera de 1 100 F. Ces 1 100 F rapporteront 110 F l'année suivante et au bout de deux ans, il aura 1 210 F.

Compliquons le problème : il économise encore 1 000 F au cours de la seconde année et recommence l'opération : en un an, il aura augmenté son capital de 100 F, ce qui fait qu'au bout de 2 ans, il se trouvera disposer de 2 130 F au lieu de 2 000 F.

Au lieu d'un doublement en deux ans, ce qui aurait été le cas suivant une loi linéaire, l'opération « exponentielle » a permis de multiplier par 2,165 le capital initial.

L'application des lois exponentielles peut donner des résultats surprenants : il faut environ 7 ans pour doubler un capital placé à 10 % et un peu plus de 25 ans pour le multiplier par 10.

Une population qui croît de 2 % par an double en 35 ans. Si le taux est de 3 %, le doublement demande moins de 24 ans, et seulement 17 ans et demi si le taux est porté à 4 %.

Le temps de doublement s'obtient en première approximation en divisant 70 par le taux de croissance. Quelques chiffres sont donnés ci-après :

Taux de croissance annuel %	Temps de doublement (années)
0,05	1 400
0,1	700
0,5	140
1	70
2	35
4	18 (par excès)
5	14
7	10
10	7

En fait, ces propriétés surprenantes de la fonction exponentielle ont fasciné depuis des siècles. Selon une vieille légende perse, un astucieux marchand de grains offrit à son roi un magnifique échiquier. En échange de ce présent, il ne demandait que la chose suivante : un grain de riz sur la première case, deux sur la seconde, 4 sur la troisième et ainsi de suite. Le roi accepta sur-le-champ et donna des ordres pour qu'on lui apportât du riz de ses réserves : à la quinzième case il fallut décompter 16 384 grains, puis plus d'un million sur la 21^e; à la 40^e il en aurait déjà fallu plus d'un milliard et en fait tous les stocks de riz du roi furent épuisés bien avant que l'échiquier eût été payé.

La croissance exponentielle est donc stupéfiante car elle aboutit très rapidement à des valeurs absolues considérables.

Une récréation mathématique pour enfants, d'origine française, illustre un autre aspect de la croissance exponentielle : la soudaineté

apparente avec laquelle on atteint une limite donnée, c'est ce que les mathématiciens appellent la croissance exponentielle dans un domaine fini.

Considérez en effet un étang sur lequel croîtrait un nénuphar; sachant que le nénuphar double sa surface tous les jours, si cette croissance n'est pas contrôlée on suppose qu'il faudrait 30 jours pour couvrir intégralement l'étang, étouffant alors toute forme de vie aquatique. Pendant longtemps le nénuphar semble petit et l'on peut décider de ne pas s'en soucier jusqu'à ce qu'il couvre la moitié de l'étang. Question : quel jour faudra-t-il alors agir? La réponse est bien sûr le 29^e, et l'on n'a plus qu'un seul jour pour sauver l'étang ¹.

Ces exemples montrent qu'il est très utile de penser croissance exponentielle en termes de *temps de doublement*, c'est-à-dire temps nécessaire pour que double en volume la quantité considérée.

Dans le cas du nénuphar, le temps de doublement est d'un jour; dans le cas d'argent placé à 7 %, c'est dix ans : il y a donc une relation mathématique simple entre les taux de croissance et ce temps de doublement.

Modèles et croissance exponentielle

La croissance exponentielle est un phénomène dynamique : elle met en jeu des éléments qui changent en fonction du temps.

Dans le cas de systèmes très simples comme le placement d'argent ou le nénuphar, la cause de la croissance exponentielle et son développement ultérieur sont relativement faciles à comprendre. Mais quand plusieurs quantités différentes en nature croissent simultanément au sein d'un même système, quand, en outre, ces quantités ont entre elles des relations complexes, l'analyse des causes de la croissance et du comportement ultérieur du système deviennent très difficiles.

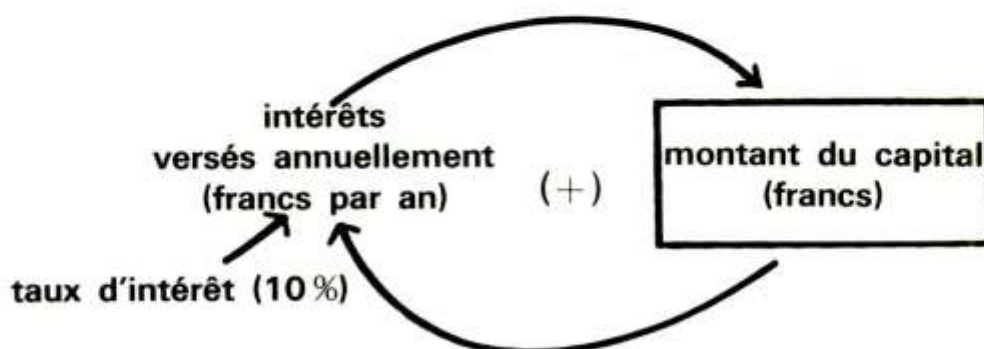
On peut, par exemple, se demander si c'est la croissance démographique qui provoque l'industrialisation ou le contraire; si un seul de ces phénomènes est cause d'une pollution croissante ou s'ils le sont tous deux; si un accroissement de production alimentaire entraînerait une croissance démographique; si, quand la croissance d'un quelconque de ces éléments est ralentie ou accélérée, elle aura des effets sur les autres taux de croissance et lesquels.

1. Nous sommes redevables à M. Robert Lattès de cette récréation mathématique.

Ces questions sont celles-là même qui sont agitées dans le monde entier, mais en fait les réponses seraient beaucoup plus claires si l'on avait une meilleure compréhension du système complexe global qui sous-tend tous ces problèmes.

Au cours des trente dernières années, est née et s'est développée au Massachusetts Institute of Technology une nouvelle méthode pour la compréhension du comportement des systèmes complexes : la *Dynamique des Systèmes*. Cette méthode repose sur le fait que la structure de tout système — c'est-à-dire les relations entre éléments, nombreuses, formant des boucles avec couplage et, pour certaines, à effets décalés dans le temps — a une importance aussi grande dans l'évolution du système que la nature de chacun des éléments individuels qui le composent. Le modèle global décrit ci-après est un modèle entrant dans le cadre de la dynamique des systèmes. La théorie des modèles dynamiques met en évidence l'existence d'une *boucle positive* (ou boucle d'amplification) chaque fois que l'on rencontre une quantité variant exponentiellement. Cette boucle positive est en quelque sorte un *cercle vicieux*. Un exemple bien connu est celui de la boucle prix-salaires : les salaires augmentent, donc les prix augmentent; l'augmentation des prix provoque des demandes de réajustement de salaires, et ainsi de suite. Dans une boucle positive toute séquence de relations de cause à effet aboutit fatalement à son point de départ : tout accroissement donné à l'un des éléments quelconque de la boucle amorcera une suite logique de modifications dont le résultat final se traduira par une augmentation encore plus grande de l'élément de départ.

On peut schématiser comme suit la boucle positive qui régit la croissance exponentielle d'un capital donné, placé à intérêts composés :



Supposons que l'on place à 10 % l'an un capital de 100 F¹. La première année l'intérêt perçu équivaut à 10 % de 100 F, soit 10 F. Au début de la seconde année, le capital portant intérêt se monte donc à 110 F qui rapporteront 11 F d'intérêts, portant ainsi, au bout de deux ans, le capital à 121 F. La troisième année les intérêts se monteront à 12,10 F et ainsi de suite. Plus le capital croît, plus forts sont les intérêts perçus et plus rapide est la croissance du capital initial : il s'agit d'une croissance exponentielle. Le taux d'intérêt, constant et égal à 10 %, détermine le « gain » de la boucle, en l'occurrence c'est le taux de croissance du capital.

Pour aborder notre analyse de l'évolution à long terme de l'écosystème mondial, il convient de considérer en premier lieu les boucles positives qui sous-tendent la croissance exponentielle des cinq grandeurs de base que nous avons déjà mentionnées. L'objectif de la plupart des politiques courantes en matière de développement étant d'augmenter le taux de croissance de l'industrie par rapport à celui de la population, il apparaît primordial d'étudier principalement l'évolution de ces deux grandeurs.

Les deux boucles qui sous-tendent l'accroissement de la population et l'expansion industrielle sont simples en principe. Leur structure sera décrite dans les pages suivantes. Les nombreuses interconnexions entre ces deux boucles positives tendent à amplifier ou à réduire le « gain » de chaque boucle, couplant ou découplant les taux de croissance de la population et de l'industrialisation. L'ensemble de ces interconnexions constitue le reste de la structure du modèle global et leur description occupera la majeure partie de ce rapport.

Croissance de la population mondiale

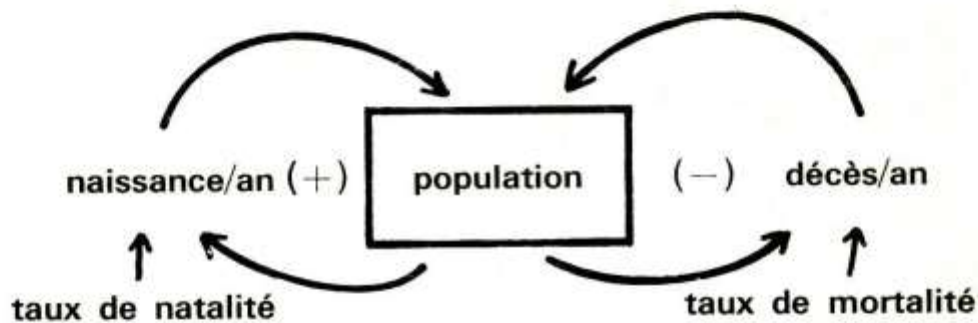
La croissance de la population humaine obéit à une loi exponentielle. En 1650, la population s'élevait à quelque cinq cent millions d'habitants et augmentait à raison d'environ 0,3 % par an [1]², ce qui correspondait à un temps de doublement de deux cent cinquante ans.

1. Valeur arbitraire, choisie uniquement pour faciliter le calcul.

2. Les chiffres entre [] renvoient à la bibliographie en fin d'ouvrage.

En 1970, la population du globe atteint trois milliards six cent millions, et le taux de croissance de 2,1 % par an [2]. A ce rythme, le temps de doublement n'est plus que de 32 ans.

La structure du système qui traduit la dynamique de croissance de la population est schématisée ci-dessous :



C'est un système à deux boucles.

Celle de gauche est *positive* : elle représente ce que l'on peut déduire de la courbe de croissance exponentielle observée : étant donné une population à taux de natalité constant, plus cette population est élevée, plus le nombre de naissances annuelles sera élevé. Plus il y aura de naissances, plus nombreuse sera la population l'année suivante. Et quand ces nouveau-nés seront des adultes aptes à procréer, il se produira une nouvelle génération qui grossira les rangs de la population et ceci aussi longtemps que le taux de natalité se maintiendra à une valeur sensiblement constante.

Ce taux de natalité n'est pas forcément constant et au chapitre 3 nous étudierons les variables dont il dépend.

Dans un système dynamique, il existe aussi des *boucles négatives*. Ces boucles ont un rôle régulateur. Elles visent à maintenir à un niveau constant une fonction qui tend à croître ou à décroître, elles agissent donc en *sens inverse* de la variation de la fonction. Prenons par exemple un thermostat destiné à régler la température d'une pièce. Si la température baisse, le thermostat actionne le système de chauffage jusqu'à rétablissement de la température affichée. Cette température une fois atteinte, le thermostat coupe le chauffage et la température recommence à baisser. On peut aussi imaginer un thermostat réglant un dispositif de refroidissement : lorsque la température ambiante est trop élevée, le thermostat actionne le dispositif et l'arrête lorsque le niveau

optimal de température est atteint. Dans les deux cas il y a bien action en sens contraire à la variation naturelle.

Sur le schéma représentant l'évolution d'une population (voir ci-dessus) la boucle de droite est *négative*. C'est une fonction du taux moyen de mortalité lequel reflète l'état global de santé d'une population.

La mortalité tend à réduire l'accroissement de population. A taux de mortalité constant, un accroissement de la population tend à accroître la mortalité annuelle en valeur absolue. Un nombre accru de décès diminue la population ce qui — toujours à taux de mortalité constant — provoquera, l'année suivante, un nombre de décès inférieur à celui de l'année précédente. Toutefois des correctifs devront être apportés à cette loi de décroissance, compte tenu de l'âge moyen de la population et (ou) des tranches d'âges auxquelles s'appliquent des taux de mortalité spécifiques. L'incidence à long terme du taux de mortalité sera plus ou moins importante selon qu'il s'applique ou non à des couches d'âge ayant ou non un potentiel de procréation. Toujours et partout les populations ont connu des variations régies par la naissance et la mort, mais également par des taux diversifiés de natalité et de mortalité. Au plan dynamique, l'évolution de ces populations, compte tenu de la conjonction de ces actions positives et négatives est un phénomène complexe.

Avant la révolution industrielle, taux de natalité et de mortalité étaient, toutes proportions gardées, élevés et irrégulièrement répartis. Le taux de natalité dépassait généralement, mais de peu, le taux de mortalité. Une croissance, dans son ensemble exponentielle mais lente et inégale, en résultait.

En 1650, la durée moyenne de vie dans le monde était de 30 ans et le taux d'accroissement global se situait aux alentours de 0,3 % comme on l'a vu précédemment. Depuis, les progrès de la médecine moderne, les développements des services publics de santé, les progrès de l'agriculture et de la distribution des aliments ont conduit à une baisse générale et notable de la mortalité.

A l'heure actuelle, l'espérance moyenne de vie, à l'échelle planétaire, est de 53 ans [3] et ne cesse de croître. En termes de moyennes mondiales, l'allure de la boucle positive (natalité) ne paraît pas devoir subir de modifications sensibles. En revanche, les effets cumulatifs dus à la boucle négative (mortalité) vont être considérablement réduits. Il en résulte un bilan nettement positif qui explique la croissance exponentielle rapide de la population globale.

Le tableau ci-dessous résume l'évolution de la population mondiale entre 1650 et 1950 et l'évolution prévue entre 1960 et 2000 :

Années	1650	1750	1850	1950	1975	2000
Population (milliards d'habitants).	0,5	0,7	1,17	2,5	3,6	5,8
Temps de doublement . .	170 ans		105 ans		55 ans	30 ans?
Accroissement	de 0,5 à 1,0		de 1 à 2		de 2 à 4	de 4 à 8
	1650	1820	1925		1980	2010?

Peut-on extrapoler les résultats que l'on vient de citer au-delà de l'an 2000? Ces possibilités d'extrapolation seront étudiées plus en détail aux chapitres 3 et 4. Pour l'instant, il semble évident — étant donné les temps de réponse à travers dans les boucles — et, en particulier dans la boucle positive (natalité) qu'il n'existe aucune possibilité de réduire le taux de croissance de la population avant l'an 2000, même dans l'hypothèse la plus optimiste sur la diminution du taux de natalité. La plupart des géniteurs de l'an 2000 sont déjà nés. Sauf accroissement brutal du taux de mortalité, ce que l'humanité cherchera à éviter par tous les moyens, nous pouvons nous attendre à un chiffre global de population de l'ordre de 7 milliards d'humains aux environs de l'an 2005. Et, si nous continuons à abaisser le taux de mortalité sans mieux réussir à diminuer comme par le passé le taux de natalité, nous pouvons affirmer que dans 60 ans, le chiffre de la population actuelle sera multiplié par quatre!

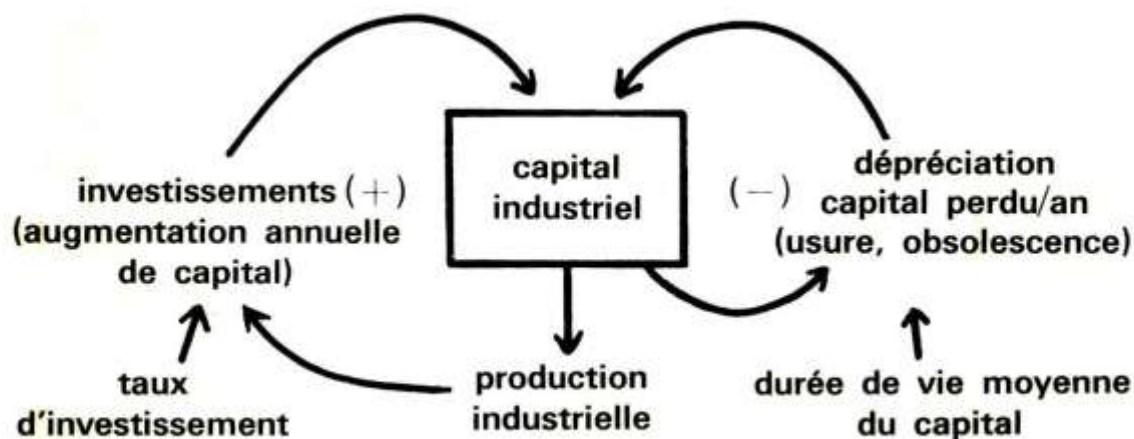
Croissance économique mondiale

La production industrielle est le second facteur essentiel de notre modèle global. Il a connu une évolution encore plus rapide que la population.

En prenant pour base l'indice 100 en 1963, on passe de 30 au cours de la décennie 1930-1940 (avec une forte chute en 1932 et une légère pointe en 1937), à 50 en 1950, 70 en 1958 pour aboutir à 140 en 1968.

Le taux de croissance moyen s'est élevé à 7 % entre 1963 et 1968 et le temps de doublement n'a été que de 10 ans (1958-1968). Si l'on considère maintenant l'indice de production par tête, c'est-à-dire une quantité proportionnelle au quotient de la production globale par la population mondiale, on note également une progression, quoique plus lente : environ 80 en 1958, 100 en 1963 (indice de référence) et 125 en 1968. Le taux de croissance moyen de la production par tête n'est lui que de 5 % par an.

Considérons maintenant le mécanisme de l'évolution du « capital industriel » (celui-ci se décomposant en bien d'équipements, usines, véhicules, machines, outils, outillages divers, etc.). L'évolution de ce capital est régie par deux boucles comme dans le cas de la population :



Avec un capital industriel donné, il est possible de produire chaque année une certaine quantité de produits manufacturés. Cette production dépend de la main-d'œuvre, des matières premières et de bien d'autres facteurs. Pour l'instant, nous supposons que ces divers autres facteurs nous donnent satisfaction et qu'il existe donc une relation directe entre le capital industriel et la production.

Une bonne partie des biens produits chaque année sont des biens de consommation (textiles, voitures particulières, logements) qui sortent du circuit. En revanche, une autre partie de la production équivaut à un apport complémentaire de capital puisqu'elle sert à produire à nouveau (machines à tisser, laminoirs, machines-outils, etc.). Cette dernière partie de la production constitue les *investissements*.

Ces investissements caractérisent une boucle positive, analogue à la boucle de natalité dans le système de population. Plus le capital initial

est élevé, plus il produit; plus il produit, plus il permet d'investir et plus il permet d'investir plus il s'accroît.

Dans ce système, le temps de réponse est le délai nécessaire à la formation de nouveaux investissements, sources de nouveaux produits. Ce temps de réponse peut parfois être assez long : c'est une des caractéristiques des investissements à moyen ou long terme (grandes centrales électriques, ou raffineries de pétrole par exemple).

Le capital industriel n'est pas éternel. Il se déprécie et meurt. Dans ce cas, il est perdu en tant qu'outil de production. Il faut donc introduire dans le système une boucle négative (l'homologue de la boucle de mortalité dans le système de population) qui représente la dépréciation. Plus le capital est important, plus la dépréciation moyenne annuelle est grande et plus grande est la dépréciation, moins il reste de biens d'équipements l'année suivante. Ici, tout comme dans le

Figure 3. — Production industrielle mondiale
(indice 100 en 1963)



Malgré quelques fluctuations, la croissance de la production industrielle suit une courbe exponentielle. Entre 1963 et 1968, le taux d'accroissement moyen est de 7 %. Le produit industriel par tête croît de 5 % par an au cours de cette même période.

SOURCES : UN Department of Economic and Social Affairs, *Statistical Yearbook 1956* et *Statistical Yearbook 1969* (New York : O N U, 1957 et 1970).

système de population, les effets positifs l'emportent largement sur les effets négatifs dans le monde d'aujourd'hui, et le capital industriel croît exponentiellement.

Comme le taux de croissance de la production industrielle est de 7 % par an et que la population ne s'accroît que de 2 %, le caractère dominant de la boucle positive paraît autoriser l'optimisme. Une simple extrapolation de ces taux de croissance tendrait à démontrer que le niveau de vie matériel de la population mondiale doublera d'ici 14 ans (fig. 3) à condition toutefois que cette production soit équitablement répartie entre les citoyens du monde entier, ce qui est loin d'être le cas. La plus large part de la croissance économique ne concerne, en fait, que les pays déjà industrialisés pour lesquels le taux de croissance de la population est relativement faible ¹ (fig. 4). La comparaison des taux de croissance économique et démographique des dix nations les plus peuplées du monde groupant 64 % de la population mondiale en est une démonstration flagrante. Ce tableau justifie l'assertion : « Les riches s'enrichissent et les pauvres font des enfants ».

Tableau 2

Croissance économique et d'accroissement de la population

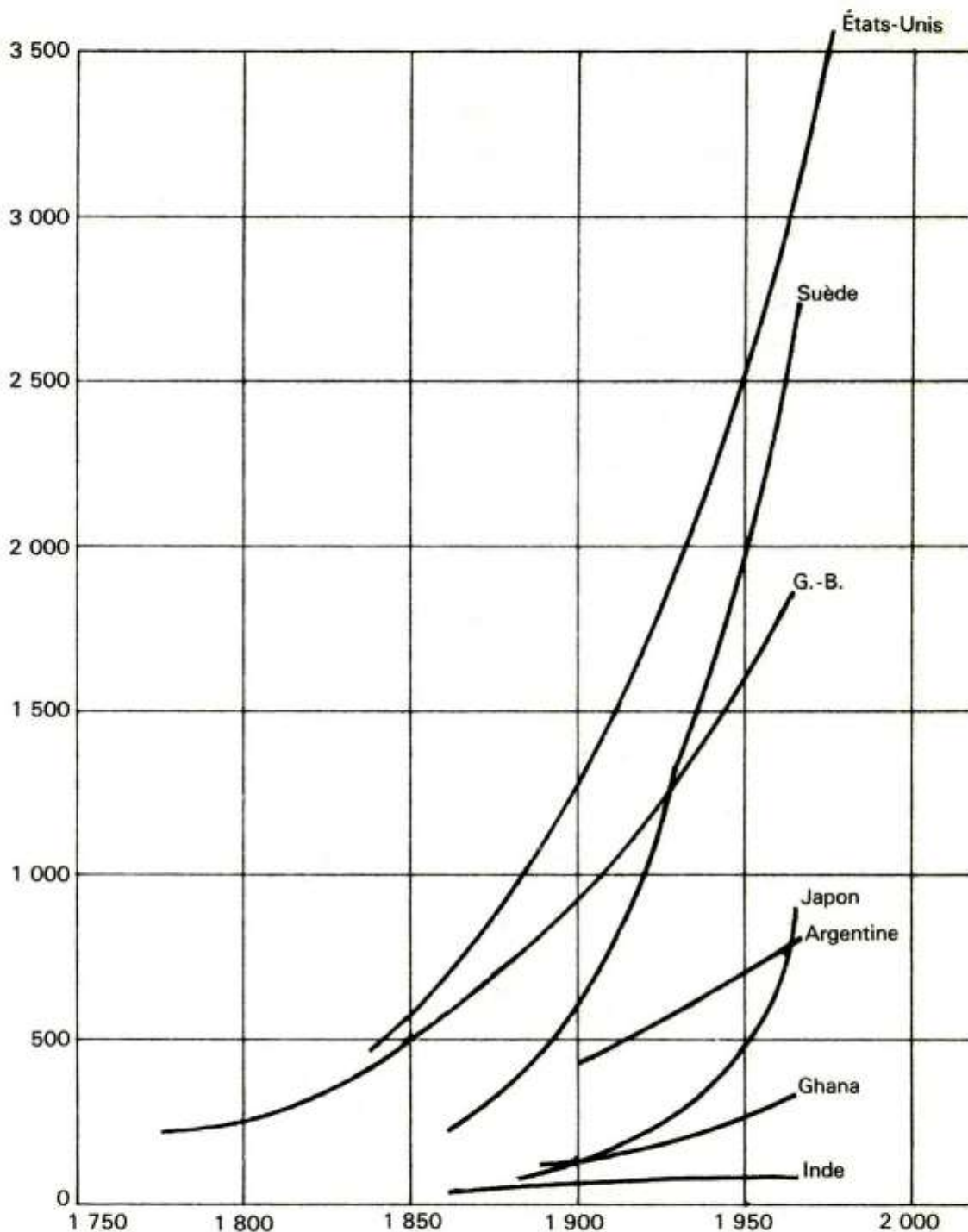
Pays	Population (millions)	% annuel moyen d'accr. population (1961-68)	P.N.B./ tête (dollars U.S.)	% annuel moyen aug. P.N.B. /tête (1961-1968)
République populaire de Chine	730	1,5	90	0,3
Inde	524	2,5	100	1,0
U.R.S.S.	238	1,3	1 100	5,8
U.S.A.	201	1,4	3 980	3,4
Pakistan	123	2,6	100	3,1
Indonésie	113	2,4	100	0,8
Japon	101	1,0	1 190	9,9
Brésil	88	3,0	250	1,6
Nigeria	63	2,4	70	— 0,3
République fédérale allemande	60	1,0	1 970	3,4

N.D.T. : P.N.B. = Produit National Brut.

Source : World Bank Atlas (BIRD, Washington, 1970).

1. N.D.T. : Généralement compris entre 0,5 et 1,5 % alors que la moyenne mondiale actuelle dépasse 2 %.

Figure 4. — Taux de croissance économique
PNB/tête (U.S. dollars par personne et par an)



La comparaison entre le développement économique des différentes nations prouve que les différences entre les taux de croissance exponentielle élargissent le fossé entre nations pauvres et nations riches.

SOURCE : Simon Kuznets, *Economic Growth of Nations* (Cambridge, Mass. : Harvard University Press, 1971).

Il est peu probable que les taux de croissance figurant au tableau 2 ci-dessus demeurent inchangés et cela même avant la fin de notre siècle. Beaucoup de facteurs seront modifiés d'ici 30 ans — par exemple, la fin de la guerre civile au Nigeria entraînera vraisemblablement un accroissement de la production alors que les récents événements du Pakistan ont déjà eu un effet désastreux sur l'économie de ce pays. Notons cependant que les chiffres que nous avons cités en matière de taux de croissance économique sont le résultat du fonctionnement de systèmes socio-économiques fondamentalement stables, dont l'évolution sera probablement plutôt lente que rapide, sauf bien entendu bouleversements sociaux...

On peut néanmoins imaginer ce que donnerait le maintien jusqu'en 2000 des taux de croissance de la population et du P.N.B. des 10 pays cités au tableau précédent. On obtiendrait les valeurs extrapolées du P.N.B. par tête figurant au tableau 3 ci-dessous. En fait, les chiffres n'ont guère de chance d'être atteints. Ils ne constituent pas des prévisions. Ils indiquent simplement la voie dans laquelle notre système nous entraîne, compte tenu de sa structure actuelle.

Le processus de croissance économique, tel qu'il se présente aujourd'hui, élargit inexorablement le fossé absolu qui sépare les pays riches des pays pauvres.

Tableau 3

Valeurs extrapolées du P.N.B. par tête en l'an 2000

Pays	P.N.B. par tête (en dollars 1968) ¹
République populaire de Chine	100
Inde	140
U.R.S.S.	6 330
U.S.A.	11 000
Pakistan	240
Indonésie	130
Japon	23 200
Brésil	440
Nigeria	60
République fédérale allemande	5 850

1. Valeur de référence ne tenant pas compte de l'inflation.

Les extrapolations, telles que celles figurant au tableau 3 pourront paraître inacceptables à beaucoup de nos lecteurs et ceux-ci auront raison. Il faut aussi reconnaître que le rejet, même intuitif, de tels chiffres suppose qu'est également rejetée l'hypothèse selon laquelle aucun changement n'interviendrait à l'intérieur du système. Si les « prévisions » du tableau 3 n'ont aucune chance de se réaliser, ce sera parce que la balance entre les boucles positive et négative qui régissent la croissance de la population et du capital de chaque nation aura été modifiée. Les quatre variables — taux de natalité, de mortalité, d'investissement, de dépréciation du capital —, ou au moins l'une d'entre elles, peuvent changer. Si l'on s'attend à des résultats différents de ceux indiqués au tableau 3, il faut préciser laquelle de ces variables est susceptible de changer et dans quelle mesure et quand. Voilà précisément les questions que notre modèle nous permet de poser, non à l'échelle d'une nation particulière, mais pour l'ensemble du monde.

Afin d'estimer avec un minimum de réalisme les futurs taux d'accroissement de la population et du capital industriel, nous devons mieux connaître les autres grandeurs qui interfèrent avec le système population-capital. Nous commencerons par une série de questions fondamentales :

— Existe-t-il des limites physiques à la poursuite de l'expansion démographique et de l'expansion industrielle, au rythme indiqué au tableau 3?

— Combien d'êtres humains peuvent-ils être accueillis par notre planète, avec quelles conditions d'existence et pendant combien de temps?

Pour répondre à ces questions, nous devons étudier en détail les secteurs de notre écosystème qui fournissent le support indispensable à l'expansion démographique et à la croissance économique.

2.

Les limites de la croissance exponentielle

Que faudrait-il pour maintenir la croissance économique et la croissance de la population jusqu'en 2000 et peut-être au-delà ? La liste des moyens est longue mais peut être divisée approximativement en deux grandes catégories.

La première concerne les moyens *matériels* indispensables à la satisfaction des besoins physiologiques et au soutien des activités industrielles : produits alimentaires, matières premières, combustibles naturels, ainsi que les systèmes écologiques de la planète qui absorbent les déchets et recyclent les substances chimiques importantes. Ces moyens sont en principe quantifiables : terres arables, eaux naturelles, métaux, forêts, océans. Au cours du présent chapitre, nous procéderons à un inventaire de ces « moyens matériels » puisqu'ils constituent les déterminants ultimes des limites à la croissance sur notre terre.

La seconde catégorie des facteurs de croissance comprend les *nécessités sociales*. Même si les systèmes purement physiques de notre globe étaient capables de supporter une population beaucoup plus nombreuse et, économiquement, beaucoup plus développée, la croissance effective de la population et de l'économie dépendra de facteurs tels que la paix et la stabilité sociale, l'éducation, l'emploi et l'évolution contrôlée du progrès technique.

Ces facteurs sont bien plus délicats à évaluer que les facteurs matériels. Ni ce rapport, ni même notre modèle global en son état actuel ne peuvent traiter explicitement de ces données sociologiques sauf dans le cas où les informations relatives au volume et à la répartition des

ressources matérielles constituent en elles-mêmes des indicateurs susceptibles de faire apparaître de futurs problèmes sociaux.

L'abondance de nourriture et de matières premières jointe à un environnement sain sont des conditions nécessaires mais non suffisantes de la croissance. Même dans un climat d'abondance, les problèmes sociaux peuvent arrêter la croissance. Supposons pour l'instant que la paix sociale règne. Quel taux de croissance le système physique supportera-t-il? La réponse que nous obtiendrons constituera une estimation des limites extrêmes susceptibles d'être atteintes par la population et les investissements, mais rien ne pourra garantir que ces limites soient jamais atteintes.

Les produits alimentaires

En Zambie, nation africaine, sur 1 000 naissances on enregistre 260 décès avant la première année. En Inde et au Pakistan le taux est de 140, en Colombie de 82. Beaucoup plus d'enfants meurent avant l'âge scolaire. D'autres encore succombent pendant les toutes premières années de la scolarité.

Lorsque des certificats de décès peuvent être établis, ils font état de maladies telles que la rougeole, la pneumonie, la dysenterie. En réalité, ces enfants meurent plus vraisemblablement de malnutrition [4]. On s'accorde généralement pour fixer à 50 ou 60 % de la population des pays les moins industrialisés la proportion de l'humanité victime de malnutrition [5], ce qui représente un tiers de la population mondiale.

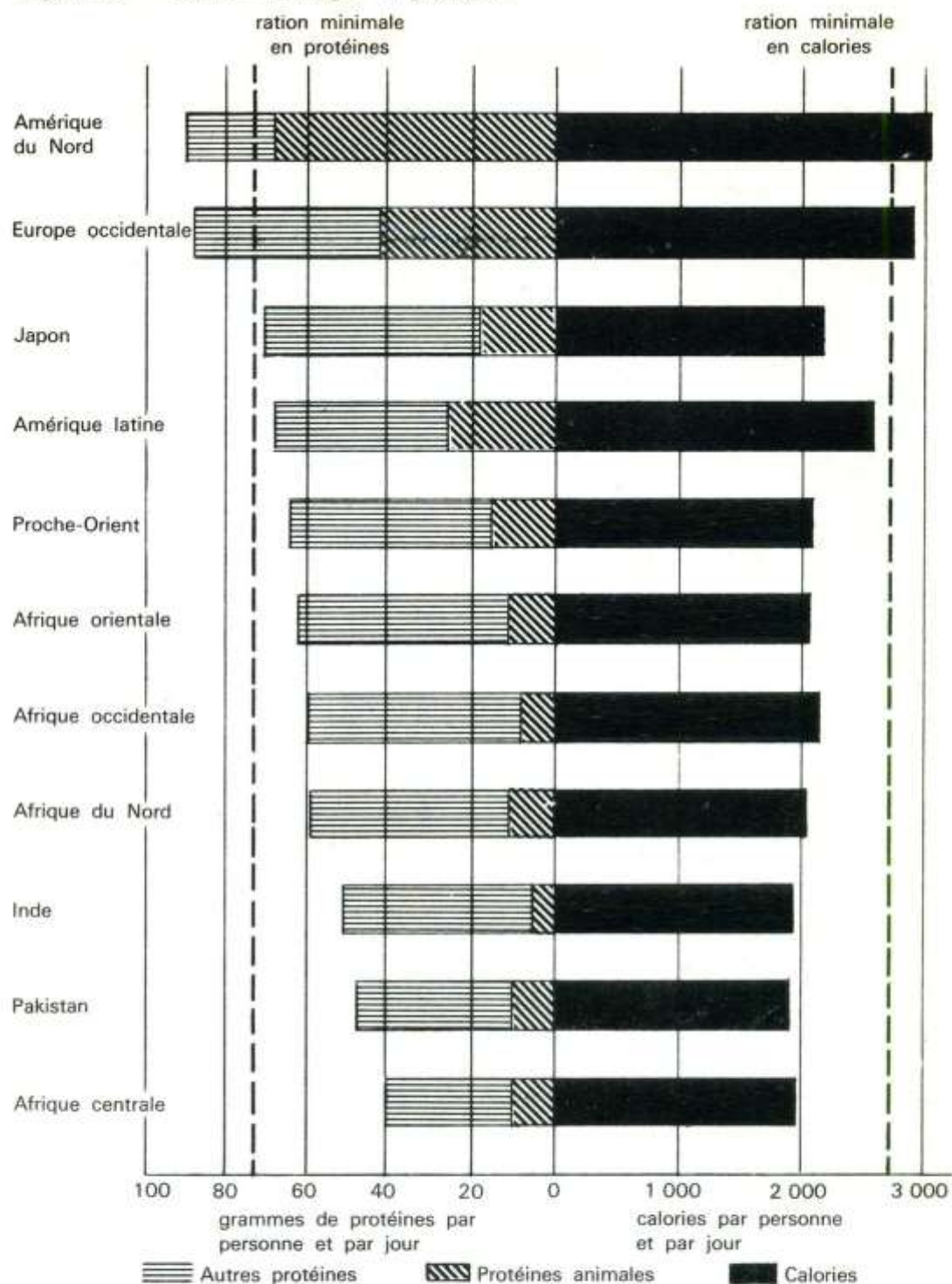
Les estimations de la F.A.O. font ressortir une carence fondamentale en calories dans la plupart des nations en voie de développement, carence liée plus particulièrement au manque de protéines (voir fig. 5). En outre, bien que la production agricole mondiale globale soit en accroissement, la production alimentaire par individu des pays non industrialisés peut à peine se maintenir au niveau actuel déjà insuffisant (voir fig. 6). Cela veut-il dire que les limites de la production alimentaire sur terre seraient déjà atteintes?

Des études récentes démontrent que la surface totale des terres susceptibles d'être cultivées n'excède pas 3,2 milliards d'hectares [6]¹.

1. N.D.T. : 32 millions de km² ce qui correspond à environ 60 fois la superficie de la France métropolitaine et un peu plus de 3 fois celle des États-Unis.

Figure 5. — Ration calorique et protéines

167

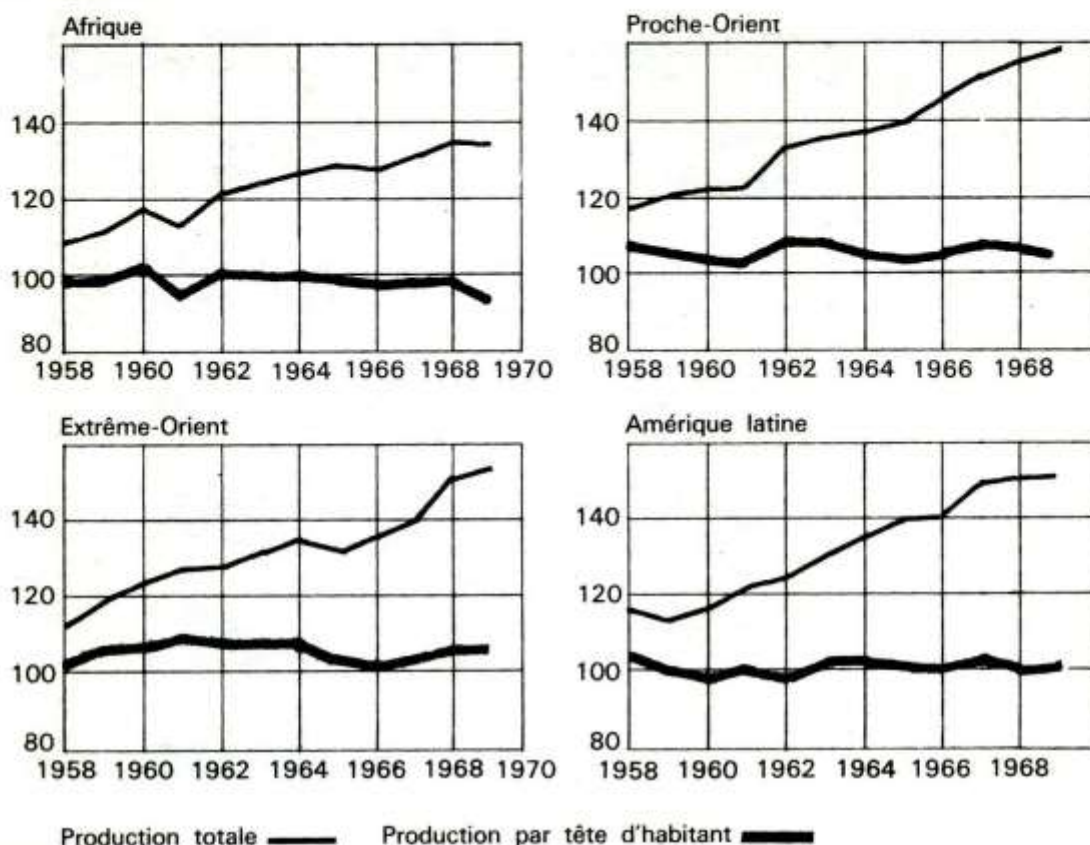


Les besoins quotidiens en protéines et en calories ne sont pas satisfaits dans la plupart des régions du monde. Des inégalités de distribution existent également à l'intérieur de nations ou régions. Selon la F.A.O., les zones les plus défavorisées sont « les régions andines, les étendues semi-arides de l'Afrique, le Moyen-Orient et certains pays à forte densité de population de l'Asie ». Les droites figurant les besoins en protéines et en calories correspondent aux minima indispensables aux Américains du Nord. On a supposé que si les divers aliments propres à chaque pays étaient suffisants pour que chaque individu parvienne à son poids optimal, les besoins seraient les mêmes partout.

SOURCE : F.A.O., « Provisional Indicative World Plan for Agricultural Development » (Rome, 1970).

Figure 6. — Production de denrées alimentaires

Indice moyen de la production alimentaire (base 100 en 1952 ou 1956 suivant les régions).



La production **totale** de denrées alimentaires dans les régions non industrialisées s'est accrue au même rythme que la population. En conséquence, la production **par tête** est demeurée pratiquement **constante** et à un niveau très bas.

SOURCES : F.A.O., « The State of Food and Agriculture » (Rome, 1970).

Les terres les plus riches, environ la moitié de cette superficie, sont effectivement cultivées de nos jours. Pour défricher, irriguer, fertiliser la seconde moitié, la transformer en terre arable, il faudrait investir de 215 à 5 275 dollars à l'hectare ¹. Le coût moyen serait de l'ordre de 1 150 dollars à l'hectare [7] (environ 6 000 F). Selon un autre document de la F.A.O., la création de nouvelles terres cultivables est prohibitive au plan économique.

« En Asie méridionale ... dans quelques régions de l'Extrême-Orient, au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, ainsi que dans certaines régions de l'Amérique latine et de l'Afrique... il n'existe pra-

1. N.D.T. : De 1 000 à 27 000 F environ au taux de change actuel!

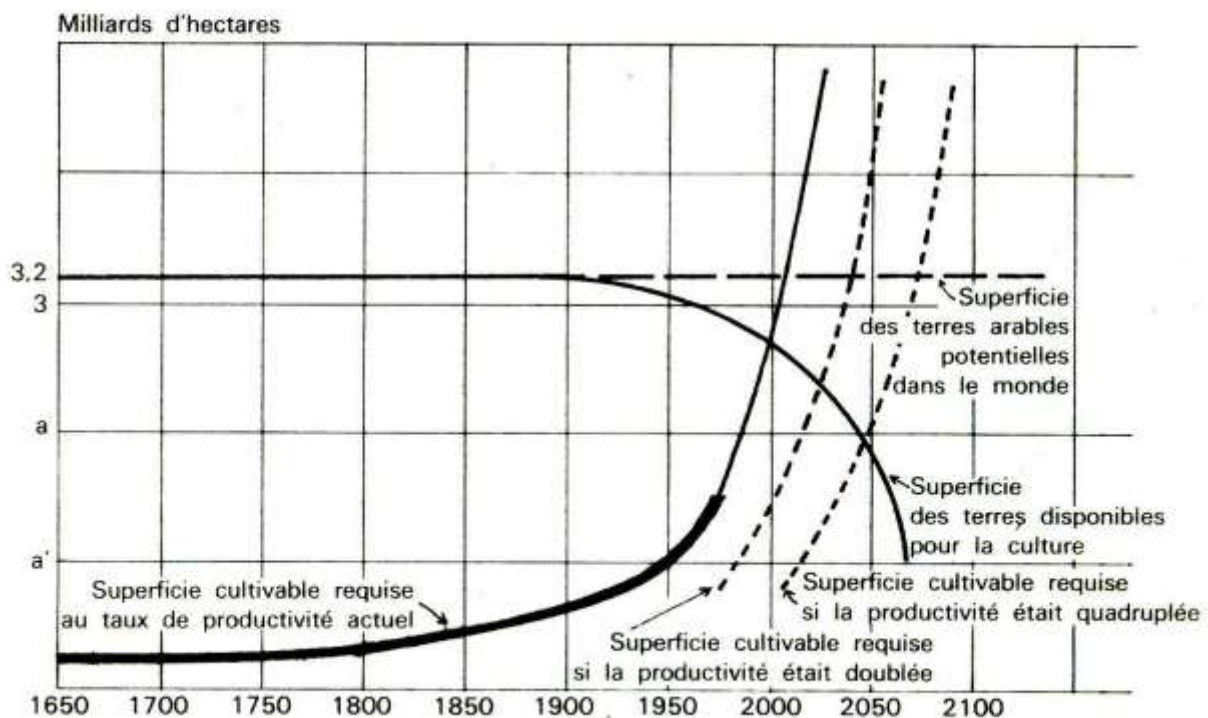
tiquement aucune possibilité d'augmenter la superficie des terres arables... Dans les zones les plus sèches, il faudrait même reconvertir en pâturages naturels les terres dont le rendement est marginal ou submarginal. En Amérique latine et en Afrique subsaharienne, il existe encore des possibilités considérables de création de nouvelles terres arables, mais le prix de leur aménagement serait si élevé que l'on a jugé plus économique d'intensifier le rendement des zones actuellement cultivées [8]. »

En supposant que l'on soit décidé à payer le prix, combien pourrait-on nourrir de personnes, théoriquement tout au moins?

La superficie de terre arable consacrée à chaque individu était en moyenne de 0,4 ha en 1970 (ce qui supposait une superficie mondiale des terres cultivées de l'ordre de 13 milliards d'hectares à cette époque). On a vu que c'était insuffisant (1/3 du globe souffre de malnutrition), les experts américains estiment qu'elle devrait être de 0,9 ha. La courbe inférieure de la figure 7, cependant établie sur la base de 0,4 ha par personne, donne la superficie des terres cultivables qui serait nécessaire pour nourrir une population croissante.

La courbe supérieure représente la superficie des terres arables

Figure 7. — Terres arables



disponibles en fonction du temps. L'allure de cette courbe est intéressante :

Jusqu'au début du xx^e siècle, le plafond théorique des superficies cultivables était de 32 millions de km^2 . A partir de cette époque, ce plafond décroît du fait de l'urbanisation. On suppose que le logement, les installations de production industrielle, et l'infrastructure associée : routes, canalisations, équipements collectifs, égouts, etc., font « mordre » pour chaque individu une surface de $800\ m^2$ au détriment de la terre cultivable disponible¹. En outre, l'érosion de la terre arable par suite de culture intensive, — phénomène dont nous n'avons pas tenu compte — est loin d'être négligeable.

En admettant qu'on puisse utiliser intégralement la superficie des terres arables théoriquement disponibles, et cela dans les conditions les meilleures possibles, le manque de terre cultivable se fera désespérément sentir avant même l'an 2000 si la population continue de s'accroître au taux actuel et si on n'arrive pas à satisfaire ses besoins alimentaires en utilisant pour chaque homme une superficie de terre encore inférieure au strict minimum actuel.

La figure 7 traduit clairement quelques-unes de lois fondamentales qui caractérisent l'expansion dans un système fini.

— *Premièrement*, elle montre comment on peut passer en quelques années d'un état d'abondance à un état de disette. Il y a eu jusqu'à ces dernières décennies un excédent considérable de terres susceptibles d'être cultivées. Dans les 30 ans à venir (temps de doublement de la population mondiale), nous risquerons d'être exposés à une pénurie brutale. Tout comme le propriétaire de l'étang au nénuphar, la race humaine ne disposera peut-être que d'un temps extrêmement réduit pour faire face à une crise résultant d'une croissance exponentielle dans un espace fini.

— *Deuxièmement*, elle fait apparaître qu'il est peu important de quantifier avec précision les hypothèses relatives aux limites de notre écosystème dans un contexte où la croissance exponentielle se poursuit inexorablement.

Nous pouvons toujours imaginer que l'urbanisation ne conduira pas au sacrifice d'un iota de terre arable. Dans ce cas la superficie

1. Une opération portant sur la photographie aérienne de 44 comtés des États-Unis entre 1950 et 1960 fait apparaître que le taux d'urbanisation variait entre 80 et 1 740 m^2 par personne.

potentiellement cultivable resterait constante comme le montre la droite en pointillé de la figure 7 (droite d'ordonnée 32 000 000 de km²). Le point d'intersection de cette droite avec l'exponentielle se situerait aux environs de l'an 2010 ce qui laisse un répit de 10 ans par rapport à l'hypothèse précédente.

Nous pouvons aussi supposer qu'il est possible de doubler ou même de quadrupler le rendement des terres grâce à des progrès des techniques agricoles et à des investissements financiers permettant de tirer le meilleur parti possible de toutes les techniques. Les conséquences d'une multiplication par deux et par quatre de la productivité des terres (courbes pointillées à droite de l'exponentielle) se traduisent respectivement par un ajournement de la crise à 30 et à 60 ans environ, ce qui correspondra dans chaque cas à un délai inférieur au temps de doublement de la population.

Naturellement la société ne se laissera pas surprendre du jour au lendemain par l'apparition de la crise. Celle-ci n'est pas un phénomène ponctuel et les symptômes s'en manifesteront bien avant qu'elle n'ait atteint son paroxysme. Les prix des denrées augmenteront de telle sorte que les plus démunis mourront de faim; d'autres, moins défavorisés, seront amenés à n'utiliser qu'une portion réduite de la terre disponible en se contentant de produits médiocres. Ces symptômes se manifestent déjà dans bien DES ENDROITS DU MONDE. Bien que la moitié seulement des terres potentiellement cultivables soient utilisées aujourd'hui, 10 ou 20 millions de décès sont chaque année imputables, plus ou moins directement, à la malnutrition [10]. Plus ou moins directement... car il apparaît maintenant qu'une grande partie de ces décès est plutôt liée à des contraintes sociales qu'à des causes uniquement matérielles. Une relation claire existe entre ces deux catégories de limitations du système de production des denrées alimentaires. Si de bonnes terres faciles à aménager et à mettre en culture étaient encore disponibles, aucune considération économique ne s'opposerait à ce que l'on nourrisse ceux qui ont faim, et il n'y aurait pas de dilemme. Mais la meilleure moitié des terres potentiellement cultivables est déjà utilisée et la mise en culture de nouvelles terres serait si onéreuse que la société l'a jugée « non rentable ». C'est le type du problème social que des limitations purement matérielles rendent particulièrement ardu.

Même si la société acceptait de payer le prix de la mise en valeur de nouvelles terres ou d'une amélioration des rendements, la figure 7

montre avec quelle rapidité un nouvel accroissement de population amènerait une nouvelle crise. Chaque crise successive sera plus dure à surmonter. Toute duplication du rendement de la terre coûtera plus cher que la précédente. Ce phénomène pourrait s'appeler la loi des coûts croissants. Exemple : Pour augmenter de 34 % la production mondiale de denrées alimentaires entre 1951 et 1966, les dépenses annuelles des agriculteurs se sont accrues, en moyenne, de 63 % pour les tracteurs, de 146 % pour les engrais azotés. Parallèlement, la consommation annuelle de pesticides a triplé. Le prochain accroissement de 34 % nécessitera des investissements encore plus importants et l'utilisation de plus de ressources naturelles.

Combien d'hommes notre terre peut-elle nourrir?

La réponse est liée aux choix que la société fait entre diverses possibilités. Il existe une incompatibilité entre l'accroissement de la production des denrées alimentaires et celui de la production d'autres biens et services nécessaires ou désirés par les hommes. Cette demande de biens et services supplémentaires croît avec la population et, de ce fait, l'incompatibilité devient de plus en plus évidente et de plus en plus difficile à lever. A la limite, si l'on accordait une priorité absolue à la production de denrées alimentaires, il n'y aurait plus d'expansion possible¹.

Nous n'avons évoqué qu'une seule des contraintes possibles à la production de nourriture : la superficie des terres arables.

Il y en a d'autres, notamment l'approvisionnement en eau douce. Le volume d'eau douce est, lui aussi, limité et la demande est également exponentielle. Pour représenter ce phénomène nous pourrions tracer une courbe analogue à celle de la figure 7. Dans quelques régions du monde, l'eau viendra à manquer bien avant que les possibilités d'exploitation de terres arables soient épuisées.

Toutefois, on peut envisager, grâce au progrès technologique, de reculer l'échéance, voire de supprimer toute limitation : production de nourriture synthétique ou désalinisation de l'eau de mer. Ces possibilités seront examinées au chapitre 4. Évidemment, les processus qui seraient mis en œuvre ne relevant pas de la génération spontanée ne sauraient être gratuits et feront largement appel au potentiel de ressources naturelles de la terre. La croissance exponentielle *de la demande de* nourriture est une conséquence directe de

1. N.D.T. : V. notamment chap. 4, fig. 35.

la boucle positive qui régit l'accroissement de la population humaine. La *production* de denrées alimentaires que l'on peut espérer dans l'avenir dépend des terres disponibles, des ressources en eau douce mais aussi des investissements consacrés à l'agriculture. Ces investissements, à leur tour, sont liés à une autre boucle positive dominante, celle des investissements globaux. La mise en valeur de nouvelles terres, l'exploitation des mers, ou l'utilisation accrue d'engrais et de pesticides nécessitera une augmentation du pourcentage des investissements consacrés à la production de denrées alimentaires. Les ressources qui sont à la base de l'accroissement du capital ne sont pas des ressources éventuellement renouvelables ou recyclables comme la terre et l'eau, mais des ressources non renouvelables : combustibles de tous types et métaux. L'expansion de la production vivrière de demain est donc étroitement liée aux disponibilités en ressources non renouvelables. Quelles sont les réserves dont on dispose actuellement ?

Les ressources non renouvelables

« Même si l'on tient compte de facteurs économiques tels que la hausse des cours, corrélat de la raréfaction, on peut voir, dès maintenant, que les réserves de platine, d'or et de zinc seront insuffisantes pour faire face à la demande. Au taux actuel d'expansion..., l'argent, l'étain et l'*uranium* pourront manquer avant la fin du siècle nonobstant la hausse inévitable des prix de revient. En 2050, d'autres gisements de minerais seront épuisés si la consommation annuelle se poursuit au rythme actuel.

En dépit de découvertes spectaculaires récentes, il n'y a qu'un nombre restreint de nouveaux gisements minéraux potentiellement exploitables. Les géologues démentent formellement les hypothèses optimistes et jugent très aléatoire la découverte de nouveaux gisements vastes et riches. Se fier à de telles possibilités serait une utopie dangereuse [11]. »

Les tableaux 4A et 4B traitent de dix-neuf sortes de matières premières (métaux et combustibles) de première nécessité pour l'industrie moderne.

Dans le tableau 4A figurent en regard de la masse ou du volume des réserves globales actuellement connues de chacune de ces matières premières un indice « S » appelé indice statique : il exprime le nombre

Tableau 4 A

Ressources non renouvelables

		S	R			I	I'
Ressource	Réserves globales connues	Indice statique années ¹	Pourcentage ² d'aug. envisagé			Indice exponentiel années ³	Indice exponentiel optimisé ⁴
			Max.	Moyen	Min.		
Aluminium	117 × 10 ⁹ t	100	7,7	6,4	5,1	31	55
Chrome	775 × 10 ⁶ t	420	3,3	2,6	2,0	95	154
Charbon	5 × 10 ¹² t	2 300	5,3	4,1	3,0	111	150
Cobalt.	2,2 × 10 ⁶ t	110	2,0	1,5	1,0	60	148
Cuivre	308 × 10 ⁶ t	36	5,8	4,6	3,4	21	48
Or	11 × 10 ³ t	11	4,8	4,1	3,4	9	29
Fer	100 × 10 ⁹ t	240	2,3	1,8	1,3	93	173
Plomb	91 × 10 ⁶ t	26	2,4	2,0	1,7	21	64
Manganèse	800 × 10 ⁶ t	97	3,5	2,9	2,4	46	94
Mercure	115 × 10 ⁶ t	13	3,1	2,6	2,2	11	41
Molybdène	5 × 10 ⁶ t	79	5,0	4,5	4,0	34	65
Gaz naturel	32 × 10 ¹² m ³	38	5,5	4,7	3,9	22	49
Nickel	66,5 × 10 ⁶ t	150	4,0	3,4	2,8	53	96
Pétrole	455 × 10 ⁹ barils	31	4,9	3,9	2,9	20	50
Platine et métaux de même groupe	13,3 × 10 ³ t	130	4,5	3,8	3,1	47	85
Argent	172 × 10 ³ t	16	4,0	2,7	1,5	13	42
Étain	4,4 × 10 ⁶ t	17	2,3	1,1	0	15	61
Tungstène	1,3 × 10 ⁶ t	40	2,9	2,5	2,1	28	72
Zinc.	123 × 10 ⁶ t	23	3,3	2,9	2,5	18	50

1. L'indice statique S, représente le nombre d'années à l'issue desquelles les réserves actuellement connues seraient épuisées si la consommation annuelle des ressources se maintenait au taux actuel.

2. Le pourcentage R est le taux prévu d'augmentation annuelle de la consommation. La valeur moyenne est prise en ligne de compte pour déterminer l'indice exponentiel.

3. Cet indice I fournit le temps nécessaire à l'épuisement des réserves globales connues en supposant une augmentation annuelle du taux de consommation égale au % moyen ci-dessus. On l'obtient par la formule $I \exp. \frac{\log_e (R \times S) + 1}{R}$.

4. Indice exponentiel I' qui serait obtenu en supposant les réserves globales 5 fois plus élevées. $I' \exp. \frac{\log_e (5 S \times R)}{R}$.

5. Ce groupe comprend outre le platine, le palladium, l'iridium, l'osmium, le rhodium, et le ruthénium.

N.D.T. Exemple de calcul de I et I' s = 150 R moyen = 3,4 % = 0,034

$$I = \frac{\log_e (150 \times 0,034 + 1)}{0,034} = \frac{\log_e 6,1}{0,034} = \frac{1,82}{0,034} = 53$$

$$I' = \frac{\log_e (150 \times 0,034 \times 5 + 1)}{0,034} = \frac{\log_e 26,5}{0,034} = \frac{3,28}{0,034} = 96 \text{ par défaut.}$$

Tableau 4 B

Ressources naturelles	Nations ou régions possédant les plus grandes réserves [%]	Principaux producteurs [%] production mondiale	Principaux consommateurs [%] consommation mondiale	Consommation U.S. [%] de la consommation mondiale
Aluminium . . .	Australie [33] Guinée [20] Jamaïque [10]	Jamaïque [19] Surinam [12]	U.S.A. [42] U.R.S.S. [12]	[42]
Argent.	Pays communistes [36] U.S.A. [24]	Canada [20] Mexique [17] Pérou [16]	U.S.A. [26] R.F.A. [11]	[26]
Charbon	U.S.A. [32] U.R.S.S. Chine [53]	U.R.S.S. [20] U.S.A. [13]		[44]
Chrome	Rép. Afrique Sud [75]	U.R.S.S. [30] Turquie [10]		
Cobalt	Rép. du Congo [31] Zambie [16]	Rép. du Congo [51]		[32]
Cuivre	U.S.A. [28] Chili [19]	U.S.A. [20] U.R.S.S. [15] Zambie [13]	U.S.A. [33] U.R.S.S. [13] Japon [11]	[33]
Étain	Thaïlande [33] Malaisie [14]	Malaisie [41] Bolivie [16] Thaïlande [13]	U.S.A. [24] Japon [14]	[24]
Fer	U.R.S.S. [33] Amérique du Sud [18] Canada [14]	U.R.S.S. [25] U.S.A. [14]	U.S.A. [28] U.R.S.S. [24] R.F.A. [7]	[28]
Gaz naturel . . .	U.S.A. [25] U.R.S.S. [13]	U.S.A. [58] U.R.S.S. [18]		[63]
Manganèse . . .	Rép. Afrique Sud [38] U.R.S.S. [25]	U.R.S.S. [34] Brésil [13] Rép. Afrique Sud [13]		[14]
Mercure	Espagne [30] Italie [21]	Espagne [22] Italie [21] U.R.S.S. [18]		[24]
Molybdène . . .	U.S.A. [58] U.R.S.S. [20]	U.S.A. [64] Canada [14]		[40]
Nickel	Cuba [25] Nlle-Calédonie [22] U.R.S.S. [14] Canada [14]	Canada [42] Nlle-Calédonie [28] U.R.S.S. [16]		[38]
Or	Rép. Afrique Sud [40]	Rép. Afrique Sud [77] Canada [6]		[26]

Tableau 4 B (suite)

Ressources naturelles	Nations ou régions possédant les plus grandes réserves [%]	Principaux producteurs [%] production mondiale	Principaux consommateurs [%] consommation mondiale	Consommation U.S. [%] de la consommation mondiale
Pétrole	Arabie Saoudite [17] Koweït [15]	U.S.A. [23] U.R.S.S. [16]	U.S.A. [33] U.R.S.S. [12] Japon [6]	[33]
Platine.	Rép. Afrique Sud [47] U.R.S.S. [47]	U.R.S.S. [59]		[31]
Plomb	U.S.A. [39]	U.R.S.S. [13] Australie [13] Canada [11]	U.S.A. [25] U.R.S.S. [13] R.F.A. [11]	[25]
Tungstène	Chine [73]	Chine [25] U.R.S.S. [19] U.S.A. [14]		[22]
Zinc	U.S.A. [27] Canada [20]	Canada [23] U.R.S.S. [11] U.S.A. [8]	U.S.A. [26] Japon [13] U.R.S.S. [11]	[26]

Sources : — U.S. Bureau of Mines, *Mineral facts and Problems*, 1970.
 — O.N.U. Département des Affaires économiques et sociales, *Yearbook stat.*, 1969.
 — *Yearbook of the American Bureau of Metal statistics 1970* (York Maple Press, 1970).
 — *World Petroleum Report* (N. York : Mona Palmer Publishing, 1968).
 — P. T. Flawn, *Mineral Ressources* (Skokie Ill Rand Mc Nally, 1966).
 — *Metal Statistics* (Somerset-NJ-American Metal Market Company, 1970).
 — U.S. Bureau of Mines, *Commodity Data Summary* (Washington D.C. : Government Printing Office, janvier 1971).

d'années qui s'écouleraient avant épuisement de ces réserves si la consommation annuelle restait au niveau actuel. Or, là aussi, la consommation croît exponentiellement et l'on doit envisager, compte tenu des statistiques, un taux de croissance annuel de la consommation. Trois pourcentages possibles sont donnés pour chaque matière première dont un pourcentage moyen « R ». Ce pourcentage moyen servira à établir l'indice exponentiel « I » dont le mode de calcul est donné en bas du tableau 4A. Cet indice permet de connaître la durée des stocks en tenant compte de ce taux d'accroissement moyen de la consommation. Un calcul identique peut être effectué à partir d'hypothèses plus ou moins pessimistes.

On peut également supposer que les réserves ont été sous-estimées et, faisant preuve d'optimisme, envisager de nouvelles découvertes qui permettraient de quintupler le stock actuellement connu.

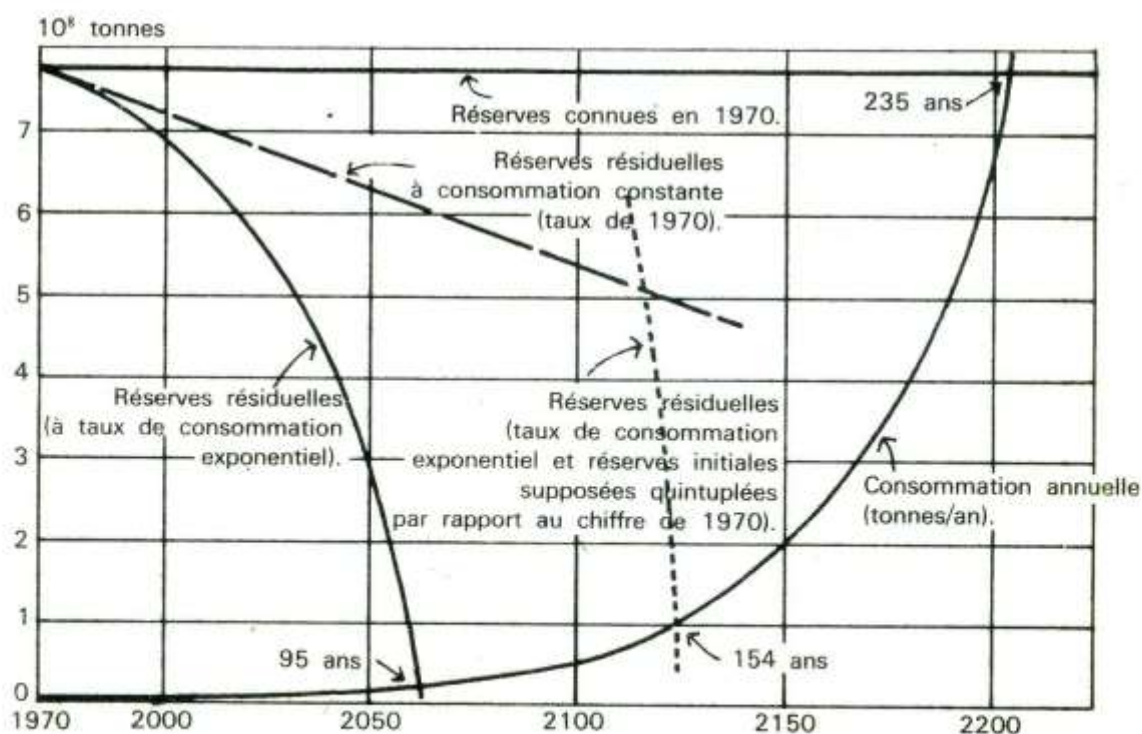
A partir de cette dernière hypothèse, on calculera l'indice exponentiel I' ou indice optimisé.

On remarquera, — et c'est ce qui explique le choix de trois pourcentages — que cette consommation, dans le cas de certains produits de base, croît plus rapidement que la population, par suite d'une demande par tête sans cesse accrue qui correspond à une augmentation du niveau de vie. La croissance exponentielle de la consommation de ressources non renouvelables est liée à l'effet conjugué de deux boucles positives; croissance de la population et croissance des investissements.

La figure 7 a montré qu'une utilisation exponentielle des terres arables conduirait rapidement à la saturation des terres disponibles. De même l'utilisation exponentielle des ressources naturelles diminuerait les réserves disponibles.

Nous avons pris pour exemple le cas du chrome dont l'indice statique est l'un des plus élevés du tableau 4A. Cet exemple est illustré par la figure 8 qui présente beaucoup d'analogies avec la figure 7. Des courbes pourraient être tracées pour toutes les matières premières figurant au tableau 4A, les échelles de temps présenteraient des dif-

Figure 8. — Réserves de chrome



férences mais l'allure générale des courbes ne serait pas sensiblement modifiée.

Les réserves connues de chrome sont actuellement évaluées à 775 millions de tonnes ¹.

Le taux d'extraction actuel du chrome est de 1,85 millions de tonnes par an [12]. Si ce taux était maintenu, les réserves seraient épuisées en 420 ans (droite en trait interrompu qui couperait l'axe des abscisses en dehors des limites de l'épure).

La consommation de chrome augmente en moyenne de 2,6 % par an. Les deux courbes en trait plein se coupent au point d'abscisse 2065 ce qui signifie qu'au taux actuel d'accroissement de la consommation, les réserves seraient épuisées non pas en 420 ans mais en 95 ans.

Soyons optimistes : supposons que les stocks, par suite de découvertes miraculeuses, soient cinq fois plus élevés que ne l'indiquent les estimations actuelles, ils seraient épuisés en 154 ans au lieu de 95, toujours en maintenant à 2,6 % le taux d'accroissement de la consommation. Ce point se situe en l'année 2124 (intersection entre la courbe inférieure en trait plein et la courbe en pointillés). Encore plus optimistes, nous supposons qu'à partir de 1970, il est possible de recycler intégralement le chrome utilisé et, de cette manière, reconstituer les réserves initiales : par suite de l'accroissement de la consommation, l'épuisement des réserves initiales se produirait au bout de 235 ans ² (intersection de la courbe exponentielle croissante en traits pleins avec la droite d'ordonnées 775 000 000 de tonnes).

Dans les conditions exposées au tableau 4A, on voit que les réserves d'aluminium ne dureraient pas plus de 31 ans et, éventuellement 55 ans si on multiplie par 5 le chiffre du stock actuellement connu. Dans le cas du cuivre, on obtiendrait respectivement 36 et 48 ans.

Ces estimations peuvent paraître simplistes. Le processus est, en réalité, beaucoup plus complexe et l'honnêteté la plus élémentaire nous contraint d'introduire dans le mode de calcul d'autres paramètres pour simuler les nombreuses interactions possibles entre les diffé-

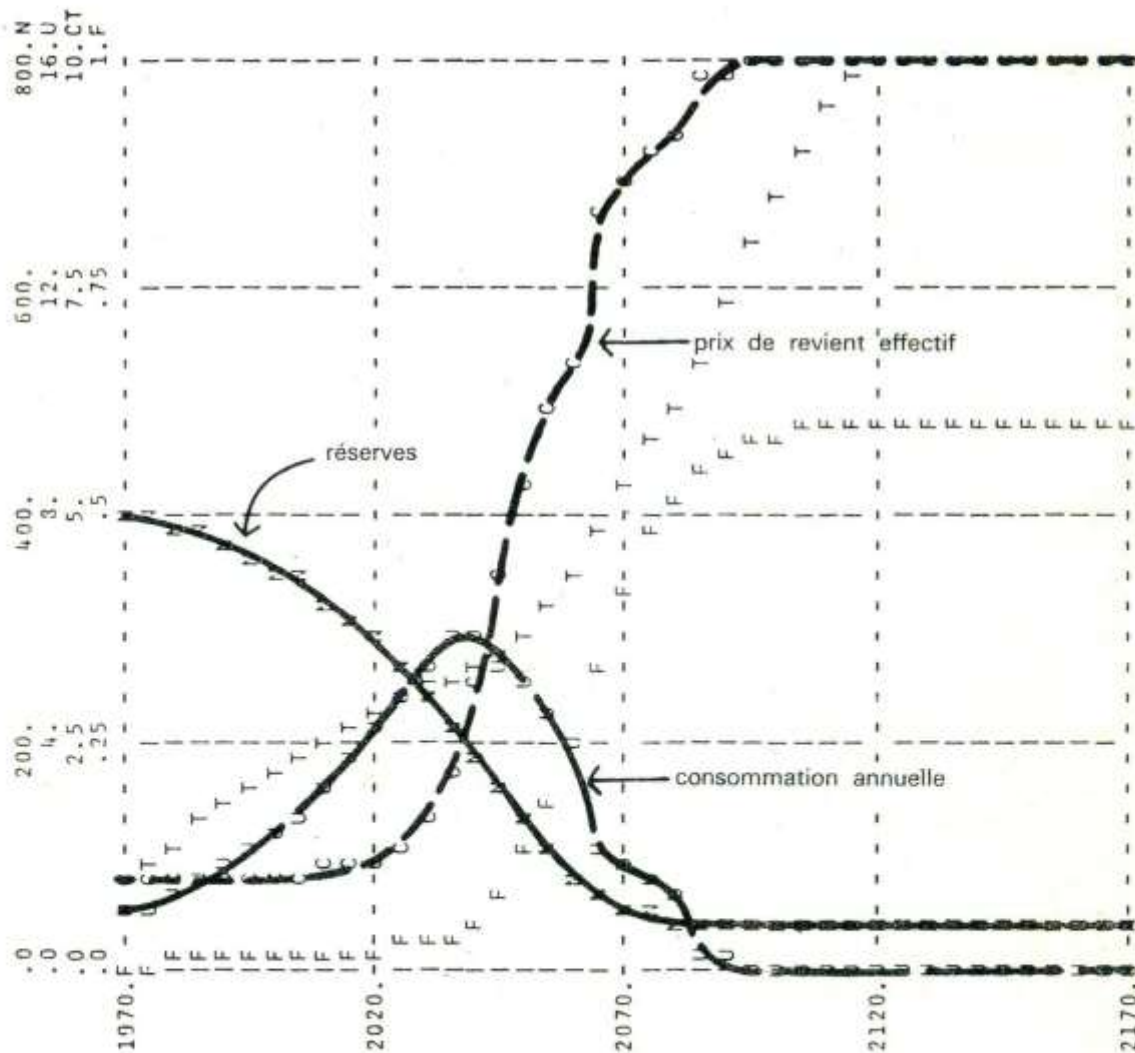
1. Sauf spécification contraire, le terme tonne désignera la tonne métrique dont la valeur est 1 000 kilogrammes-masse.

2. N.D.T. : Les valeurs $I = 95$ et $I' = 54$ peuvent être trouvées en appliquant les formules indiquées dans la note du bas du tableau 4 A. Pour trouver la valeur 235, on posera :

$$I'' = \frac{\log_e (1 + S)}{\log_e (1 + R)}$$

rentes variables et en particulier, celles régissant le taux d'utilisation de ces ressources naturelles. L'un des facteurs déterminants de la demande est le coût d'un produit. Ce coût est lié aux impératifs de la loi de l'offre et de la demande, mais également aux techniques de production et aux lois de la concurrence, dans la mesure où l'existence d'*ersatz* est susceptible de modifier la demande de produits naturels. A l'aide d'un ordinateur, on a tracé la figure 9 que l'on fournit ici telle quelle, l'exemple choisi est encore le chrome : l'indice statique en 1970 est évalué à 400 ans. Le temps est en abscisses. En ordonnées sont représentées cinq grandeurs : F, disponibilité d'un *ersatz*, C prix de revient, T progrès technologique, U consommation annuelle et

Figure 9. — Disponibilité du chrome



SOURCES : William W. Behrens III, « The Dynamics of Natural Resource Utilization », Paper presented at the 1971 Computer Simulation Conference (Boston, mars-juillet 1971).

N indice statique. Les réserves sont exprimées en millions de tonnes, les consommations en tonnes/an. Le prix de revient et le progrès technologiques sont des indices dont la base a été fixée à 1 en 1970 et la disponibilité en produits de substitution ou *ersatz*, F, est un pourcentage des réserves initiales.

Cinq courbes apparaissent sur la figure 9. Sur trois d'entre elles, les points sont joints par des traits interrompus (U, C et N). Comment interpréter ces courbes?

Au début la consommation annuelle (U) croît exponentiellement et l'on entame largement les réserves. Pendant un certain temps les prix (C) restent stables parce que les progrès de la technologie (T) permettent de tirer le meilleur parti de minerais moins riches. Toutefois, la demande continuant à croître, les progrès techniques ne sont pas assez rapides pour compenser les coûts croissants qu'imposent la localisation des gisements moins accessibles, l'extraction du minerai, son traitement et son transport. Les prix montent, doucement d'abord, puis en flèche. Ces prix plus élevés incitent les consommateurs à utiliser moins de chrome et à lui substituer dans la mesure du possible d'autres matériaux. Au bout de 125 ans, les réserves résiduelles, environ 5 % des réserves initiales, ne peuvent fournir le métal qu'à un prix prohibitif et l'exploitation des derniers gisements est pratiquement abandonnée. L'influence des paramètres économiques permettrait donc, dans le cas du dernier modèle plus perfectionné de reculer de 30 ans (125 ans au lieu de 95) la durée effective des stocks de chrome tels qu'ils ont été évalués en 1970. Cette évaluation des stocks peut être jugée pessimiste; si nous supposions des réserves doubles de notre estimation initiale qu'advierait-il?

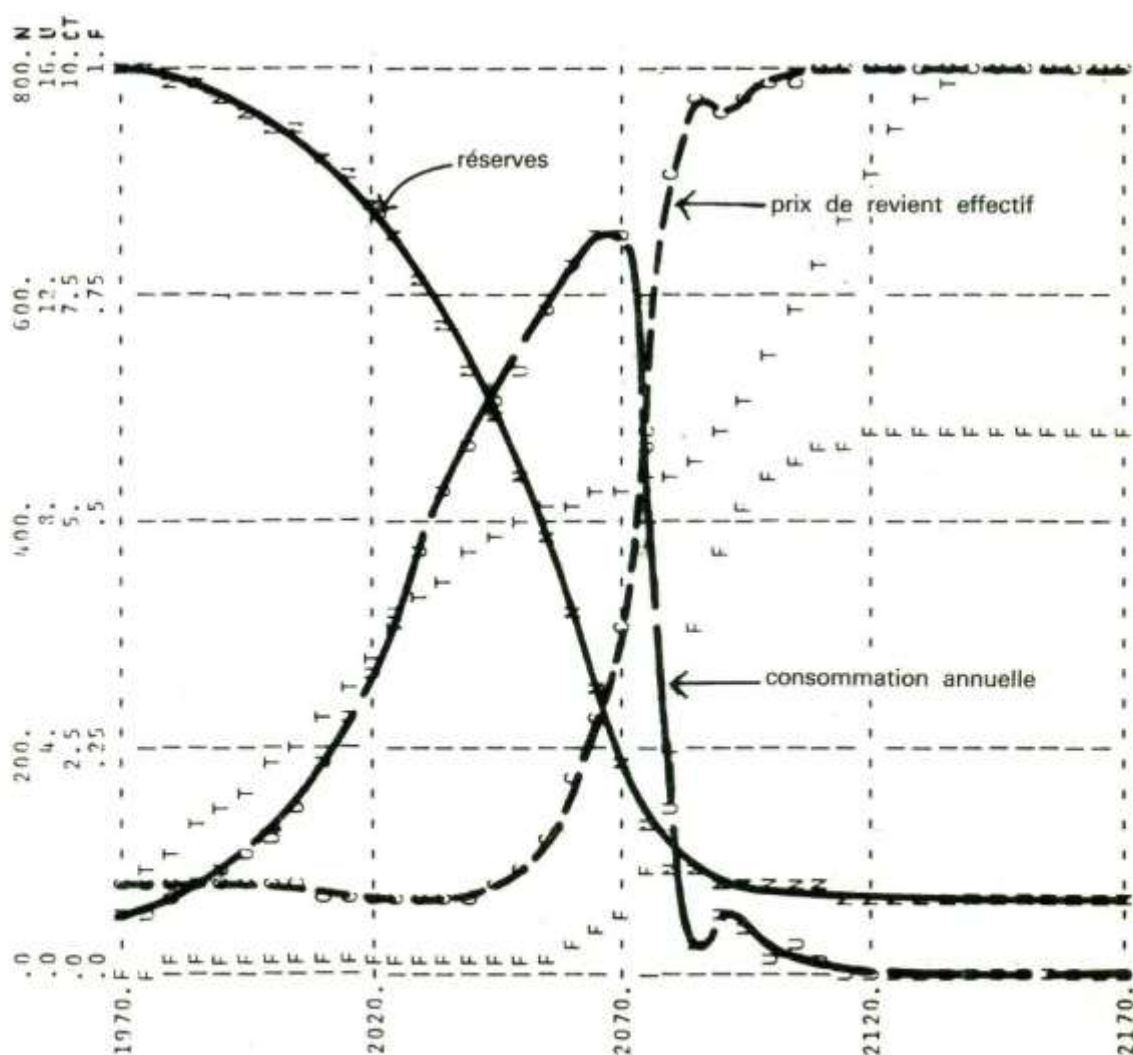
Considérons la figure 10 :

Nous supposons qu'à la suite d'une découverte inattendue, en 1970, notre indice statique est 800 ans et non 400. Les prix restent stables plus longtemps et auraient même tendance à décroître légèrement (la courbe accuse un léger minimum vers l'an 2030). Le prix peu élevé du métal incite à la consommation que l'on voit s'accroître rapidement jusqu'en 2030 environ. Le ralentissement du progrès technique (qui se manifeste à cette époque et qui se matérialise par un point d'inflexion sur la courbe T), joint à une baisse accélérée des réserves, a pour conséquence une augmentation rapide des prix et un ralentissement de la consommation. Les prix, continuant à monter malgré de nouveaux progrès des techniques d'extraction, de traitement

et de transport, provoquent un net ralentissement de la consommation, encore accentué par le recours (ceci à partir de 2070) à des produits de substitution, de plus en plus nombreux. Cette hypothèse optimiste nous conduit à l'an 2125, d'où un gain d'une vingtaine d'années seulement par rapport aux conditions précédentes.

Une comparaison des deux courbes fait ressortir de nombreux points communs dont le plus caractéristique est la forme en cloche de la courbe de consommation. Cette particularité est l'un des traits les plus frappants de l'utilisation de ressources fatalement limitées. De ces exemples et de nombreux autres également valables pour la quasi-totalité des ressources naturelles actuellement détectées, nous

Figure 10. — Disponibilité du chrome (réserves supposées doublées)



pouvons conclure que : *Étant donné le taux actuel de consommation des ressources naturelles et l'augmentation probable de ce taux, la grande majorité des ressources naturelles non renouvelables les plus importantes auront atteint des prix prohibitifs avant qu'un siècle ne se soit écoulé.*

Cette conclusion ne pourra être mise en cause quelles que soient les hypothèses les plus optimistes quant aux réserves encore inconnues, aux progrès techniques susceptibles d'être réalisés, à la découverte de produits de substitution et au recyclage des matériaux tant que la demande continuera à croître exponentiellement. Les prix des matériaux dont les réserves sont en voie d'épuisement rapide ont de ce fait commencé à augmenter : le prix du mercure (indice statique 13 ans, indice exponentiel 11 ans) a augmenté de 500 % depuis 20 ans et celui du plomb de 300 % depuis 30 ans [13].

D'autres considérations compliquent encore le problème : en premier lieu les réserves de ressources naturelles et leur consommation ne sont pas également réparties sur terre. Le tableau 4B indique clairement que les pays industriels qui sont les plus grands consommateurs ne sont pas automatiquement les détenteurs des réserves essentielles. L'approvisionnement de leur industrie et par conséquent leur économie dépend étroitement d'un réseau d'accords internationaux avec les principaux pays possesseurs des matières premières essentielles à leurs industries de base. Il sera déjà difficile de décider, au plan économique, du sort de toute une série d'industries quand, les unes après les autres les matières premières atteindront des prix inabordables; que dire alors de l'impondérable en politique, dans les relations entre pays producteurs et pays consommateurs de matières premières lorsque les ressources seront concentrées dans des secteurs géographiques plus restreints. La nationalisation récente des mines en Amérique du Sud et le succès des pressions exercées par les pays du Moyen-Orient en vue d'accroître leur prix de vente du pétrole brut montrent que les questions politiques se poseront probablement bien avant les ultimes questions d'ordre économique.

Les ressources naturelles existantes sont-elles suffisantes pour que le développement économique permette aux 7 milliards d'hommes attendus en l'an 2000¹ de bénéficier d'un niveau de vie convenable? La réponse, une fois de plus, dépend des options et des décisions prioritaires que prendront les grandes sociétés consomma-

trices. Elles peuvent continuer à consommer au rythme actuel. Elles peuvent trouver le moyen de récupérer, de recycler les produits usés. Elles peuvent concevoir de nouveaux moyens permettant de prolonger le temps d'utilisation des produits manufacturés obtenus à partir de matières premières raréfiées. Elles peuvent encourager l'instauration de systèmes sociaux et économiques qui pourraient satisfaire les besoins des individus en réduisant plutôt qu'en augmentant la consommation individuelle de substances irremplaçables.

Toutes ces options impliquent la recherche de compromis, lesquels sont d'autant plus délicats qu'ils impliquent un choix entre un profit immédiat et un profit à long terme. Pour pouvoir disposer, demain, de ressources suffisantes il faut en limiter la consommation dès aujourd'hui. On ne peut guère y parvenir naturellement sans une augmentation des prix. Le recyclage des déchets ou la fabrication de produits durables sont, dans la plupart des cas, considérés comme « non rentables ».

Même si ces méthodes étaient appliquées, quel qu'en soit le coût, aussi longtemps que les boucles positives dominantes de la croissance de la population et de la production continueraient à engendrer plus de gens et une demande de consommation individuelle plus élevée, le système serait conduit à ses limites : l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables.

Que deviennent après usage les métaux et les combustibles que nous consommons ? En un sens, ils ne sont jamais perdus. Leurs atomes sont redistribués et éventuellement dispersés sous forme diluée, et non immédiatement utilisable, dans l'air, le sol et les eaux de notre planète. Les systèmes écologiques naturels peuvent en absorber une bonne part. Toutefois, si ces déchets sont produits en très grandes quantités, les mécanismes naturels d'absorption peuvent être saturés... et on retrouve le mercure dans l'organisme des poissons de mer, les particules de plomb dans l'air des villes, les coulées de pétrole sur les plages et des montagnes d'immondices un peu partout. Il n'est donc pas étonnant qu'intervienne une autre grandeur exponentielle de notre système global : *la pollution*.

1. N.D.T. : En se basant sur le taux actuel de la progression démographique.

La pollution

L'homme vient seulement de prendre conscience des conséquences de ses activités sur son environnement. La quantification de ces conséquences est encore plus récente et de ce fait, incomplète. Nous ne pouvons pas, dès à présent, évaluer définitivement la capacité d'absorption de la pollution que la terre possède. Toutefois, dans une optique globale et dynamique, quatre points illustrent la difficulté que l'on rencontre pour comprendre et maîtriser le comportement futur de nos systèmes écologiques :

1. Les quelques types de pollution qui ont pu être quantifiés, grâce à des mesures effectuées sur une période relativement longue, semblent caractérisés par une croissance exponentielle.
2. Nous ignorons quels maxima absolus pourraient être assignés à ces courbes.
3. L'existence de délais naturels dans les processus écologiques accroît les risques d'une sous-estimation des contre-mesures nécessaires, et donc la probabilité d'arriver à l'improviste au point limite de saturation.
4. Quelques polluants sont dispersés dans le monde entier, et leur nocivité se manifeste très loin de leur point d'origine.

Faute de place, et de données fiables pour tous les polluants, nous étudierons chacun des quatre points ci-dessus dans le cas des polluants qui ont fait l'objet d'une étude exhaustive. Ce ne sont peut-être pas les plus importants (bien que tous aient leur importance), mais ce sont ceux dont le mécanisme est le mieux connu.

Croissance exponentielle de la pollution

Tous les polluants qui ont pu faire l'objet de mesures voient leur importance croître exponentiellement avec le temps. Les taux d'accumulation varient très largement selon les types de polluants, mais, dans la plupart des cas, sont supérieurs au taux de croissance de la population. Certains de ces polluants sont manifestement liés à la crois-

sance démographique. D'autres accompagnent la croissance de la production ou le progrès technique. La plupart sont, de toute manière, sous l'influence conjuguée des deux boucles positives régissant l'expansion démographique et industrielle.

Commençons par les polluants issus de l'utilisation croissante de l'énergie. La richesse d'un groupe humain, d'une société, s'évalue notamment d'après le montant de sa consommation individuelle moyenne d'énergie (fig. 11). Cette moyenne individuelle, à l'échelle mondiale, croît actuellement de 1,3 % chaque année [14]. En tenant compte de la poussée démographique on obtient un taux absolu de 3,4 % par an.

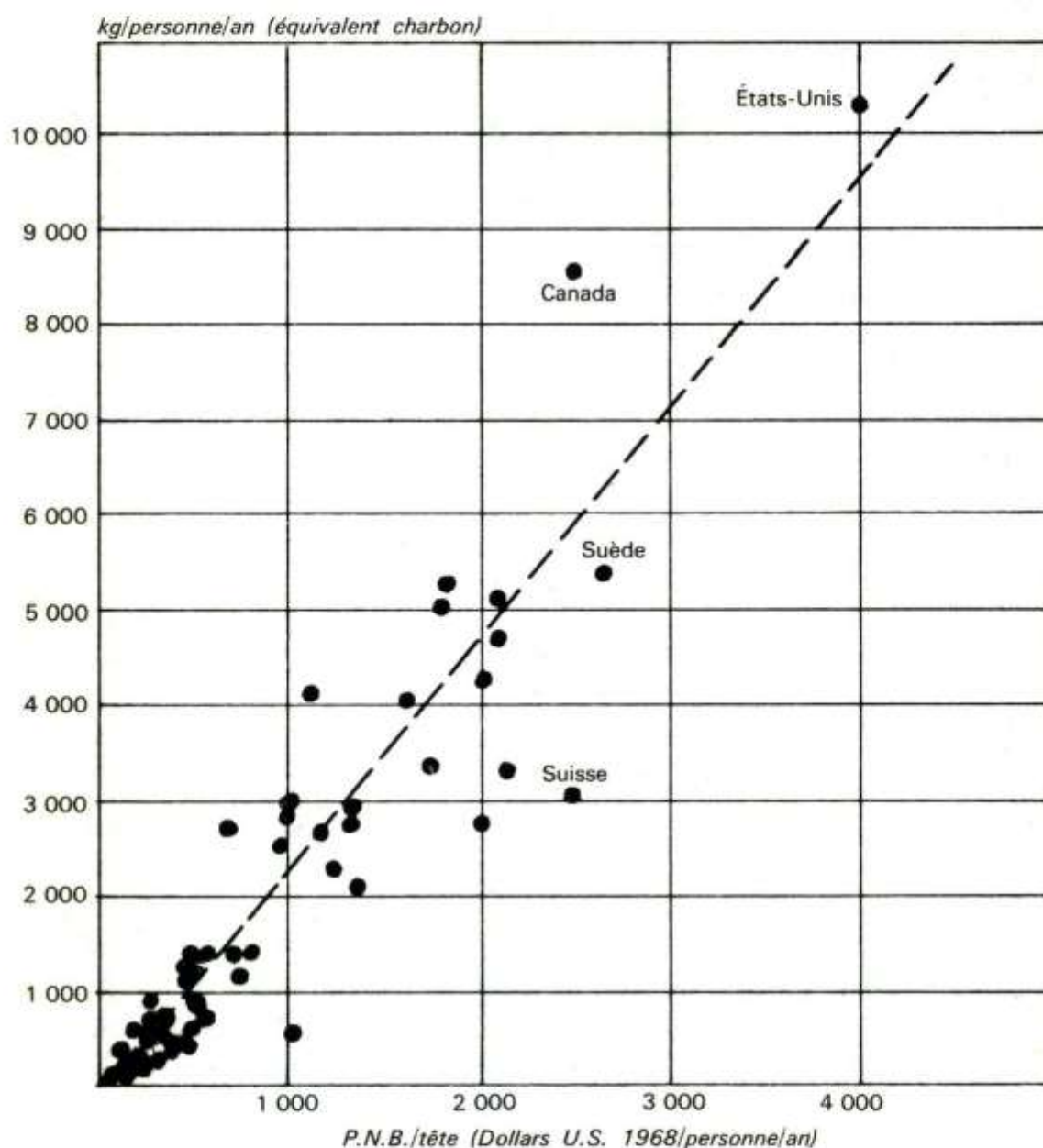
De nos jours, 97 % de l'énergie utilisée dans l'industrie provient des combustibles « fossiles » (charbon, hydrocarbures et gaz naturels) [15]. Brûlés, ces combustibles laissent échapper dans l'atmosphère, entre autres, de l'anhydride carbonique (CO_2) environ 20 milliards de tonnes par an [16]. La loi de concentration du CO_2 dans l'atmosphère est exponentielle. Le taux d'accroissement moyen est de 0,2 %. Une moitié seulement de la masse du CO_2 dégagé demeure effectivement dans l'atmosphère, l'autre moitié a apparemment été absorbée, essentiellement par les eaux de surface des mers et des océans [17].

Si les besoins en énergie étaient un jour couverts par l'énergie nucléaire au lieu de l'être par les combustibles fossiles, l'augmentation de la concentration en CO_2 cesserait vraisemblablement et ceci, — espère-t-on — avant que ne se manifestent des effets climatologiques ou écologiques mesurables à l'échelle mondiale. En vertu des lois de la thermodynamique, la majeure partie de l'énergie utilisée par l'homme est restituée au milieu ambiant sous forme de chaleur¹. Venant d'une source d'énergie autre que le rayonnement solaire², cette chaleur réchauffe l'atmosphère soit directement, soit par l'intermédiaire des fluides de refroidissement : généralement l'eau. Cette eau de refroidissement est souvent déversée dans les rivières et la « pollution thermique » détruit, en certains endroits, l'équilibre de la vie aquatique [18]. La chaleur rejetée dans l'atmosphère des villes

1. N.D.T. : L'énergie dégagée par la combustion des matières de base (charbon, pétrole, gaz...) s'exprime en thermies (unités de chaleur). Dans les machines les plus perfectionnées, qu'il s'agisse des moteurs à explosion, des turbines à gaz ou à vapeur, le travail mécanique produit représente dans le meilleur des cas 20 à 25 % de la chaleur reçue.

2. Énergie nucléaire ou atomique, charbon, pétrole, etc.

Figure 11. — Consommation d'énergie et produit national brut par tête



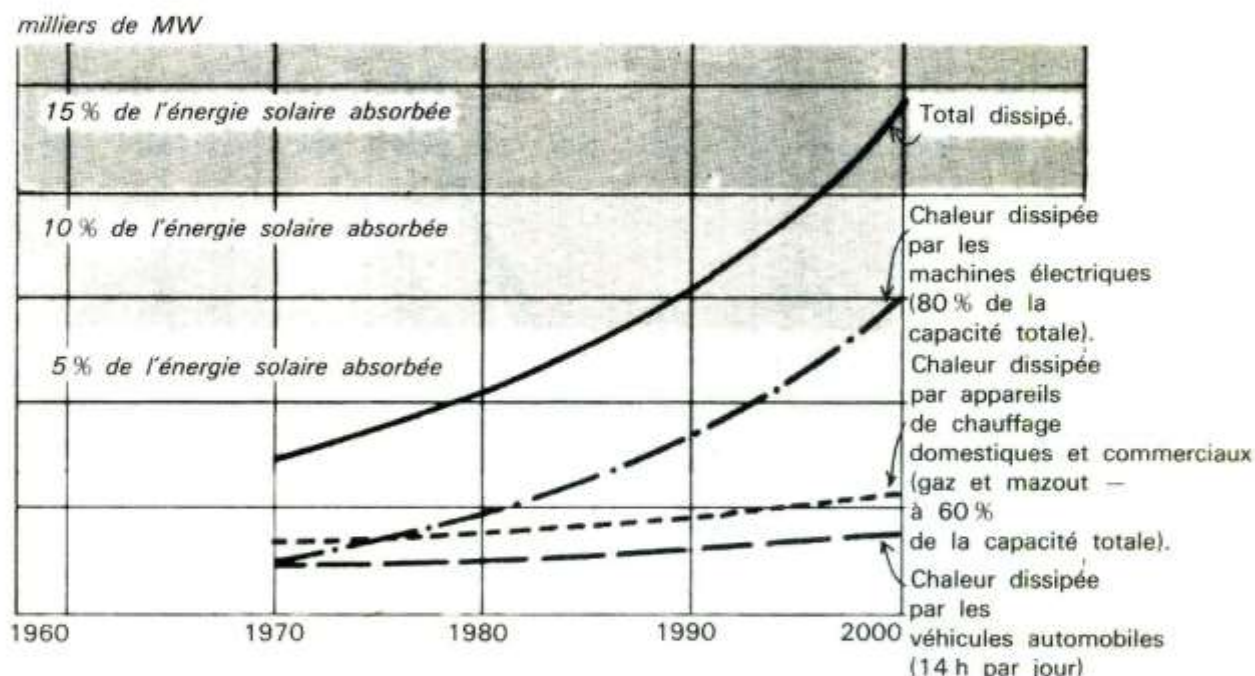
Bien que l'on constate, suivant les pays, des consommations d'énergie par tête d'habitant variant assez largement, il existe une corrélation valable entre cette consommation et le P.N.B. par tête. La relation est quasi-linéaire. La dispersion est due essentiellement aux différences de climat et au développement plus ou moins poussé de l'industrie lourde.

SOURCES : Energy consumption from UN Department of Economic and Social Affairs, *Statistical Yearbook 1969* (New York : United Nations, 1970). GNP per capita from *World Bank Atlas* (Washington, DC; International Bank for Reconstruction and Development, 1970).

engendre la formation d'« îlots de chaleur » urbains, on y relève de nombreuses anomalies climatiques [19]. La pollution thermique peut avoir une influence importante sur le climat, à l'échelle mondiale, lorsqu'elle atteint un pourcentage notable de l'énergie solaire normalement absorbée par la terre [20].

La figure 12 montre l'évolution possible de la pollution thermique que provoque une zone fortement urbanisée, en fonction du rayonnement solaire reçu.

Figure 12. — Chaleur dissipée dans le bassin de Los Angeles (pollution thermique)



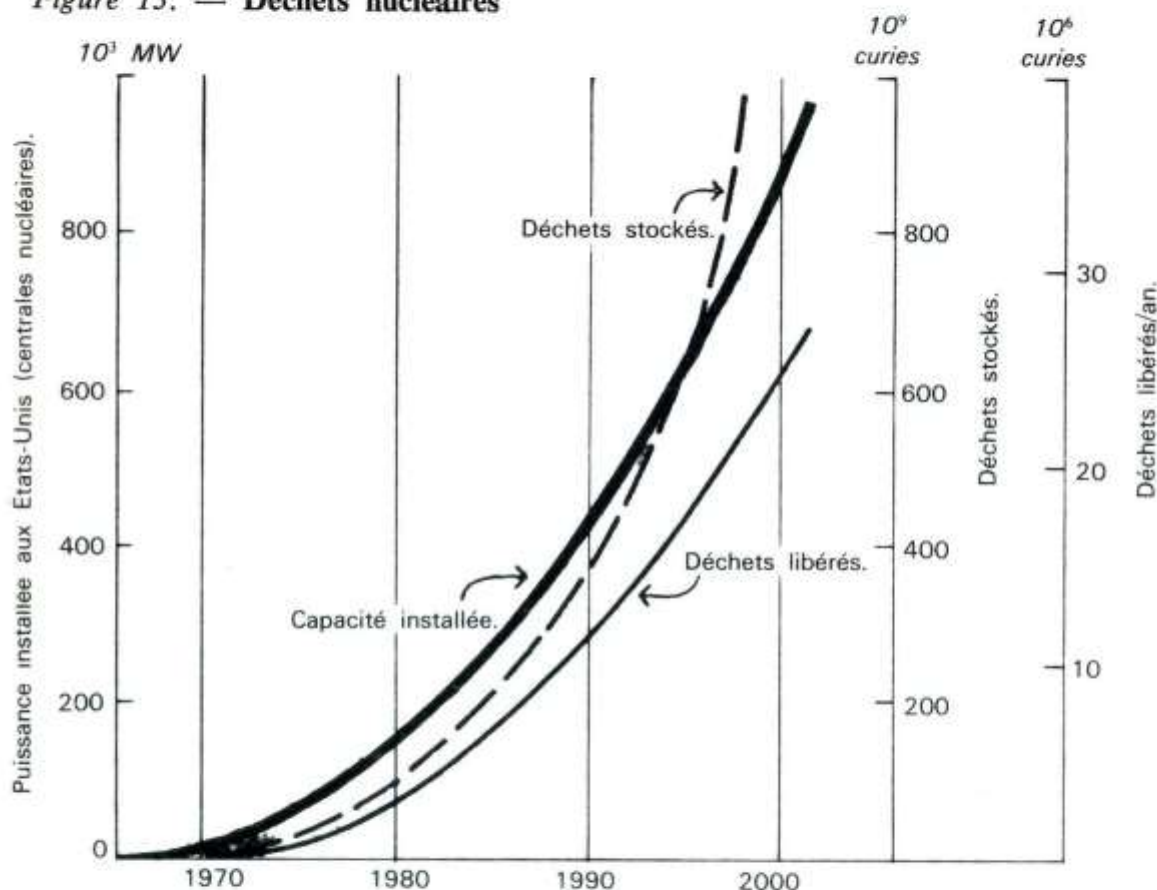
Actuellement, la chaleur dissipée sur les quelque 10 000 km² du bassin de Los Angeles représente environ 5 % de l'énergie solaire absorbée au niveau du sol. Au taux de croissance actuel, la chaleur dissipée représenterait, en l'an 2000, 15 % de l'énergie solaire reçue. On note déjà aujourd'hui des modifications climatiques.

SOURCE : L. Lees in *Man's Impact on the Global Environment*, Report of the Study of Critical Environmental Problems (Cambridge, Mass. : M.I.T. Press, 1970).

L'énergie nucléaire engendre, elle, un autre type de polluant : les déchets radioactifs. L'énergie nucléaire ne constituant actuellement qu'une faible part de l'énergie utilisée par l'homme, l'impact des déchets radioactifs sur l'environnement ne peut qu'être l'objet d'hypothèses. On peut cependant s'en faire une idée à partir du nombre des isotopes radioactifs que déversent ou déverseront les centrales nucléaires existantes, en cours de construction, ou projetées. Une estimation

partielle du rayonnement qui serait émis dans l'environnement par une centrale de 1,6 millions de kW en cours de construction aux États-Unis mentionne 42 800 curies de krypton radioactif¹ (dont la demi-vie² varie de quelques heures à 9,4 années suivant l'isotope) dans les gaz des piles et 2 910 curies de tritium (demi-vie 12,5 ans) dans les eaux effluents [21]. La figure 13 représente l'accroissement possible

Figure 13. — Déchets nucléaires



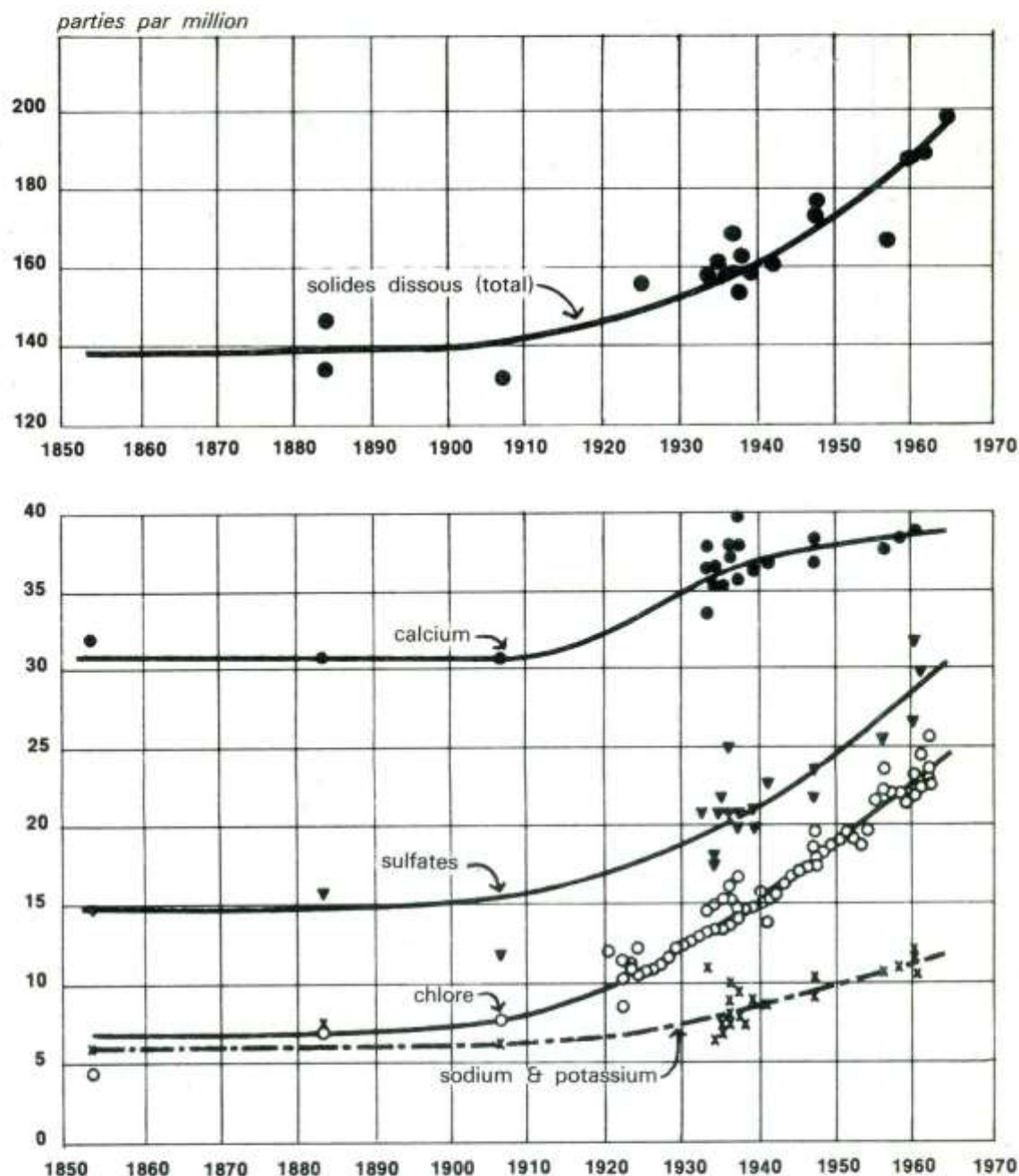
La capacité des centrales nucléaires aux États-Unis devrait passer de 11 000 MW en 1970 à 900 000 MW en 2000. La masse totale des déchets radio-actifs stockés dépasserait probablement plus de mille milliards de curies à cette date. Les déchets libérés (krypton et tritium) atteindraient 25 millions de curies par an.

SOURCES : Installed capacity to 1985 from US Atomic Energy Commission, *Forecast of Growth of Nuclear Power* (Washington, DC : Government Printing Office, 1971). Installed capacity to 2000 from Chauncey Starr, « Energy and Power », *Scientific American*, September 1971. Stored nuclear wastes from J. A. Snow, « Radioactive Waste from Reactors », *Scientist and Citizen* 9 (1967). Annual release of nuclear wastes calculated from specifications for 1,6 thousand megawatt plant in Calvert Cliffs, Maryland.

1. La curie est l'équivalent radioactif d'un gramme de radium. C'est une quantité tellement importante que les concentrations en produits radioactifs dans l'environnement sont exprimées en microcuries (un millionième de curie).

2. Encore appelée « période ».

Figure 14. — Modification des caractéristiques chimiques des eaux du lac Ontario



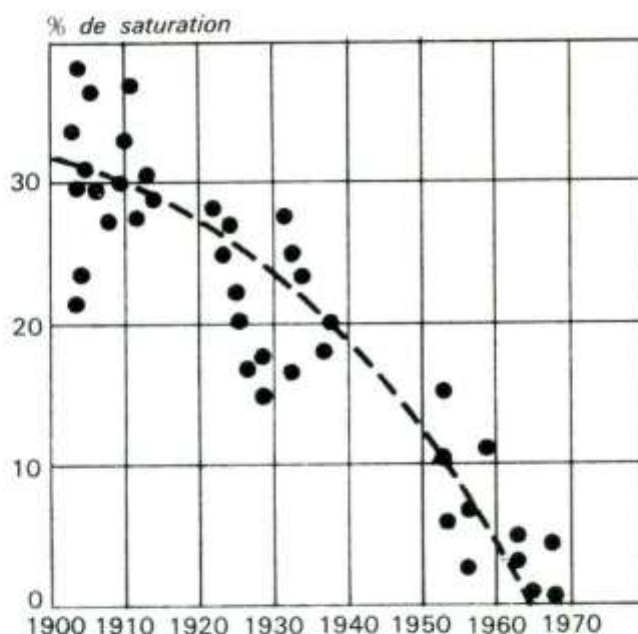
Le lac Ontario est le déversoir de tous les déchets industriels urbains et agricoles de la région. Les concentrations de produits chimiques augmentent exponentiellement. Bien des espèces de poissons sont en voie de disparition (harengs 100 fois moins qu'en 1920; brochets 120 fois moins; truites 1 000 fois moins).

SOURCE : A. M. Beeton, *Statement on Pollution and Eutrophication of the Great Lakes*, The University of Wisconsin Center for Great Lakes Studies Special Report (Milwaukee, Wisc. : University of Wisconsin, 1970).

de la capacité des centrales nucléaires des États-Unis entre 1970 et 2000, et fournit une évaluation des déchets radioactifs qui seraient produits annuellement par ces réacteurs, ainsi qu'une estimation des déchets accumulés provenant des combustibles nucléaires usés, qu'il faudra mettre en sûreté.

L'anhydride carbonique, l'énergie thermique et les déchets radioactifs ne constituent que trois des éléments perturbateurs que l'homme introduit dans son environnement et ce, à un rythme exponentiel. Les figures 14 à 17 offrent d'autres exemples. La figure 14 illustre les modifications chimiques qui se produisent dans le lac Ontario par suite de l'accumulation de déchets industriels solubles d'origine

Figure 15. — Teneur en oxygène des eaux de la Baltique



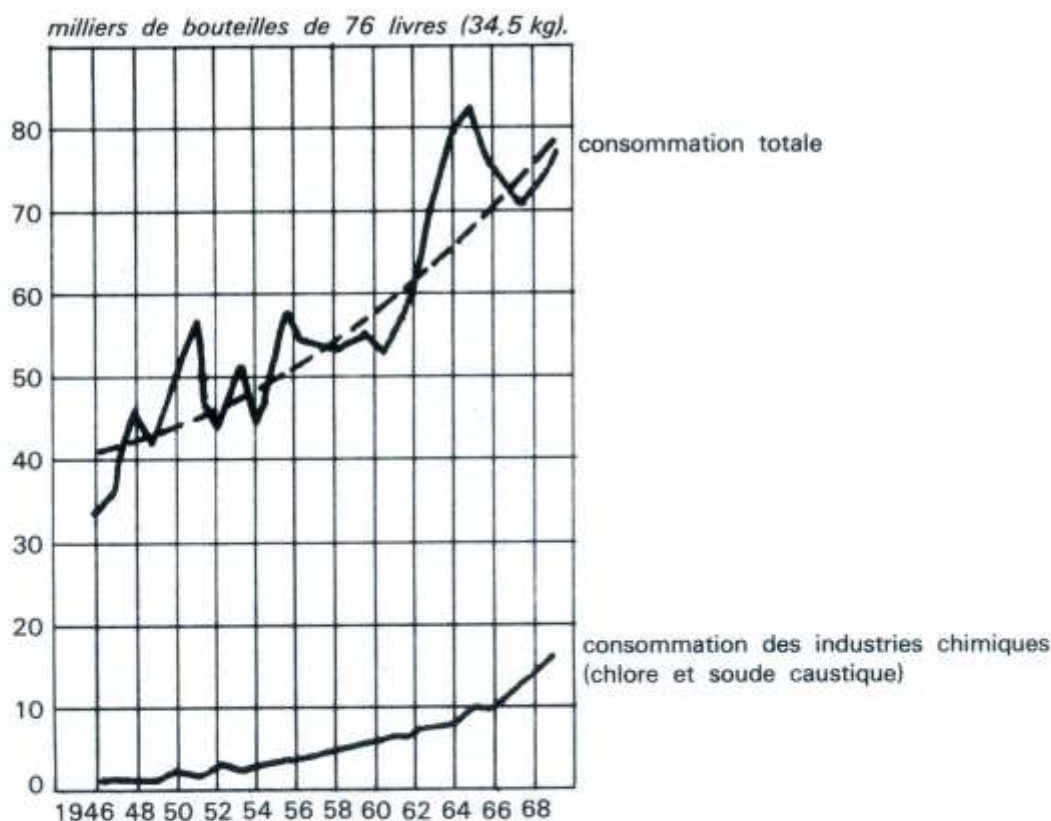
La Baltique est une mer fermée sans grande circulation des eaux. Les déchets organiques en s'y accumulant diminuent la concentration d'oxygène dissous. Dans certaines zones, en particulier dans les grands fonds, la concentration tombe à zéro. Aucune forme de vie aquatique ne peut s'y maintenir.

SOURCE : Stig H. Fonselius, « Stagnant Sea », *Environment*, juillet-août 1970.

agricole ou urbaine. La figure 15 montre l'évolution de la teneur en oxygène dissous (que les poissons « respirent ») en fonction du temps, dans la mer Baltique, l'afflux de déchets organiques qui se dégradent par oxydation entraîne la disparition de l'oxygène en solution. Le taux d'oxygène dissous est déjà tombé à zéro dans certaines régions

de la Baltique. Des métaux toxiques, le plomb et le mercure sont rejetés dans les cours d'eau et dans l'atmosphère. Ils proviennent des moteurs d'automobiles, des incinérateurs, des rejets et effluents de l'industrie et des pesticides agricoles. L'accroissement exponentiel de la consommation de mercure aux États-Unis entre 1946 et 1968 est représenté figure 16. 18 % seulement du mercure utilisé sont récupérés et recyclés après usage [22]. Le mercure, métal dont le point d'ébullition est relativement bas (moins de 400 °C) peut être transporté à d'assez grandes distances par les courants aériens sous forme de gouttelettes microscopiques résultant de la condensation de ses vapeurs. On a ainsi constaté la présence en quantité exponentiellement croissante de dépôts de mercure dans les couches de plus en plus profondes de la calotte glaciaire du Groenland (voir fig. 17).

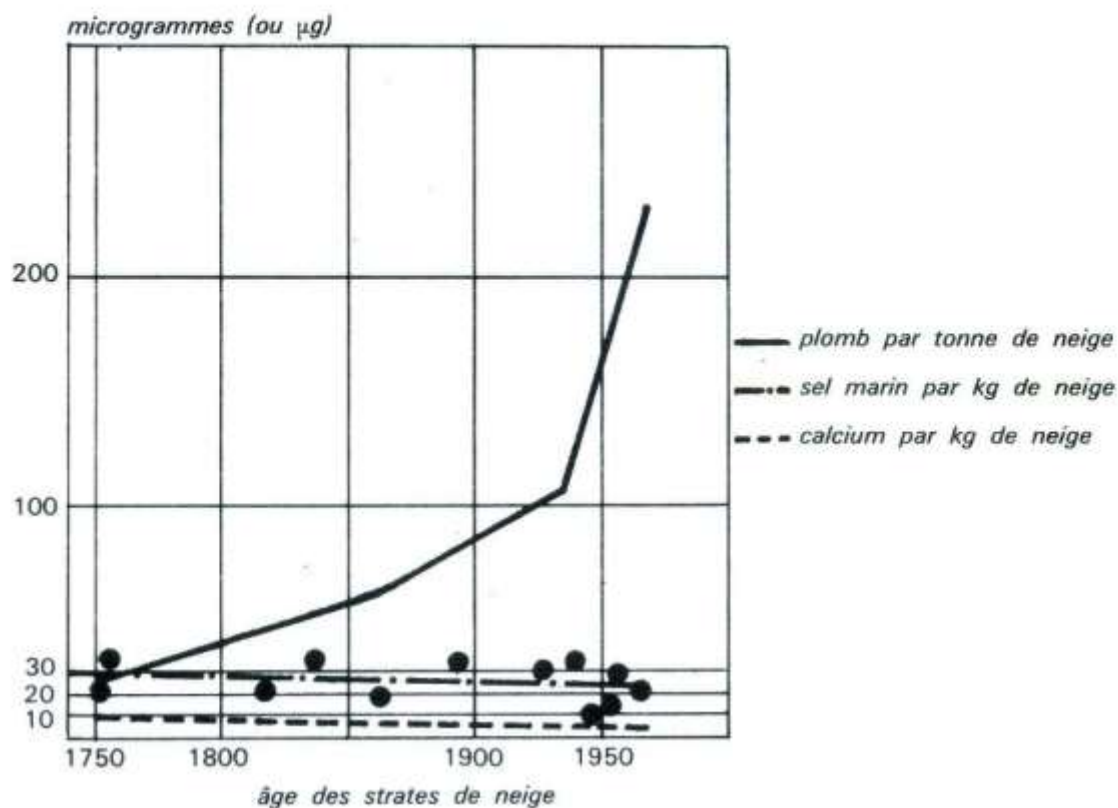
Figure 16. — Consommation de mercure aux États-Unis



La consommation suit une courbe exponentielle modulée par les fluctuations du marché. On notera une source de pollution complémentaire (ne figurant pas sur ce graphique) : le mercure libéré dans l'atmosphère par la combustion des combustibles fossiles.

SOURCE : Barry Commoner, Michael Carr, Paul J. Stamler, « The Causes of Pollution », avril 1971.

Figure 17. — Teneur en plomb de la calotte glaciaire du Groenland



Le plomb se dépose sur la calotte glaciaire du Groenland. Un échantillonnage de neige fait apparaître des traces de plomb au niveau de strates dont l'origine remonterait à 1750. Les strates les plus récentes contiennent des quantités bien plus élevées de plomb, transporté par les courants aériens. Le calcium et le sel marin ont été recherchés pour établir une base de comparaison.

SOURCE : C. C. Patterson et J. D. Salvia, « Lead in the Modern Environment — How Much is natural? », Scientist and Citizen, avril 1968.

Des limites extrêmes inconnues

Toutes les courbes exponentielles représentatives des divers types de pollution peuvent être extrapolées, de la même manière que l'on étudie les besoins en terres arables et les consommations de ressources naturelles (cf. fig. 7 et 8 ci-dessus). Dans ces deux derniers cas, nous avons vu que la courbe exponentielle pouvait atteindre une limite au-delà de laquelle s'amorçait une décroissance. Cette limite correspond au point où les terres ou les ressources cessent d'être utilisables, dans des conditions économiquement acceptables. En ce qui concerne les courbes 12 à 17, nous n'avons pas pu établir de valeurs limites car nous ne savons pas encore jusqu'à quel point la pollution peut

perturber l'équilibre écologique de la terre sans conséquences graves. On ignore quelle est la quantité de CO_2 ou de chaleur que l'on peut libérer dans l'environnement sans provoquer de modifications irréversibles des conditions climatiques globales; ni quelles doses de radiations, de plomb, de mercure ou de pesticides pourront être absorbées par les plantes, les poissons ou les hommes avant de provoquer des solutions de continuité dans les processus vitaux.

Temps de réponse naturels dans les processus écologiques

Notre ignorance des limites de la capacité qu'a la terre d'absorber les polluants est une raison suffisante pour nous efforcer de tarir nos sources de pollution. Un temps très long peut s'écouler entre le moment où une substance polluante est libérée dans l'environnement et celui où les effets s'en font sentir. Ce temps de réponse et ses implications sont illustrés par le cheminement du DDT dans la nature. Les résultats que nous présentons sont tirés d'une étude détaillée suivant les méthodes de la Dynamique des Systèmes¹ dans laquelle on utilise des constantes numériques caractéristiques du cycle du DDT. La conclusion générale est applicable (sous réserve de modification des données numériques) à toutes les substances toxiques à dégradation lente telles que le mercure, le plomb, le cadmium, d'autres pesticides le polychlorobiphényle (PCB) et les déchets radioactifs.

Chaque année on utilise environ 100 000 t de DDT [23] en pulvérisations. Une partie s'évapore et est transportée par les courants aériens avant de retomber à nouveau sur la terre ou dans les océans.

Dans les mers, une partie du DDT est absorbé par le plankton qui sert de nourriture aux poissons, à leur tour mangés par l'homme. A chaque étape du cycle, le DDT peut soit se dégrader et se transformer en substances inoffensives, se diluer, ou alors se concentrer dans les tissus d'organismes vivants. Chacune de ces étapes nécessite un certain délai (voir fig. 18).

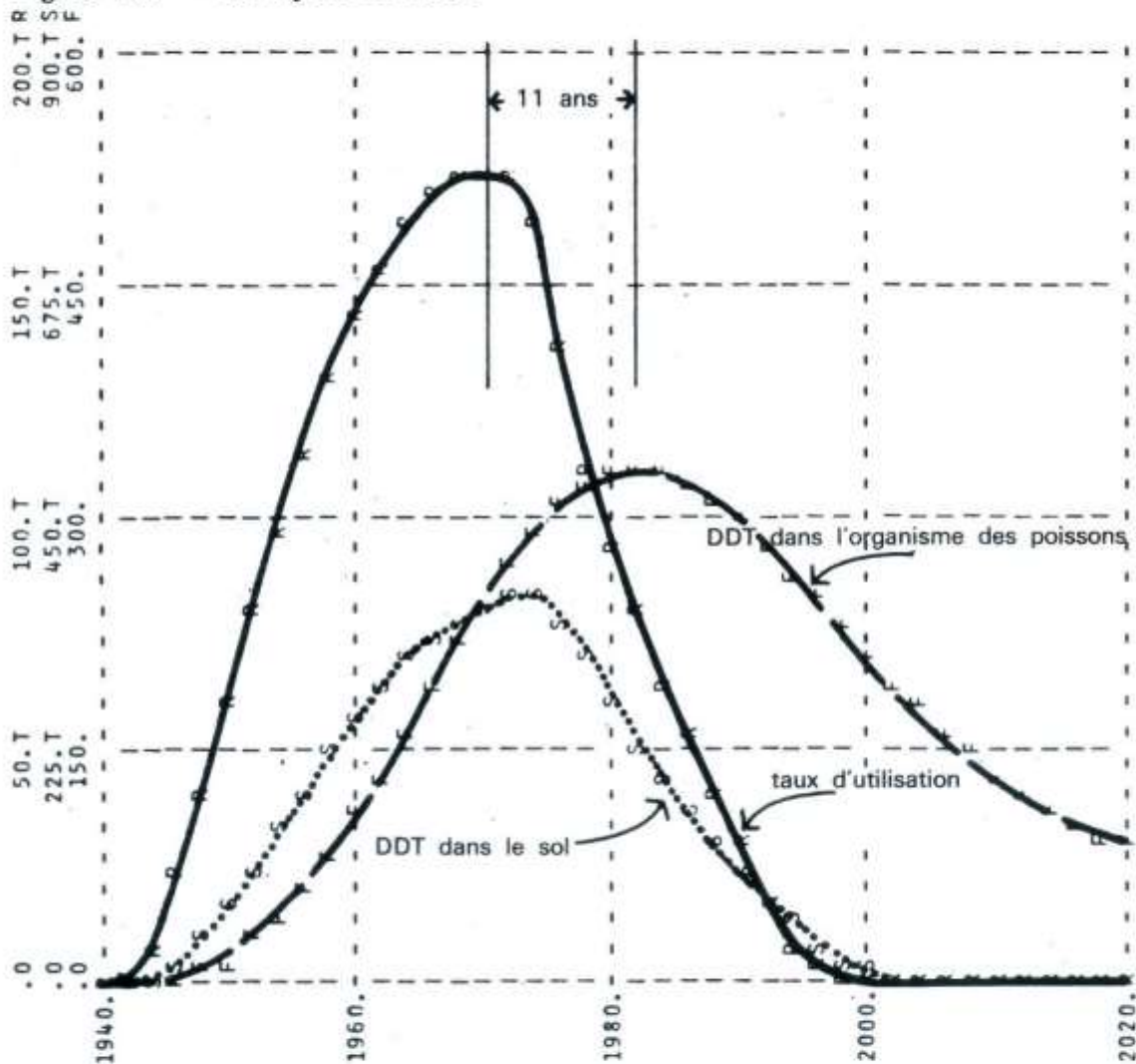
Le taux d'utilisation du DDT² est le taux mondial fourni par les statistiques entre 1940 et 1970. Le graphique montre ce qu'il advien-

1. L'étude de Jorgen Randers et Dennis L. Meadows sera publiée prochainement. Cf., *in fine*, « Notes bibliographiques ».

2. Introduit dans le modèle.

draît si, en 1970, la consommation de DDT avait atteint un maximum et commençait à décroître pour atteindre zéro en l'an 2000. Par suite de la longueur des temps de réponses, la teneur en DDT des poissons continuera à croître pendant 10 ans à partir de 1970 et ne redescendra pas en dessous du niveau de 1970 avant 1995, soit plus de 20 ans après qu'aura été prise la décision d'en limiter l'usage.

Figure 18. — Le cycle du DDT



Supposons que l'on cesse progressivement d'utiliser le DDT à partir de 1970. La quantité de DDT dans le sol va encore croître légèrement puis passer par un maximum et décroître à un rythme voisin de la consommation. Mais la teneur en DDT de l'organisme des poissons va encore croître pendant 11 ans et il faudra atteindre 25 ans avant qu'elle ne retombe au niveau de 1970. Les effets du DDT sur les ichthyophages (oiseaux, mammifères marins, hommes) peuvent se prolonger encore plus longtemps.

SOURCE : Jorgen Randers and Dennis L. Meadows, « System Simulation to Test Environmental Policy I: A Sample Study of DDT Movement in the Environment » (Cambridge, Mass. : Massachusetts Institute of Technology, 1971).

Chaque fois qu'il existe un long délai entre l'instant où un polluant est libéré et celui où des effets nocifs se manifestent, nous savons qu'il existera un délai du même ordre entre l'instant où l'on commence à réduire son taux d'émission et celui où ses conséquences dangereuses commenceront à s'atténuer. En d'autres termes, tout système de contrôle de la pollution à partir de l'instant où les effets nocifs apparaissent ne pourra empêcher que la situation n'aille en s'aggravant jusqu'à un paroxysme avant que nous ne puissions espérer une amélioration. Ces systèmes de contrôle sont difficiles à mettre en œuvre, car ils impliquent des mesures immédiates en prévision de nuisances à venir.

Répartition de la pollution dans le monde

Aujourd'hui la pollution ne concerne sérieusement que les pays industrialisés. Toutefois, bien des types de polluants se trouvent largement répartis dans le monde entier.

Tableau 5

Teneur en DDT des lipides humains

Population	Année	Nombre de cas examinés	Concentration en DDT et produits de dissociation toxiques (parties par millions)
Alaska (esquimaux)	1960	20	3,0
Canada	1959-60	62	4,9
Angleterre	1961-62	131	2,2
»	1964	100	3,9
France	1961	10	5,2
Allemagne	1958-59	60	2,3
Hongrie	1960	48	12,4
Inde (Delhi)	1964	67	26,0
Israël	1963-64	254	19,2
États-Unis (Kentucky)	1942	10	0
États-Unis (Georgie, Kentucky, Arizona, Washington)	1961-62	130	12,7
États-Unis (toutes régions)	1964	64	7,6

Bien que le Groenland se situe loin de toute source de pollution atmosphérique, les dépôts de plomb dans les glaces de ce pays ont augmenté de 300 % par an depuis 1940.

Le DDT s'est déposé dans les graisses de l'organisme humain en tous points du globe, chez les esquimaux de l'Alaska comme chez les habitants de New Delhi (voir tableau 5).

Les limites de la pollution

La pollution étant une fonction complexe de la population, de l'industrialisation et de développements technologiques particuliers, il est difficile d'évaluer avec précision comment va évoluer la courbe exponentielle globale de la pollution. Nous pouvons supposer que, si les 7 milliards d'hommes de l'an 2000 ont un P.N.B. par tête aussi élevé que celui des Américains de 1970, les contraintes imposées à l'environnement par la pollution seront dix fois plus élevées qu'aujourd'hui. La terre peut-elle supporter une charge de cet ordre? Nous n'en avons aucune idée. Certains pensent que l'homme a déjà tellement dégradé la nature que des dommages irréparables ont été causés sur une très large échelle aux systèmes naturels. Nous ne connaissons pas la limite extrême d'absorption par la terre d'un type donné de polluant ni, *a fortiori*, la capacité extrême d'absorption d'une combinaison de tous les polluants. Nous pouvons cependant affirmer qu'une telle limite *existe* et qu'elle a déjà été dépassée en certains points précis. Le meilleur moyen d'atteindre globalement cette limite c'est de laisser se poursuivre simultanément et l'expansion démographique et les activités polluantes de chaque individu.

Les compromis qu'il faudra trouver en matière d'environnement seront en tout point aussi délicats à résoudre qu'en matière d'agriculture et de production industrielle. Les bénéfices immédiats que l'on tire d'activités polluantes font remettre à bien loin dans l'espace et dans le temps le prix dont on devra payer les effets nocifs de la pollution. Pour prendre des décisions équitables, il faut considérer à la fois le facteur espace et le facteur temps. Si les déchets sont déversés en amont, qui en souffrira en aval? Si des fongicides à base de mercure sont utilisés aujourd'hui, dans quelle proportion, où et quand ce mercure apparaîtra-t-il dans la chair des poissons de mer? Si les usines polluantes sont situées dans des régions éloignées de

manière à « isoler » les polluants, où seront ces substances nocives dans dix ou vingt ans ?

Il se peut que des progrès techniques permettent le développement des industries tout en limitant la pollution, mais seulement à un prix très élevé. Le Conseil de l'Environnement (du gouvernement des États-Unis) a demandé un crédit de 105 milliards de dollars pour la période 1971-1975 (dont 42 % seraient à la charge des industriels) afin de procéder à un nettoyage *partiel* de l'air, de l'eau et à un traitement des déchets solides [25]. N'importe quelle nation peut remettre à demain le paiement de telles sommes qu'elle préfère investir en vue d'accroître son potentiel industriel, mais choisissant cette solution, elle doit savoir qu'elle le fait au détriment de l'environnement de demain et ne pourra alors tenter de redresser la situation qu'en consentant des sacrifices bien plus grands.

Un monde aux possibilités limitées

Nous avons, au cours de ce chapitre, mis en évidence des tendances contradictoires nécessitant de difficiles compromis dans différents domaines : production de produits alimentaires, consommation des ressources, pollution et antipollution. Il devient maintenant évident que toutes ces contradictions résultent d'une cause unique : la terre a des possibilités limitées.

Plus une activité humaine approche de la limite supportable par le milieu naturel, plus les incompatibilités apparaissent clairement et plus les problèmes deviennent insolubles. Lorsqu'il y a pléthore de terres arables, la population peut augmenter et il y aura davantage de nourriture pour chacun. Lorsque toutes les terres sont déjà utilisées, il faut choisir entre un accroissement de la population et un accroissement de la ration alimentaire. Il ne peut pas y avoir les deux à la fois.

En général, les sociétés modernes n'ont pas appris à connaître ces lois et à résoudre ces dilemmes. Il apparaît qu'actuellement le monde se soit donné pour objectif d'accroître la population et le niveau de vie matériel de chaque individu (nourriture, biens de consommation, air pur et eau fraîche). Nous avons fait remarquer dans ce même chapitre que si les sociétés continuent à poursuivre cet objectif, elles ne manqueront pas d'atteindre l'une ou l'autre des nombreuses limites critiques inhérentes à notre écosystème.

Comme nous le verrons dans le prochain chapitre, il est impossible de dire avec exactitude laquelle de ces limites sera la première atteinte, ni quelles en seront les conséquences, car on peut concevoir des réactions humaines à de telles situations, mais non les prévoir.

Il est cependant possible de rechercher quelles conditions et quelles modifications du système mondial pourraient nous amener soit à nous heurter, soit à nous adapter aux limites de la croissance dans un monde fini.

3.

Les phénomènes de croissance à l'intérieur du modèle global

Nous avons analysé séparément les produits alimentaires, les ressources non renouvelables et la résorption de la pollution en tant que facteurs indispensables à la croissance mais aussi au simple maintien, à leurs niveaux actuels, de la population et de la production. Nous avons estimé le taux de croissance des besoins pour chacun de ces facteurs ainsi que les bornes supérieures des ressources possibles. En extrapolant les courbes, nous avons évalué grossièrement le temps pendant lequel la croissance pourrait continuer à son rythme actuel. Pour toute personne sensée, la conclusion s'impose : considérant les temps de doublement relativement courts de nombreuses activités humaines, ainsi que les quantités immenses mises en jeu, on arrivera aux limites extrêmes de la croissance de ces activités en un temps étonnamment court.

Cette méthode d'extrapolation des tendances actuelles est une méthode classique de prévision valable pour le futur proche et dans la mesure où la grandeur en question ne risque pas d'être influencée par les tendances se produisant ailleurs dans le système. Or il est

clair qu'aucun des cinq facteurs étudiés n'est indépendant. Les interactions entre l'un quelconque de ces facteurs et les quatre autres sont permanentes. Ainsi : la population plafonne si la nourriture manque, augmenter la production de denrées alimentaires demande des investissements, la croissance des investissements implique l'utilisation de ressources naturelles, l'utilisation de ces ressources engendre des déchets polluants et la pollution interfère à la fois avec l'expansion démographique et la production alimentaire.

De plus, à long terme, chacun de ces facteurs réagit sur lui-même, par exemple le taux de croissance de la production de denrées alimentaires pendant notre décennie (1970) jouera sur la taille de la population de la prochaine décennie (1980) qui, à son tour, déterminera le taux d'accroissement de la production alimentaire ultérieure. De même, le taux d'utilisation des ressources naturelles des prochaines années aura une influence, et sur le montant des investissements nécessaires à la production, et sur le volume des ressources laissées en réserve. Les disponibilités en capitaux et en matières premières s'influenceront et conditionneront pour le futur les besoins et les disponibilités de ressources naturelles.

Les cinq grandeurs fondamentales (dites « niveaux » dans le modèle global) : population, investissements, nourriture, ressources naturelles non renouvelables et pollution, sont liées les unes aux autres par un réseau de relations et de boucles qui n'ont pas encore été évoquées. Or on ne peut envisager, à long terme, l'évolution de chacun de ces niveaux, sans tenir compte de l'évolution des autres. Ce système relativement simple dans son principe a, cependant, une structure si complexe pour que l'intuition est impuissante à concevoir son comportement futur, non plus que l'incidence finale de toute variation de l'une quelconque des variables sur les autres.

Nous allons décrire, dans ce chapitre, le schéma du modèle utilisé, comme première étape pour aborder l'étude de ce système dynamique et complexe. Ce modèle n'est pour l'instant qu'une tentative de regroupement de la masse de données connues sur les relations de cause à effet entre les cinq niveaux ci-dessus mentionnés, de traduction de ces connaissances sous forme de boucles et de relations entre toutes ces quantités. Étant donné l'importance du modèle global lui-même pour la compréhension des causes et des limites de la croissance dans un système dynamique global, nous allons expliquer, avec quelque détail, comment nous l'avons construit.

En voici les quatre étapes essentielles. Nous avons :

1. Établi la liste des relations causales fondamentales entre les cinq niveaux et construit la structure des boucles correspondantes, à l'aide d'une abondante bibliographie et des avis de spécialistes (démographie, économie, diététique, géologie, écologie, etc.). Notre premier objectif était de trouver la structure la plus simple qui refléterait les interactions essentielles entre chacun des cinq niveaux, un affinement de cette structure de base, tenant compte de connaissances complémentaires plus détaillées pouvant être effectué ultérieurement, une fois compris les fondements du système.

2. Quantifié chaque relation aussi précisément que possible, en utilisant les données globales disponibles ou, à défaut, des données locales caractéristiques et statistiquement valables.

3. Avec l'ordinateur, calculé l'évolution, en fonction du temps, de toutes les interactions, et vérifié l'influence des modifications des valeurs numériques de chaque paramètre fondamental de manière à dégager les éléments déterminants dans le comportement du système.

4. Et, finalement, vérifié l'influence sur le système global des différentes politiques auxquelles on a couramment recours pour affirmer ou modifier le comportement du système.

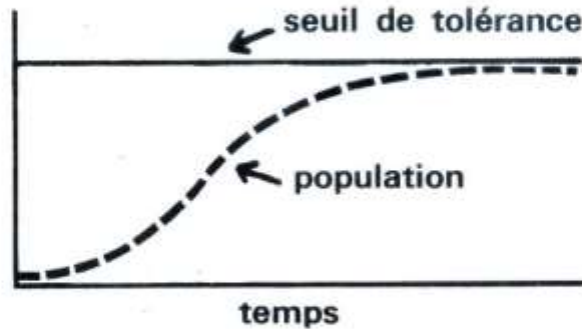
Ce modèle global n'est pas intangible, au contraire; c'est une entité en évolution, constamment remise en question au fur et à mesure que notre compréhension des problèmes se fait plus exhaustive.

Nous donnons, ci-après, un résumé synthétique du modèle actuel, de son objet, de ses limites et de la procédure utilisée pour quantifier les relations causales.

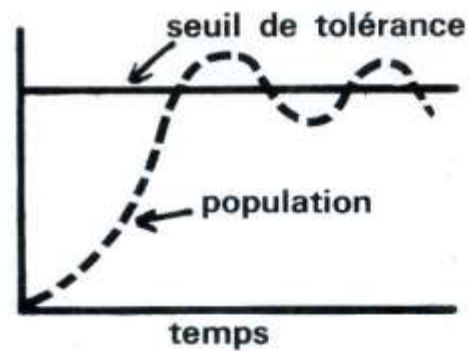
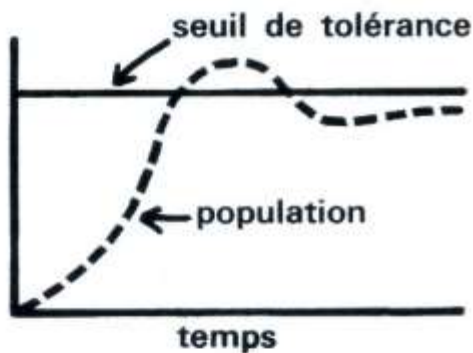
Objet du modèle global

Dans ce premier modèle global, nous nous sommes intéressés uniquement aux modes généraux de comportement du système population-investissements. Par *modes de comportement*, nous entendons les tendances aux variations des niveaux (population, pollution, par ex.) en fonction du temps. Une fonction peut croître, décroître, demeurer constante, « osciller » ou présenter successivement plusieurs de ces diverses caractéristiques. Par exemple, une population croissant dans un environnement limité peut tendre vers le seuil d'intolérance de cet environnement de diverses manières :

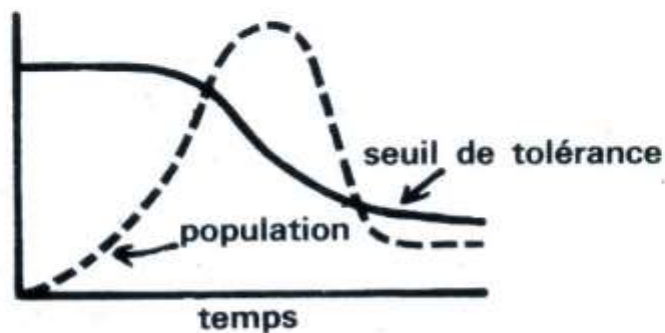
Elle peut aller doucement vers un état d'équilibre légèrement en dessous du seuil de tolérance par une réduction progressive de son taux d'accroissement comme indiqué ci-dessous : Elle peut dépasser



ce seuil et décroître ensuite, soit pour trouver une stabilité relative au-dessous du seuil critique, soit pour osciller autour de ce seuil sans le modifier.



Elle peut, enfin, dépasser plus largement le seuil et décroître ensuite brutalement après avoir provoqué un abaissement notable de ce seuil critique, par suite de surconsommation de quelque ressource naturelle non renouvelable et de première nécessité (schéma ci-dessous).



C'est là un comportement que l'on observe dans bien des systèmes naturels : des colonies de daims ou de chèvres ne rencontrant plus d'ennemis naturels épuisent leur zone de pacage jusqu'à l'érosion des terres ou la destruction de la végétation [26].

L'un des buts poursuivis en construisant ce modèle était de déterminer lequel de ces modes de comportement (en supposant qu'il en existe un) était le plus caractéristique du système global lorsque l'on se rapproche des limites ultimes de la croissance.

Les graphiques reproduits ci-après font état de valeurs relatives à la population mondiale, aux investissements et à d'autres grandeurs pour un intervalle de temps dont l'origine se situe en 1900 et l'extrémité en 2100. Ces graphiques ne constituent, en aucun cas, des « prédictions » pour les valeurs des variables qui seront atteintes dans le futur en une année donnée. Ils fournissent uniquement des indications de tendances sur le comportement du système.

Les différences de degrés dans la précision des « prédictions » peuvent être illustrées par un exemple simple : si vous lancez une balle en l'air, vous pouvez prévoir avec certitude l'allure générale de la trajectoire : elle commencera par s'élever, sa vitesse diminuant, puis elle changera de direction et descendra en accélérant jusqu'à ce qu'elle touche le sol. Vous savez qu'elle ne continuera pas à monter indéfiniment; qu'elle ne sera pas transformée en satellite artificiel et qu'elle ne fera pas trois loopings avant de retomber. C'est en quelque sorte ce type de comportement élémentaire que nous cherchons à définir avec notre modèle global actuel. Si nous avions voulu prédire avec exactitude l'altitude maximale atteinte par la balle, les coordonnées exactes de son point de chute ainsi que la durée de sa trajectoire, il aurait fallu procéder à un calcul détaillé en introduisant des données complémentaires précises sur les dimensions et la masse de la balle, la vitesse et la direction du vent, la force avec laquelle elle a été lancée et l'angle initial de départ.

Si nous avions voulu prévoir, à un faible pourcentage près, la population de la terre en 1993, nous aurions eu besoin d'un modèle bien plus complexe que celui-ci, et il nous faudrait des informations plus nombreuses et plus précises que celles actuellement disponibles.

Nous limitant aux modes généraux de comportement, ce premier modèle n'a pas besoin d'être très détaillé. Nous ne considérons qu'une population globale aussi représentative que possible. Nous n'intro-

duisons qu'une classe de polluants — caractérisés par une durée de vie élevée, une large répartition dans toutes les parties du monde (plomb, mercure, amiante, pesticides stables et radio-isotopes), dont nous commençons en fait à comprendre le comportement dynamique dans notre écosystème. Nous utilisons une notion de ressource généralisée qui représente la combinaison des réserves de toutes les ressources naturelles non renouvelables, bien que nous sachions que chacune de ces ressources s'adapte séparément au schéma dynamique général avec ses caractéristiques propres (niveau et taux d'utilisation).

Ce haut degré d'agrégation est, au stade actuel, indispensable pour que le modèle reste compréhensible. D'un autre côté bien sûr, il limite la portée des informations que nous pourrions en attendre. Il n'est pas possible de donner de réponse à des questions de détail tout simplement parce que le modèle ne contient pas de détails. Nous n'avons pas tenu compte des frontières nationales. Les inégalités de répartition des denrées alimentaires, matières premières et investissements, sont implicitement contenues dans les données, mais ne sont pas calculées explicitement ni représentées sur les graphiques. Les échanges commerciaux, les courants migratoires, les facteurs climatiques et les incidences politiques ne sont pas spécifiquement traités. D'autres modèles pourront être, et nous l'espérons seront, construits en vue de clarifier ces points très importants¹.

Qu'y a-t-il à apprendre d'un modèle aussi condensé?

Les résultats qu'il fournit ont-ils un sens? Si l'on veut parler de « prédictions » exactes, la réponse est évidemment négative. Nous ne vous dirons pas quels seront la population exacte des États-Unis, le P.N.B. du Brésil, ou la production globale de denrées alimentaires en l'an 2015. Même si nous souhaitons faire de telles prédictions, nous ne le pourrions pas faute de données suffisantes.

En revanche, et c'est pour le moment l'essentiel, il est vital de mieux comprendre les causes de la croissance dans la société humaine,

1. Nous avons nous-mêmes construit de nombreux sous-systèmes au cours de cette étude pour étudier en détail les phénomènes dynamiques concernant chaque secteur du modèle global. Une liste des études faites dans les différents domaines est donnée en bibliographie.

(N.D.T. : D'autres études sont en cours dans différents pays, notamment au Japon et à Genève. Ces études ont été évoquées dans la première partie de l'ouvrage.)

les contraintes qui la limitent, et le comportement de nos systèmes socio-économiques lorsque ces limites sont atteintes. A cet égard, nos connaissances actuelles sont très incomplètes. Qui peut dire aujourd'hui si la population humaine va continuer à croître, ou diminuer progressivement, ou osciller autour d'un maximum, ou simplement disparaître. Nous pensons que notre modèle global constitue une méthode d'approche de ces questions.

Les relations fondamentales entre les cinq grandes variables sont les mêmes quelle que soit la région du globe, quel que soit le type de société. En réalité, et nous l'avons déjà mentionné, considérer ces problèmes selon les plus larges perspectives dans l'espace et dans le temps présente des avantages. Les détails, les problèmes propres à chaque nation, les crises à court terme peuvent être mieux compris et mieux décelés quand on connaît le contexte général.

Le réseau structurel de boucles

Au chapitre 1, nous avons schématisé les boucles qui régissent l'accroissement de la population et celui des investissements. Nous reprenons ces deux boucles en les rassemblant (voir fig. 19).

Dans nos diagrammes tels que celui de la figure 19, les flèches indiquent simplement qu'une variable en modifie une autre. La *nature* et le *degré* de cette influence ne sont pas spécifiés ici (naturellement ils sont quantifiés dans les équations du modèle). Pour simplifier, nous avons souvent omis de spécifier dans les diagrammes le fait que certains types d'interactions se manifestent avec un certain retard. Ces retards sont explicitement introduits dans la programmation du modèle.

De nombreuses interactions se produisent entre la population et les investissements. La figure 20 en donne quelques exemples.

Une partie de la production industrielle est constituée par des matériels, matériaux ou produits utilisés à des fins agricoles : tracteurs, canaux ou conduites d'irrigation, par exemple. Le montant des capitaux investis dans l'agriculture et la superficie des terres cultivées ont une influence marquante sur la quantité de nourriture produite. Le quota alimentaire individuel (quotient de la masse globale de nourriture produite par le chiffre de la population) agit sur le taux de mortalité. Les activités industrielles et agricoles peuvent toutes deux être

Figure 19. — Boucles régissant la croissance de la population et du capital

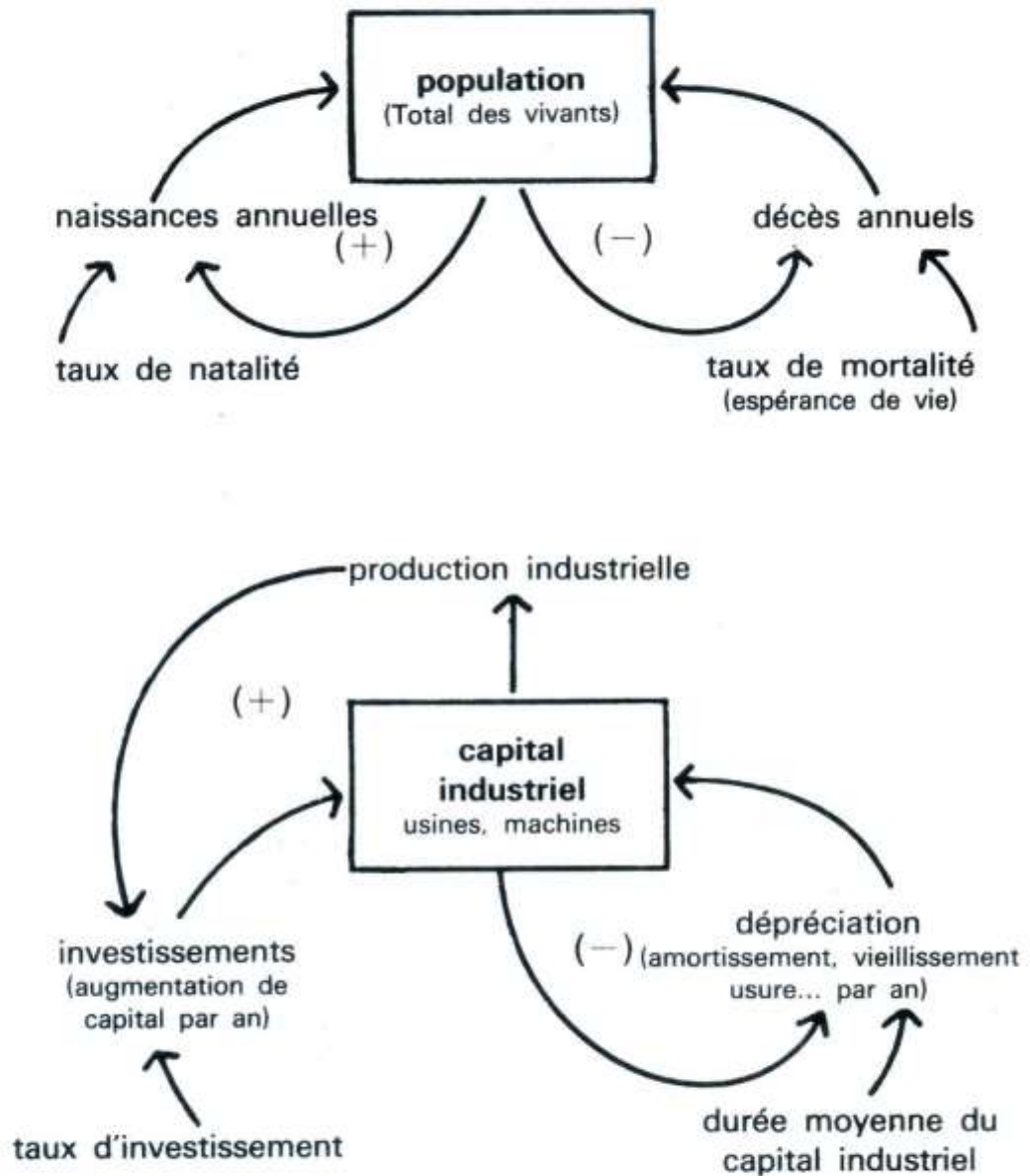
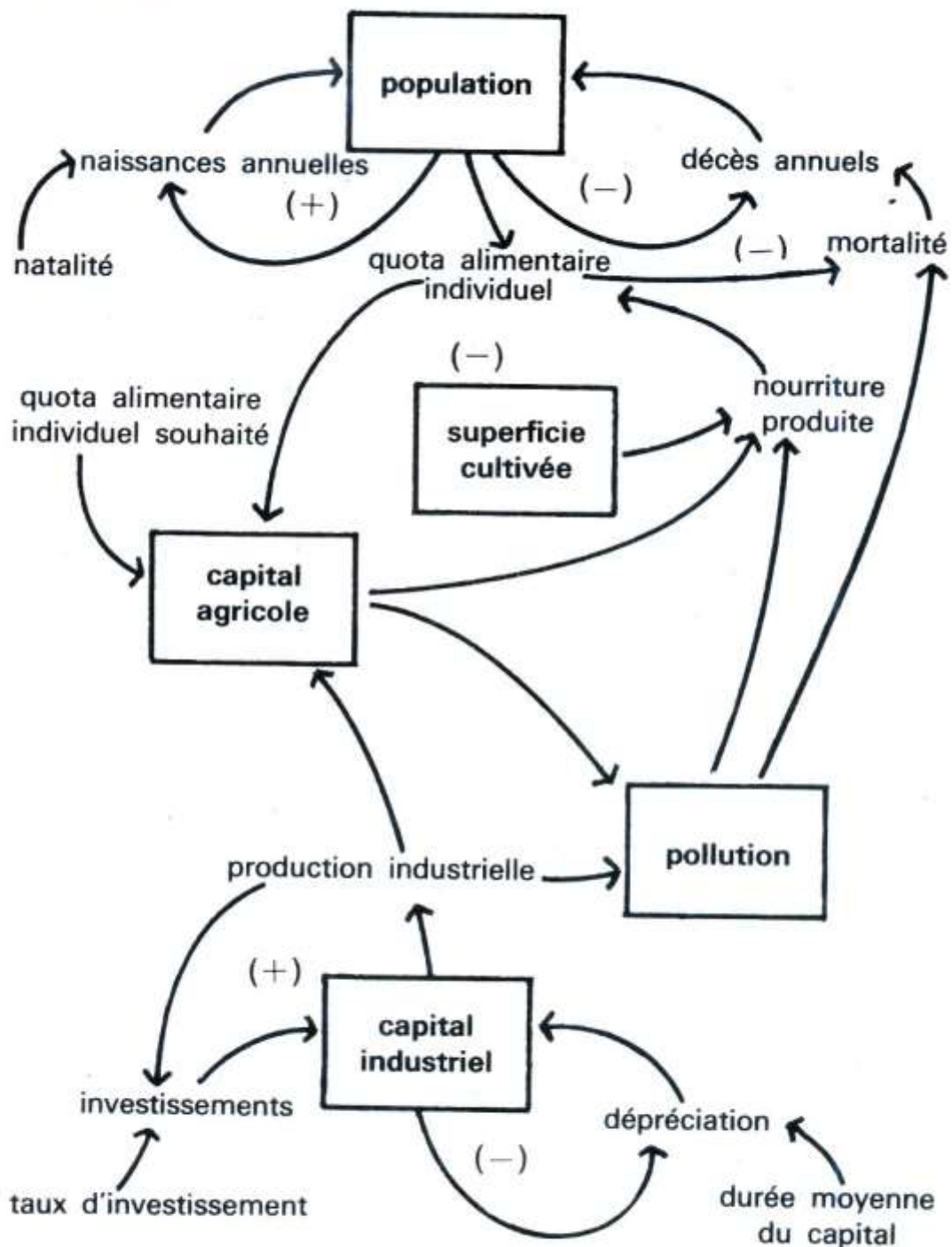


Schéma de principe de deux fonctions régies par des boucles à rétroaction : naissances et investissements sont respectivement à la base de la croissance exponentielle de la population et du capital. Décès et dépréciation viennent tempérer cette croissance. Les éléments accélérateurs et modérateurs sont eux-mêmes des fonctions de la grandeur principale et leur variation est, de plus, influencée par de nombreux autres facteurs intégrés dans d'autres secteurs de l'éco-système.

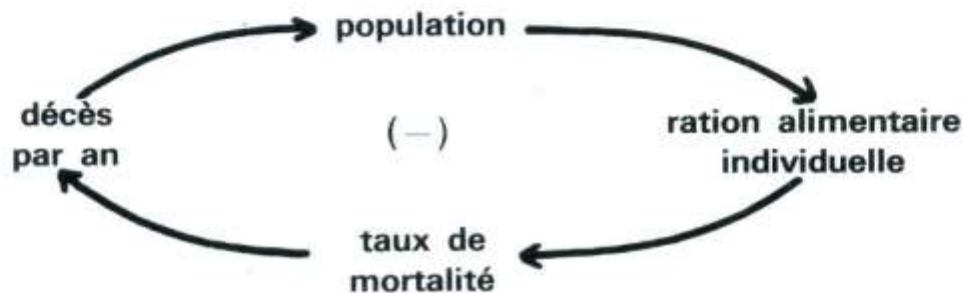
Figure 20. — Boucles régissant la population, le capital, la production agricole et la pollution



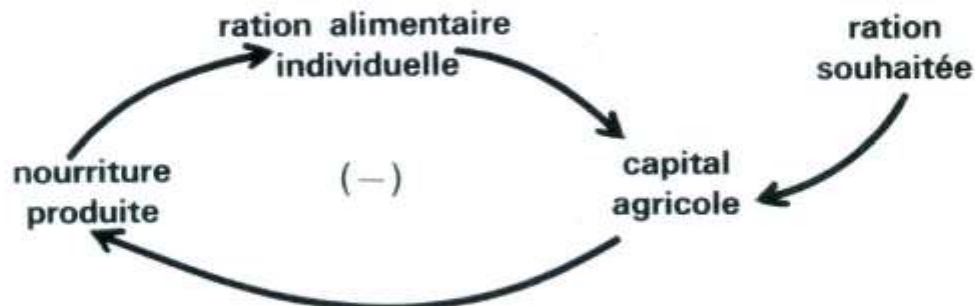
Les deux fonctions représentées figure 19 ont été intégrées dans une structure plus large. Quelques-uns des liens entre le capital industriel et la population sont établis par l'intermédiaire du capital agricole, de la superficie des terres cultivées et de la pollution. Les relations indiquées par les flèches sont soit immédiates, soit différées (temps de réponse d'un élément du système). Les incidences mutuelles peuvent être importantes ou faibles, positives ou négatives selon les hypothèses formulées au départ.

cause de pollution (dans le cas de l'agriculture, les polluants sont essentiellement les résidus des pesticides tels le DDT, les engrais et les dépôts salins résultant d'une irrigation inadéquate). La pollution peut avoir un effet direct sur la mortalité et aussi un effet indirect en ce sens qu'elle diminue la production agricole¹.

La figure 20 comporte plusieurs boucles importantes. Toutes choses égales par ailleurs, un *accroissement* de la population entraînerait une *diminution* de la ration alimentaire individuelle moyenne, un accroissement du taux de mortalité et, en valeur absolue, du nombre des décès à l'intérieur de cette population, et pourrait conduire à une *diminution* de la population. Cette boucle négative est schématisée ci-dessous :



Une autre boucle négative (ci-dessous) tend à contrebalancer les effets de la première. Si la ration individuelle *tombe en deçà* de la valeur souhaitée (ou admissible) par la population, on aura tendance à accroître la fraction² des investissements consacrés à l'agriculture,



1. Cette remarque a été formulée dans : « *Second Annual Report of the Council on Environmental Quality* », p. 105 (Second rapport du Conseil américain de l'Environnement).

2. N.D.T. : Par rapport au total des investissements.

de telle sorte que la production agricole et par suite la ration alimentaire individuelle pourront *croître*.

D'autres relations importantes sont évoquées par la figure 21.

La production industrielle comporte des produits qui viennent grossir les investissements du secteur tertiaire : des logements, des écoles, des hôpitaux, des banques et des équipements y afférents. La quote-part individuelle moyenne de ces investissements est la valeur des services par tête. Cette valeur influe sur le « niveau » des services de santé publique et par là même a une incidence sur le taux de mortalité à l'intérieur d'une population donnée. Ces « services » comprennent également l'éducation et la recherche de méthodes de régulation des naissances aussi bien que la diffusion d'informations sur la contraception et la distribution de contraceptifs. En ce sens, il existe un lien entre l'importance accordée à ces services et la fécondité de la population.

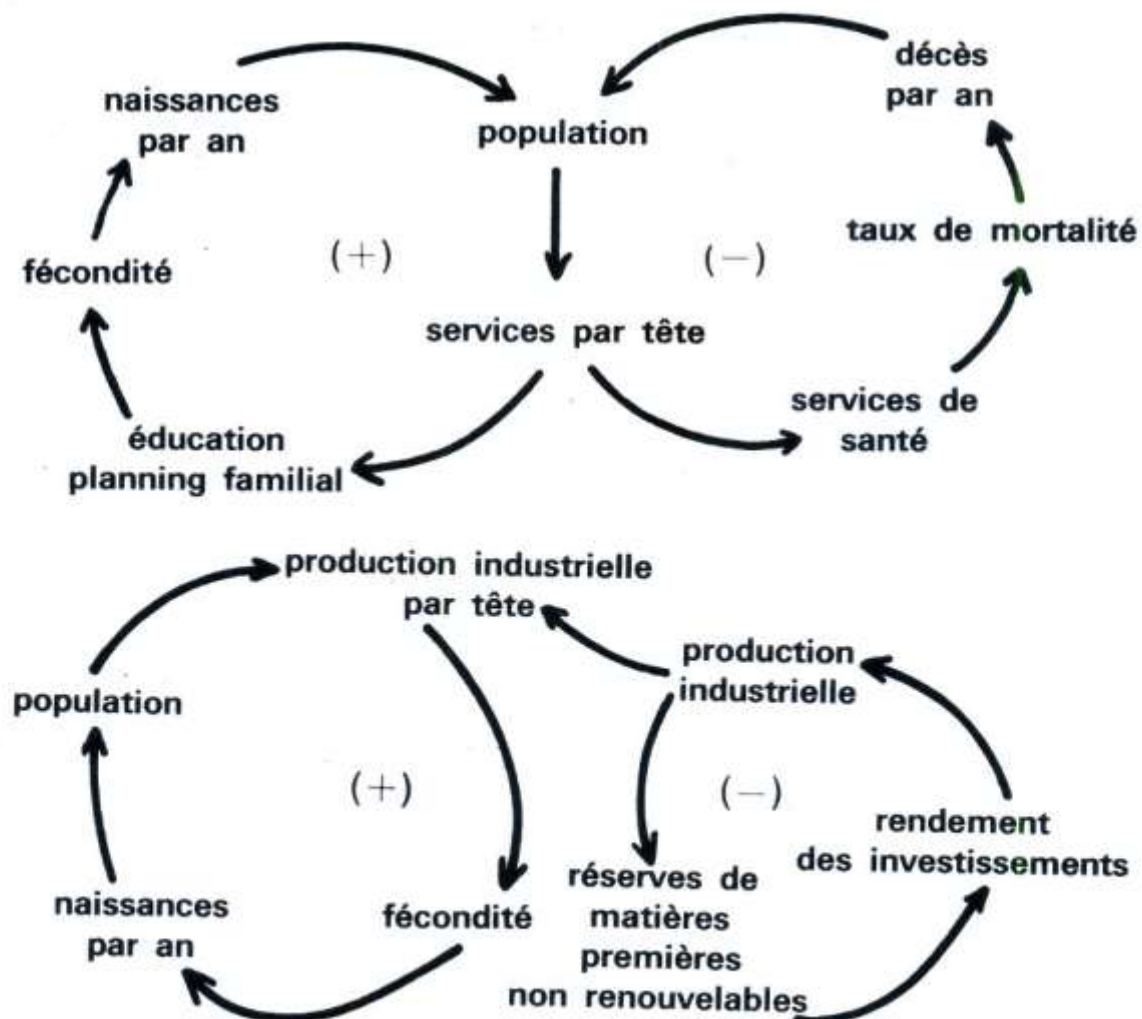
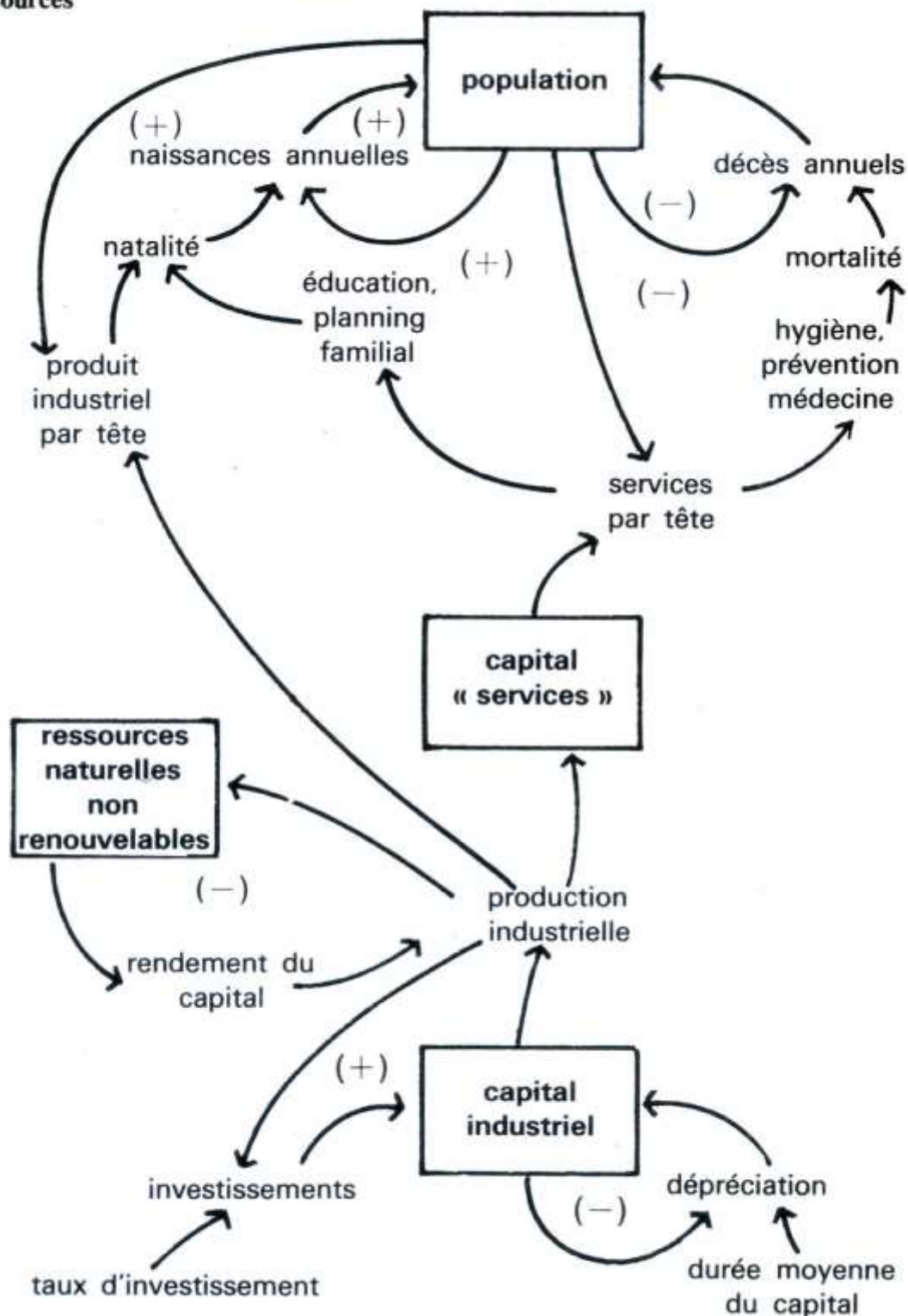


Figure 21. — Boucles régissant la population, le capital, les services et les ressources



Population et capital sont aussi liés au capital tertiaire non productif (ou capital « services » : éducation, santé) et aux réserves de ressources naturelles non renouvelables.

Toute modification de la valeur de l'indice de production industrielle par tête a un effet visible (quoique généralement différé) sur de nombreux facteurs sociaux qui à leur tour influent sur la fécondité.

La fabrication d'un produit quelconque consomme une certaine quantité de matières premières non renouvelables. A mesure que les réserves s'épuisent, il faut davantage de capital pour extraire de la terre la même quantité de ressources, et le rendement du capital investi décroît.

Les deux boucles importantes incorporées à la figure 21 sont explicitées ci-dessous.

Les relations indiquées aux figures 20 et 21 sont caractéristiques des nombreuses boucles du modèle global. D'autres boucles font intervenir des paramètres tels que les superficies de terres cultivées et les taux de développement ou d'érosion de ces terres le rythme auquel la pollution est engendrée ou neutralisée l'environnement, ou des données telles que le marché de l'emploi. Le diagramme complet du modèle global est donné figure 22.

Hypothèses quantifiées

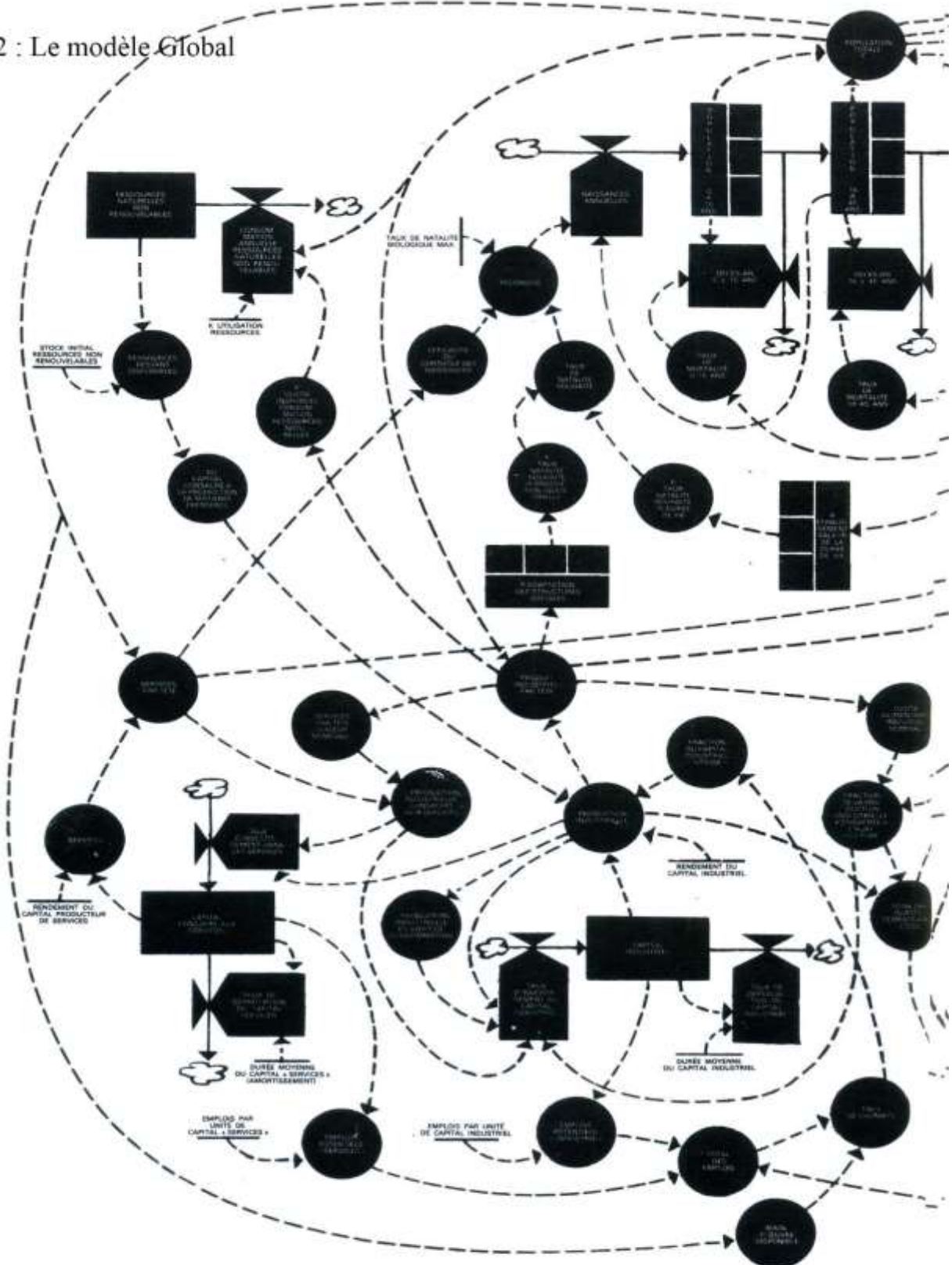
Chacune des flèches de la figure 22 représente une relation générale dont nous savons qu'elle est primordiale ou susceptible de le devenir à l'intérieur du système investissements-population. Cette structure a, en fait, un caractère suffisamment universel pour qu'elle puisse être utilisable pour une nation, voire une simple agglomération (cela sous réserve d'y introduire les paramètres locaux complémentaires : courants migratoires et commerciaux internationaux ou inter-régionaux).

La plupart des relations de cause à effet dans un monde réel ne sont pas linéaires : une modification donnée d'une variable causale (comme une augmentation de 10 % de la ration alimentaire moyenne de chaque individu) peut affecter une autre variable (l'espérance de vie par exemple) de manière différente, selon le point ou le moment où se produit le phénomène :

Supposons qu'un accroissement de 10 % en moyenne de la ration individuelle aboutisse à une élévation de 10 ans de l'espérance de vie : il ne faut pas en conclure qu'une augmentation de 20 % de cette ration pourrait nous faire espérer vivre 20 ans de plus ! La figure 23 montre la non-linéarité de cette relation. Si les rations sont faibles, l'effet

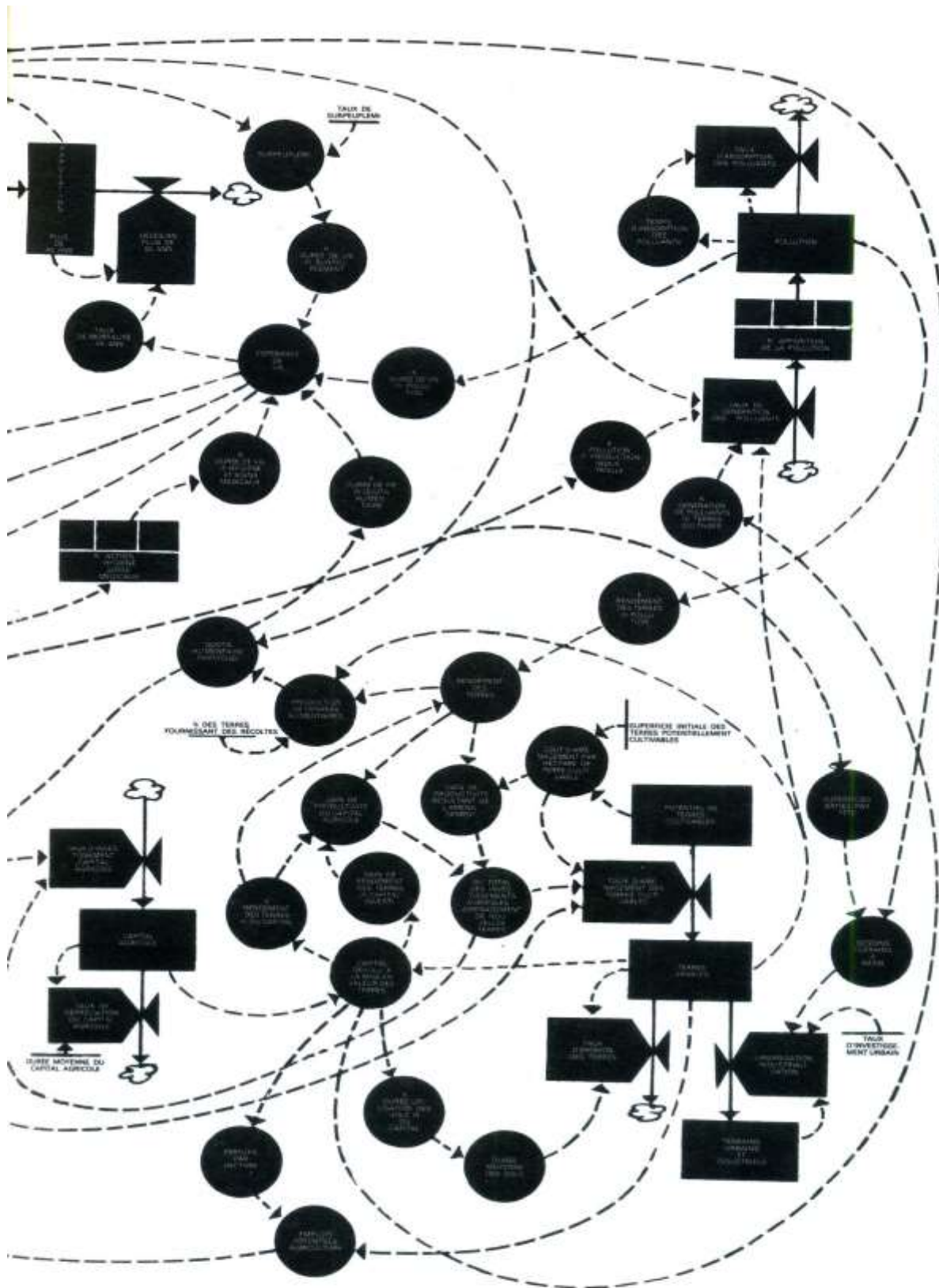
Fig 22 : Le modèle Global

212



L'éco-système global est représenté par un schéma utilisant la notation employée en dynamique des systèmes. Les « niveaux », c'est-à-dire les grandeurs physiques directement mesurables sont représentées par des rectangles . Les taux de variation de ces niveaux sont représentés par des vannes et les variables auxiliaires qui modifient ces taux de variation par des cercles .

Les temps de réponses ou délais sont schématisés par des coupures dans un rectangle. . Les mouvements réels de personnes, denrées, capitaux, etc., sont indiqués en traits pleins .



Les lignes pointillées $\dashrightarrow$ représentent les relations causales et les nuages  des sources ou des puits qui sont sans effet sur le comportement du système.

N.D.T. Le texte étant extrêmement touffu, nous avons utilisé trois symboles supplémentaires :

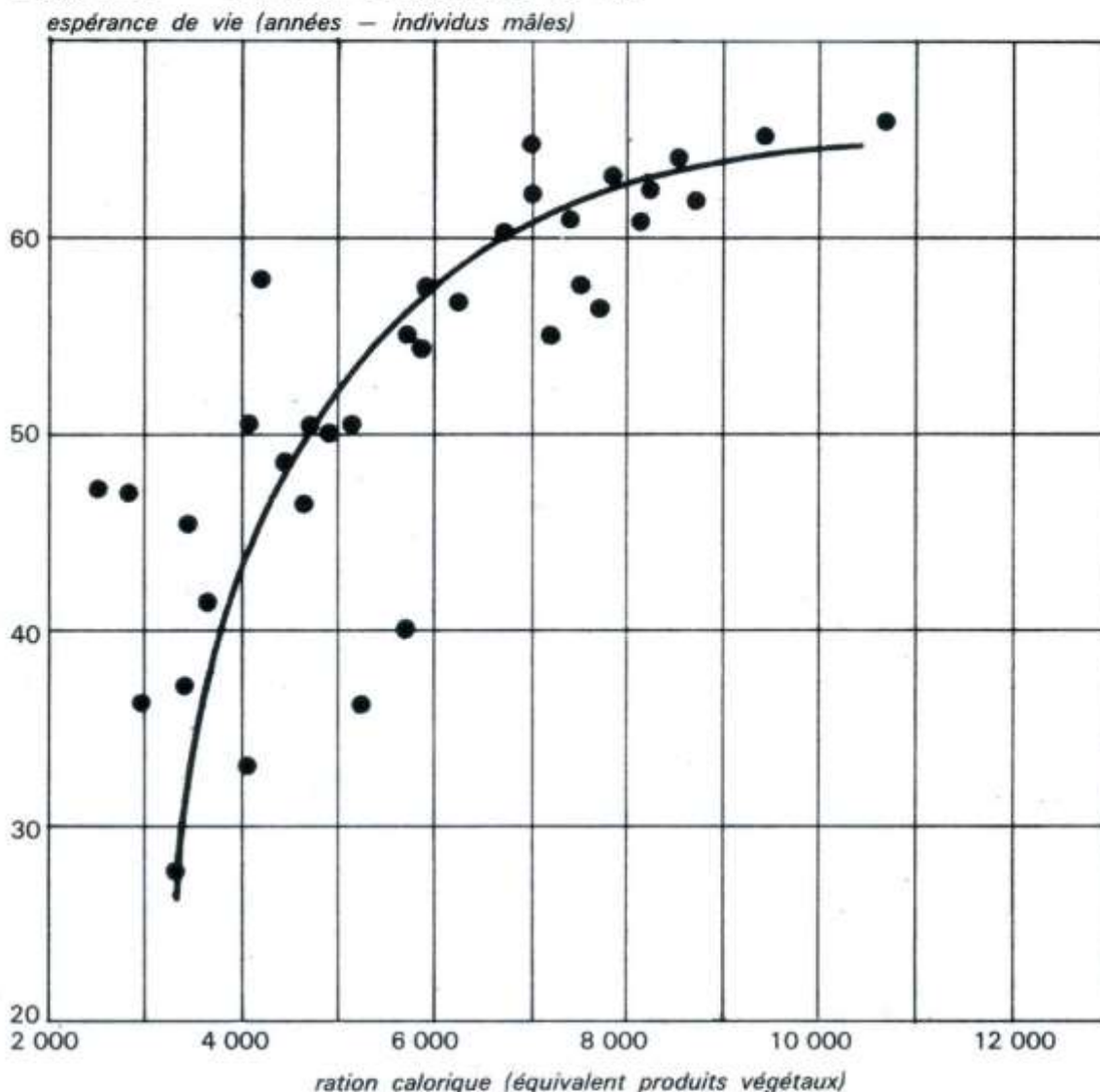
K : coefficient modifiant une grandeur ou une relation en fonction d'un autre élément du système.

L'élément ou la grandeur cause de la modification est précédée du symbole (f).

R signifie temps de réponse ou délai.

sera notable. Si elles sont suffisantes, toute augmentation n'aura que peu ou pas d'effet. Des relations non linéaires de ce type ont été directement incorporées dans le modèle global ¹.

Figure 23. — Nutrition et espérance de vie



L'espérance de vie est une fonction du niveau de nutrition (calories reçues). L'unité de mesure est la calorie d'origine végétale et on a admis que 1 calorie d'origine animale (viande, lait) valait 7 calories d'origine végétale. La statistique est valable pour une nation en 1953.

N.D.T. : On fera le rapprochement avec le graphique de la figure 5 du chapitre 2.

SOURCE : M. Cépède, F. Houtart, and L. Grond, *Population and Food* (New York : Sheed and Ward, 1964).

1. Les données de la figure 23 n'ont pas été corrigées pour les variations d'autres paramètres, tels que la prophylaxie. D'autres informations sur le traitement statistique de telles relations et leur incorporation dans les équations du modèle seront présentées dans le rapport technique.

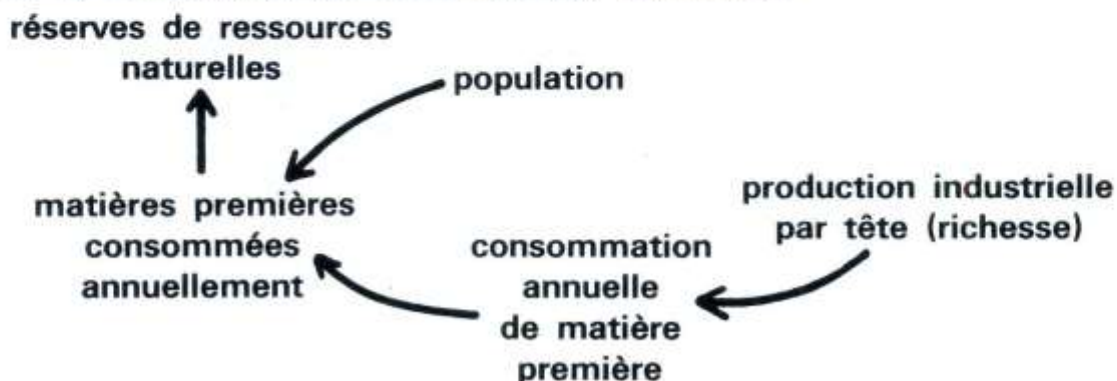
Notre connaissance des relations de cause à effet dans le monde varie de l'extrême certitude à la plus complète ignorance. Les relations présentées dans le modèle global tombent généralement dans le domaine de la probabilité médiane. Nous avons des vues sur la grandeur et de la direction des vecteurs de causalité, mais notre connaissance en est rarement précise.

Voici trois exemples, ils ne constituent en aucune manière une description complète du modèle global, mais ils illustrent les raisonnements suivis pour construire ce modèle et le quantifier dans ce climat d'incertitude relative.

Le premier établit une relation entre données économiques qui est relativement bien comprise. Le deuxième exemple met en jeu des variables psycho-sociologiques qui sont bien étudiées mais difficiles à quantifier. Le troisième est l'établissement d'une relation entre des données d'ordre biologique, qui sont à l'heure actuelle, presque totalement inconnues.

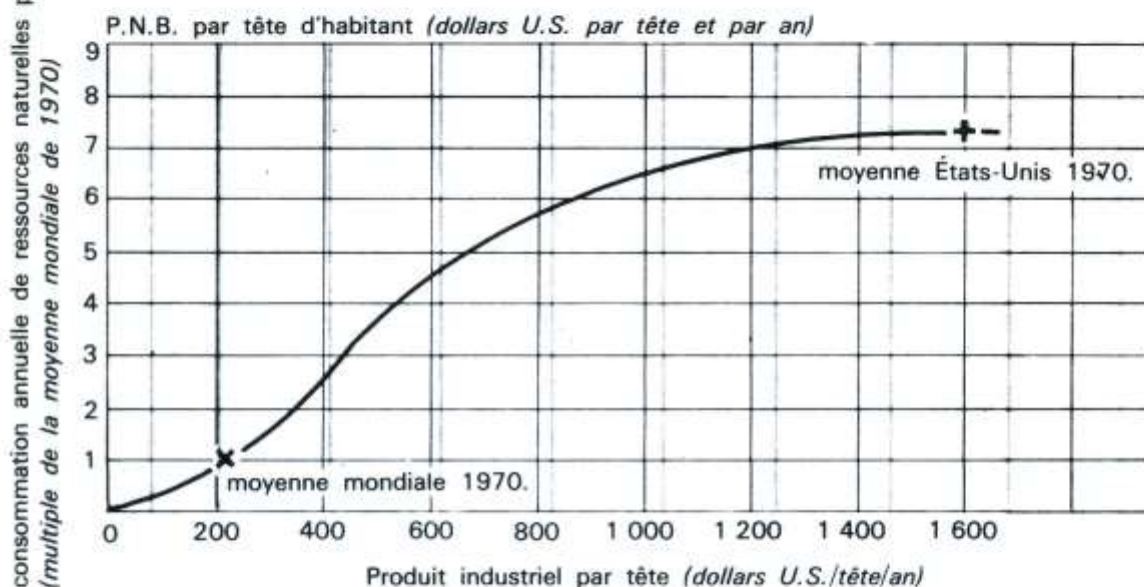
Consommation par tête de ressources naturelles

Comment évolue la demande de matières premières non renouvelables au fur et à mesure que croissent population et capacité de production? On peut trouver la quantité de ressources naturelles consommées chaque année en multipliant le chiffre de la population par la consommation moyenne de chaque individu. Cette consommation moyenne n'est naturellement pas une constante. Au fur et à mesure qu'une population s'enrichit, elle a tendance à consommer davantage par personne et par an. On trouvera ci-dessous le schéma exprimant la relation entre la population, la consommation individuelle annuelle, la richesse (exprimée par la production industrielle par tête) et la consommation de ressources naturelles.



La relation entre la richesse (production industrielle par tête) et la demande de matières premières (consommation par individu) est exprimée par une courbe non linéaire dont l'allure est définie par la figure 24. Sur cette figure 24, la consommation de ressources naturelles moyenne par tête est représentée en ordonnées avec pour unité la consommation moyenne mondiale en 1970. En abscisses se

Figure 24. — Production industrielle et consommation de ressources naturelles par tête



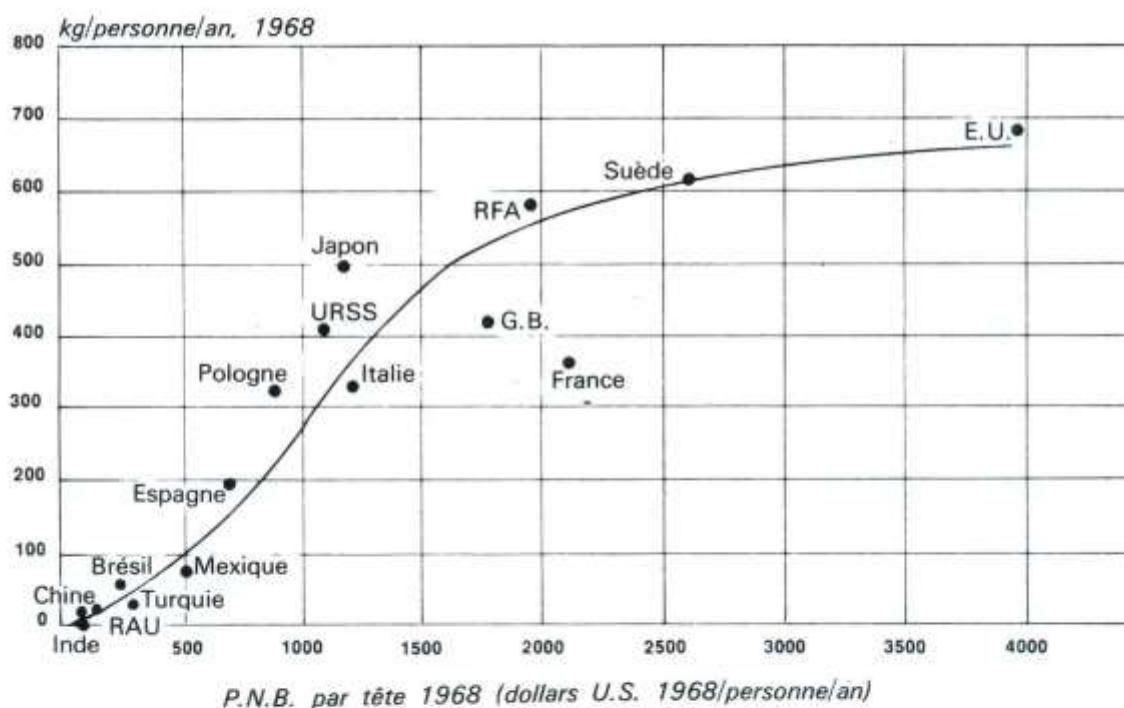
Dans les pays non industrialisés la consommation de ressources naturelles est faible (production essentiellement agricole). L'industrialisation entraîne rapidement une augmentation de la consommation suivie d'une montée plus lente lorsque le produit industriel par tête dépasse un certain seuil (ici 450 dollars par tête).

trouve « la richesse individuelle moyenne » qui est statistiquement la valeur du produit industriel brut par tête d'habitant. Cette valeur du produit industriel brut par tête est, à l'échelle mondiale, d'environ 230 dollars en 1970 [27]. Elle est notée par une croix (X) et constitue le point d'ordonnée 1. Aux États-Unis en 1970, la richesse individuelle moyenne est de l'ordre de 1 600 dollars et chaque citoyen des États-Unis consomme 7 fois plus que la moyenne mondiale [28]. Le point correspondant à la situation aux États-Unis est noté par le signe +.

Supposons que, dans le développement de son économie, le reste du monde suive une courbe analogue à celle qu'ont suivie les États-

Unis : une courbe s'élevant d'abord rapidement puis, après un point d'inflexion, tendant graduellement vers un palier. Nous voyons que cette hypothèse est vraisemblable sinon vraie car on retrouve une courbe du même type lorsque l'on étudie la consommation d'acier dans différents pays en fonction de la richesse individuelle moyenne (voir fig. 25). Si l'on constate sur la figure 25 quelques divergences par rapport à la figure 24, l'analogie entre les deux courbes reste frappante, même en tenant compte des différences de structures politiques et économiques entre les diverses nations.

Figure 25. — Consommation d'acier et P.N.B. par tête d'habitant

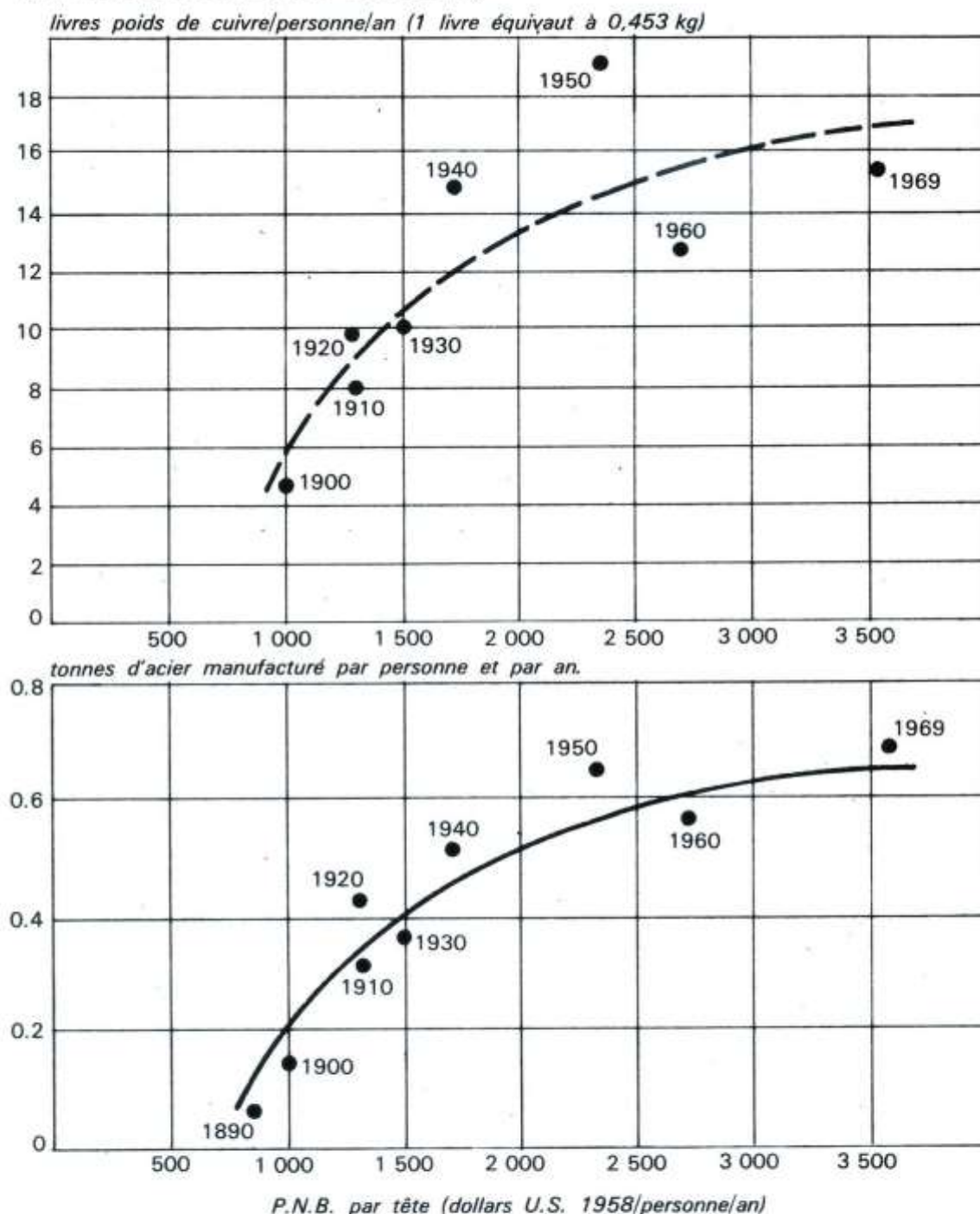


En 1968, la consommation d'acier par personne, dans différents pays, suit, dans son ensemble, une courbe en S analogue à celle de la figure 24.

SOURCES : Steel consumption from UN Department of Economic and Social Affairs, *Statistical Yearbook 1969* (New York : United Nations, 1970). GNP per capita from *World Bank Atlas* (Washington, DC : International Bank for Reconstruction and Development, 1970).

L'historique de la consommation de l'acier et du cuivre aux États-Unis tel qu'il est illustré figure 26 témoigne dans le même sens. Au

Figure 26. — Consommation de cuivre et d'acier en fonction du P.N.B.
(par tête d'habitant aux États-Unis)



La courbe moyenne est analogue à la seconde branche de la courbe en S des figures 24 et 25. [N.D.T. Les points les plus éloignés de la courbe correspondent à des périodes « de crise » (boom suivant la Première Guerre mondiale, récession des années 30, Seconde Guerre mondiale, guerre de Corée). La saturation des besoins se fait sentir à la partie la plus élevée de la courbe, malgré les opérations en Asie du Sud-Est.)]

SOURCES : Copper and steel consumption from *Metal Statistics* (Somerset, NJ : American Metal Market Company, 1970). Historical population and GNP from US Department of Commerce, *U.S. Economic Growth* (Washington, DC : Government Printing Office, 1969).

fur et à mesure que s'accroissait le revenu individuel moyen, la courbe de consommation s'élevait dans les deux cas, d'abord rapidement, puis plus lentement. Le palier final vers lequel tend la courbe signifie que l'Américain moyen a atteint (ou est sur le point d'atteindre) le seuil de saturation de biens matériels¹.

Les augmentations ultérieures de revenus seront de moins en moins consacrées aux biens de consommation de ce type, mais de plus en plus aux « services » lesquels consomment moins de ressources naturelles.

La courbe en S de la figure 24 n'a donc été introduite dans le modèle global que pour représenter les tendances apparentes qui se manifestent *actuellement*. Bien entendu cette courbe peut à tout moment être modifiée² pour vérifier les effets de tout changement de méthodes ou de politique (par exemple du recyclage des matières premières), effets qui conduiraient à une modification de la consommation individuelle de non renouvelables. Un certain nombre de passages en machine seront étudiés dans cet ouvrage pour illustrer les conséquences de diverses hypothèses de départ.

Taux de natalité souhaité

Le nombre des naissances annuelles est le produit du nombre de femmes fertiles par le taux moyen de fécondité (moyenne des naissances par femme et par an). De nombreux facteurs peuvent faire varier la fertilité d'une population et l'étude des déterminants de la fertilité est bien la préoccupation majeure de nombreux démographes. Dans notre modèle global, nous avons identifié trois composantes fondamentales de la fertilité : taux de natalité biologique maximum, efficacité du contrôle des naissances et taux de natalité

1. N.D.T. : Les auteurs n'ont pas spécifié la raison pour laquelle les courbes de la figure 26 n'étaient pas des courbes en S. On peut considérer qu'étant donné l'avance prise par les États-Unis en matière de développement industriel, les besoins élémentaires y étaient couverts bien avant qu'ils ne le soient ailleurs. La progression plus lente de la consommation correspond bien à la seconde partie de la courbe 25 : sur ce plan, l'Américain de 1910 se situe pratiquement au même niveau que l'Italien de 1968.

2. N.D.T. : Dans le cadre du programme de simulation.

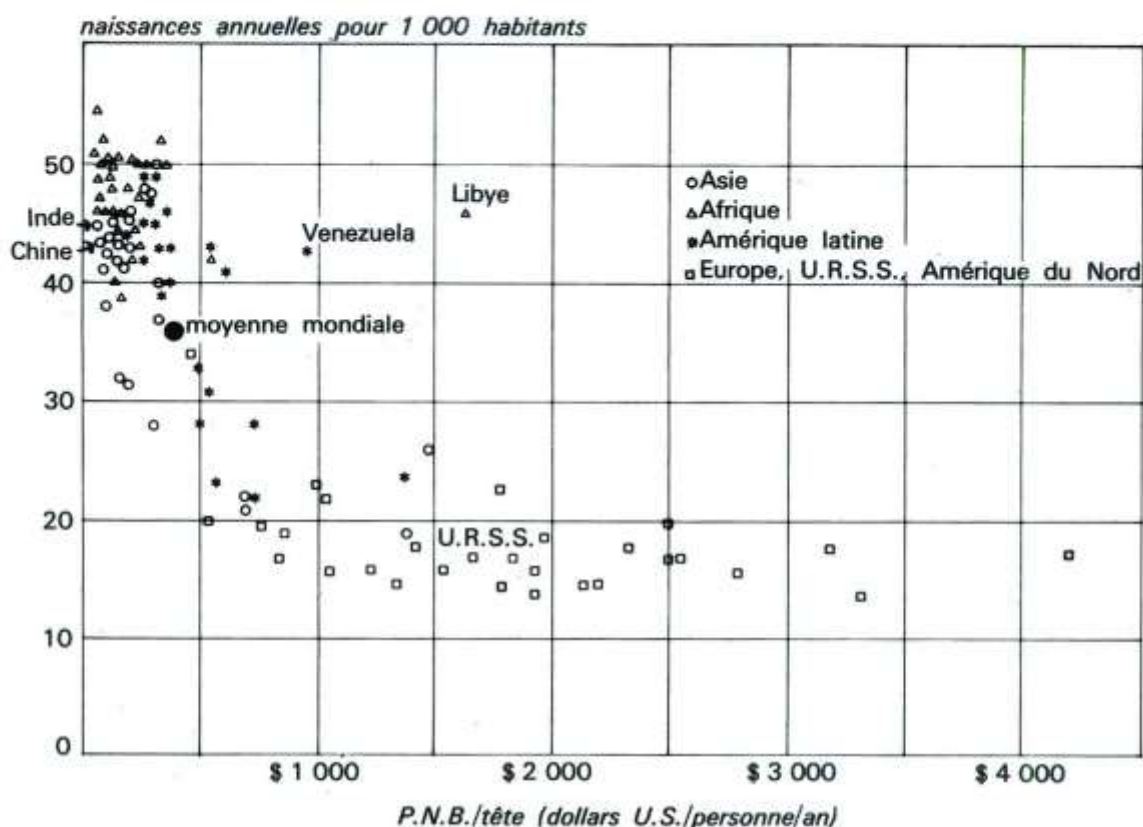
souhaité. La relation entre ces composantes et la fertilité d'une population est donnée par le schéma ci-dessous :



Le taux de natalité biologique maximal est le rythme auquel les femmes enfanteraient si durant toute leur période de fertilité elles ne recouraient à aucune pratique contraceptive. Ce taux est biologiquement déterminé et essentiellement fonction de l'état de santé général de la population considérée. *Le taux de natalité souhaité* est celui qui serait obtenu si une *régulation parfaite* des naissances pouvait être pratiquée et n'étaient mis au monde que les seuls enfants prévus et voulus. *L'efficacité de la régulation des naissances* mesure la proportion dans laquelle une population réalise le compromis entre le taux de natalité biologique maximal et le taux de natalité souhaité. Le terme « régulation des naissances » est pris dans un sens très large : il implique toutes les mesures effectivement pratiquées (contraception, avortement et continence). On doit préciser qu'une régulation des naissances parfaitement efficace *ne signifie pas* obligatoirement un taux de natalité très bas. On peut le faire varier en fonction des besoins et aboutir à une très forte natalité si cela se révèle nécessaire.

Ces trois facteurs régissant la fertilité sont à leur tour influencés par d'autres facteurs du modèle global (deux d'entre eux sont déjà indiqués dans le schéma ci-dessus). La figure 27 tend à prouver que l'industrialisation serait l'un des plus importants de ceux-ci.

Figure 27. — Taux de natalité et P.N.B. par tête



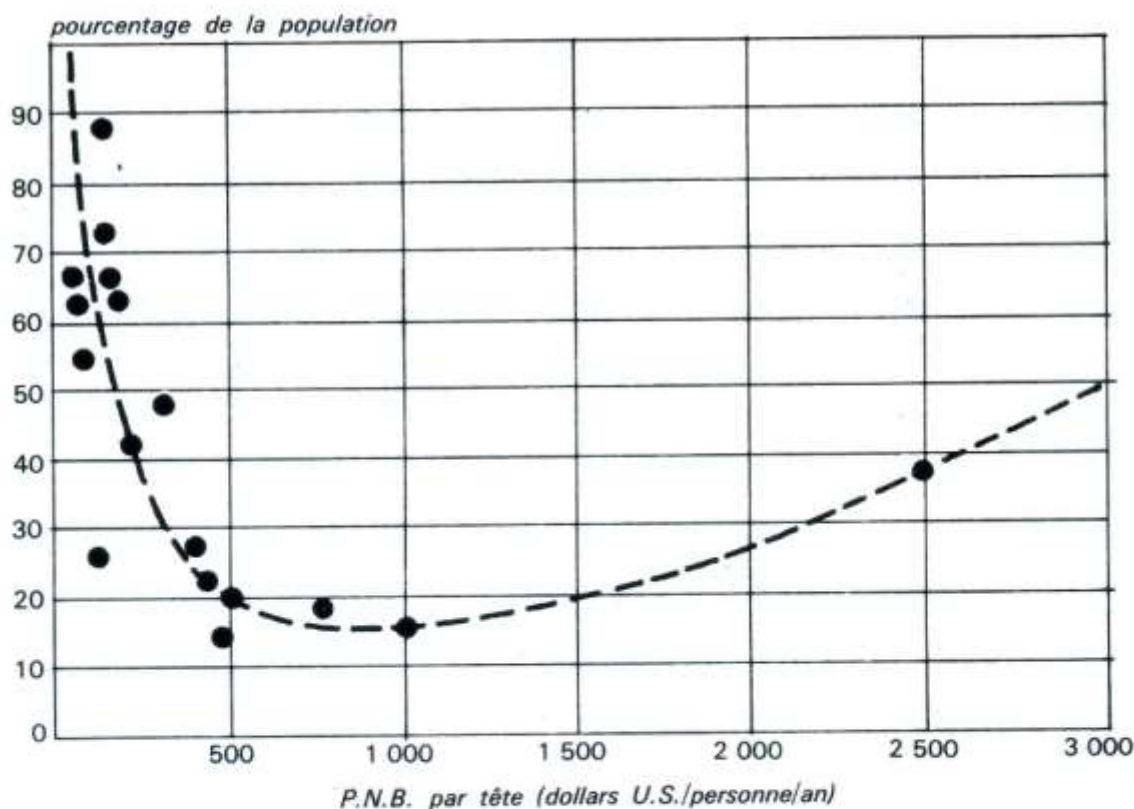
La relation entre les taux de natalité bruts et le P.N.B. par tête de toutes les nations du monde se présente sous forme d'une distribution étonnamment régulière. En général, lorsque le P.N.B. croît, le taux de natalité baisse. Ceci semble se vérifier en dépit des différences religieuses, culturelles et politiques. Le taux moyen mondial est de 36 ‰ et correspond à un P.N.B. par tête de 400 dollars. Dans la majorité des nations d'Asie et d'Afrique, ce taux est supérieur à 40 et dans les pays fortement industrialisés (Europe, U.R.S.S. et Amérique du Nord) il est généralement compris entre 12 et 20 ‰. Deux exceptions notables cependant : le Venezuela et la Libye qui se situent nettement au-dessus de la courbe moyenne. Il s'agit là de

pays producteurs de pétrole où l'élévation du niveau de vie (globale et très inégalement distribuée) est trop récente pour que les mécanismes régulateurs aient eu le temps de jouer.

La relation mise en évidence par la figure 27 ne doit cependant pas nous amener à conclure qu'il existe une relation directe entre une augmentation du P.N.B. par tête et le taux de natalité. Cette augmentation provoque certains changements, dans les structures sociales, les modes et méthodes d'éducation; ces changements apparemment liés à l'industrialisation entraînent une diminution de la natalité, mais leur influence ne se manifeste qu'au bout d'un temps assez long.

Où retrouve-t-on dans le réseau de boucles cette relation inverse

Figure 28. — Relation entre le P.N.B. par tête et le pourcentage de la population souhaitant des familles de plus de quatre enfants



Remarquer l'analogie entre les premières portions des courbes des figures 27 et 28 (P.N.B. inférieur à 1 500 dollars). La légère discordance entre les parties des courbes correspondant à des valeurs supérieures à 1 500 dollars s'explique en partie par le « temps de réponse » inhérent au système de la population.

SOURCE : Bernard Berelson et al., *Family Planning and Population Programs* (Chicago : University of Chicago Press, 1965).

entre le taux de natalité et le P.N.B. par tête? De toute évidence l'accroissement de la richesse impliquant une meilleure santé pour l'ensemble de la population, le taux de natalité biologique ne peut que croître lorsque le P.N.B. par tête augmente. Mais une meilleure éducation accroît l'efficacité du contrôle des naissances ce qui, dans une certaine mesure, contribue au déclin du taux de natalité tel qu'on le voit sur la figure 27. Nous croyons que l'influence la plus déterminante d'un accroissement de ce P.N.B. individuel s'exerce sur le *taux de natalité souhaité*. La figure 28 nous indique, d'après une enquête effectuée sur le planning familial, le pourcentage, en fonction des revenus moyens, des personnes désirant plus de quatre enfants.

Il y a une analogie frappante entre l'allure des courbes des figures 27 et 28, tout au moins en ce qui concerne les valeurs du P.N.B. par tête inférieures à 500 dollars. La discordance intervient pour les valeurs les plus élevées du P.N.B.

L'économiste J. J. Spengler a expliqué l'établissement des relations entre le *taux de natalité souhaité* et le montant des revenus individuels [29] en fonction des modifications d'ordre économique et social qui interviennent au cours du processus d'industrialisation. Selon lui, chaque famille, consciemment ou non évalue la « valeur » et le « coût » d'un enfant supplémentaire par rapport aux ressources qu'elle pense pouvoir lui consacrer, d'où une attitude envers la dimension de la famille qui évoluerait au fur et à mesure de l'accroissement des revenus comme l'indique la figure 29.

La « valeur » d'un enfant repose sur des considérations d'ordre économique telles que la contribution de l'enfant aux activités familiales (ferme, atelier, petit commerce) et l'aide que l'enfant pourrait apporter aux parents lorsqu'ils ne seraient plus en âge de travailler.

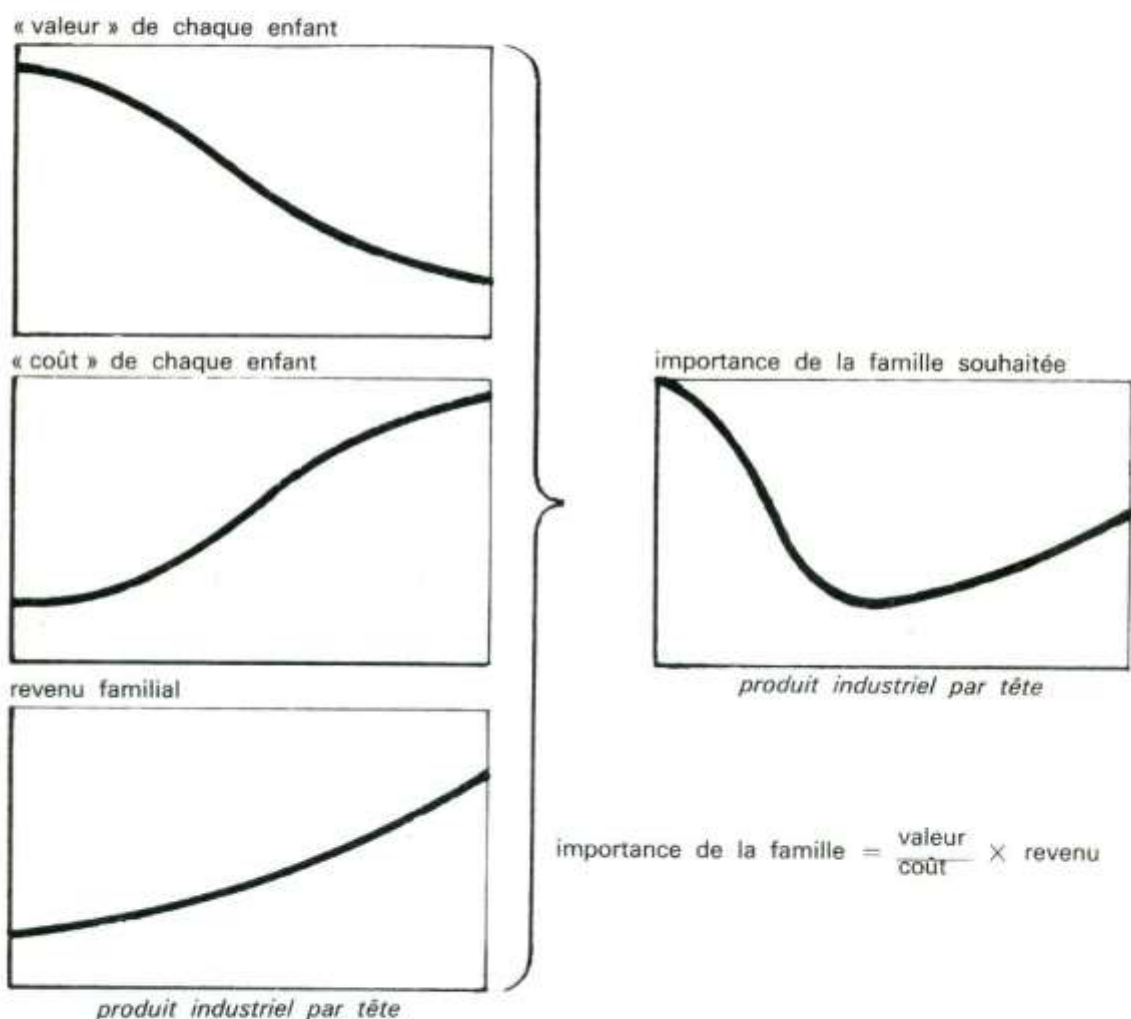
Au fur et à mesure de l'industrialisation, les lois sur le travail des enfants, l'éducation obligatoire, la Sécurité sociale, contribuent à réduire la valeur « monétaire » potentielle de l'enfant. Cette « valeur » est aussi faite de notions plus abstraites : l'enfant est considéré comme un objet d'affection, l'héritier du patronyme ou de la propriété familiale, ou un témoignage de virilité. Ces valeurs sont importantes dans n'importe quelle société, et souvent la naissance d'un enfant est vue comme une « récompense » par le couple et l'environnement familial ou social. Dans les sociétés les plus pauvres, il n'existe même pas d'autre type de « récompense » personnelle.

Le « coût » d'un enfant comprend les dépenses effectives indispen-

sables à la satisfaction de ses besoins fondamentaux, la contrepartie du temps que la mère doit lui consacrer, l'accroissement des responsabilités du couple et la perte de liberté qui en résulte.

Dans les sociétés traditionnelles (par opposition aux sociétés industrielles) le coût d'un enfant est peu élevé. On n'agrandit pas la demeure pour accueillir un enfant de plus; il n'y a pratiquement pas d'éducation ou de soins médicaux à assurer, les besoins alimentaires

Figure 29. — Importance de la famille souhaitée



L'importance de la famille souhaitée est en général une fonction directe du produit de la « valeur » (subjective ou objective) d'un enfant par le revenu familial et inverse du « coût » de chaque enfant. L'allure de la courbe représentative de l'importance de la famille est assez proche de celle des courbes 27 et 28.

et vestimentaires sont réduits au strict minimum. La mère est généralement inculte et n'accorde aucune valeur au temps qu'elle consacre à ses enfants. Le peu de liberté dont les parents disposent ne risque pas d'être substantiellement réduit par la présence d'un enfant, et la structure familiale est suffisamment large pour que la garde de l'enfant soit assurée au cas où l'un des parents serait contraint de quitter la famille, ne serait-ce que pour trouver du travail ailleurs.

Lorsque les revenus augmentent, on donne aux enfants davantage que la nourriture et les vêtements strictement indispensables. Ils sont mieux logés, mieux soignés et l'éducation devient non seulement indispensable mais coûteuse. La mère peut penser à voyager, à se distraire et même à travailler. Ces possibilités nouvelles ne sont plus compatibles avec les larges structures familiales. Ces structures tendent à disparaître avec l'industrialisation et, en conséquence, la garde, voire l'éducation d'un enfant par des personnes ou organismes étrangers à la famille deviennent onéreuses. Les « ressources » (ce terme est pris dans son sens le plus général) qu'une famille doit consacrer à un enfant augmentent généralement en fonction du revenu. Pour les revenus les plus élevés, les courbes représentatives de la « valeur » et du « coût » ne varient pratiquement plus au-delà d'un certain seuil et ce sont les ressources qui deviennent le facteur déterminant de cette grandeur complexe qu'est le taux de natalité souhaité.

On ne s'étonnera donc pas que dans les pays riches, tels que les États-Unis, les dimensions désirées par la famille apparaissent liées au revenu familial. En fait les « ressources » sont, du moins en partie, un concept psychologique en ce sens que le revenu réel actuel doit être corrigé en tenant compte de l'espérance de revenus futurs (liés à l'évolution de la situation professionnelle ou autre) lorsque l'on prévoit le nombre d'enfants que l'on souhaiterait avoir.

Nous avons concrétisé ces facteurs sociologiques par une boucle reliant le produit industriel par tête et le taux de natalité souhaité. L'allure générale de cette relation est donnée par le graphique situé à droite de la figure 29.

Nous n'entendons pas affirmer, en établissant cette liaison que l'augmentation des revenus soit seule à déterminer les dimensions souhaitées pour une famille, ni même qu'il existe un lien immédiat entre ces deux variables. En fait, nous faisons intervenir un délai (retard) entre le produit industriel par tête et les dimensions souhaitées de la famille, ceci pour bien spécifier que cette relation nécessite

un ajustement d'ordre social, lequel ne peut vraisemblablement être effectué qu'en une, voire deux générations ¹.

De plus, cette relation peut encore être modifiée par des orientations politiques ou des bouleversements sociaux. Telle qu'elle est actuellement, elle constitue un reflet du comportement historique des sociétés humaines et les seules conclusions formelles auxquelles nous pouvons parvenir actuellement sont les suivantes :

- Partout où il y a eu expansion économique, les taux de natalité ont baissé.
- Partout où il n'y a pas eu industrialisation, ces taux sont restés élevés.

Pollution et longévité

Nous avons introduit dans le modèle la possibilité d'une influence de la pollution sur l'espérance de vie de la population mondiale; nous avons exprimé cette relation par un coefficient « longévité-pollution » qui affecte l'espérance de vie calculée d'après d'autres déterminants (nourriture et soins médicaux) afin de tenir compte des effets de la pollution.

Si l'on estime que la pollution est susceptible de réduire de 10 % l'espérance de vie calculée dans une ambiance non polluée, on donnera à ce coefficient la valeur 0,9. La relation pollution-espérance de vie est schématisée ci-après :



Nous n'avons que peu d'informations concernant l'incidence de la pollution sur l'espérance de vie. Seule commence à être connue la toxicité pour l'homme de polluants caractéristiques, tels le plomb et le mercure. Les efforts pour établir une relation statistique entre

1. N.D.T. : Se souvenir des deux points singuliers du graphique 27 (Libye et Venezuela).

concentrations de polluants » et « mortalité » établis pour une population donnée n'ont été poursuivis jusqu'ici que pour la pollution atmosphérique [30].

Bien qu'on ne dispose pas encore de statistiques fiables, il ne fait aucun doute qu'il existe un lien entre la pollution et la santé. Selon un rapport récent du Conseil de l'Environnement des États-Unis :

« Des périodes au cours desquelles l'atmosphère a été particulièrement polluée ont fourni la preuve que la pollution atmosphérique pouvait sérieusement compromettre la santé, provoquer des maladies chroniques et même un décès prématuré, spécialement chez les êtres les plus vulnérables : les vieillards ou ceux qui sont déjà atteints de maladies respiratoires (emphysème, bronchite, asthme et cancer pulmonaire... [31] »

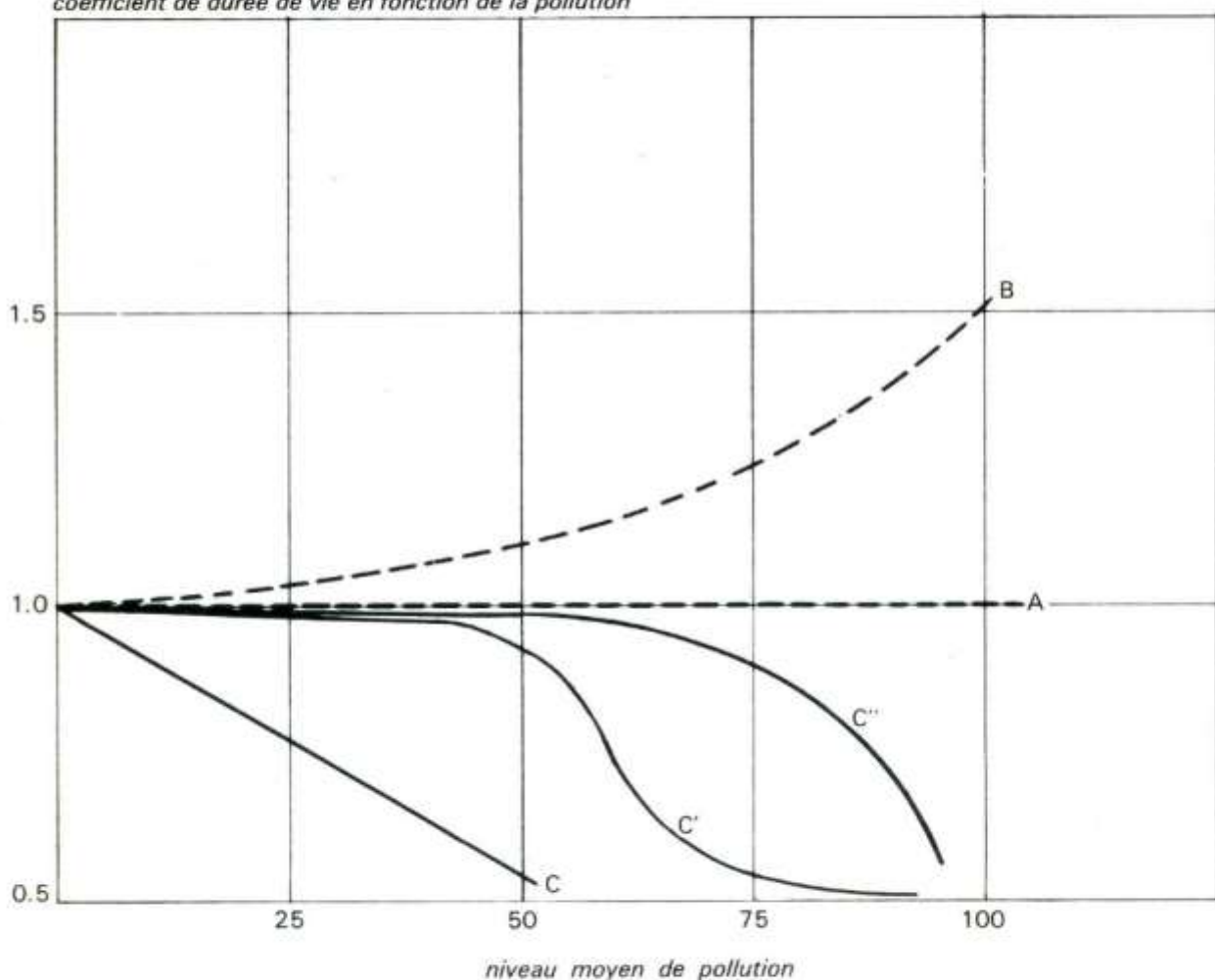
Si nous négligeons l'influence de la pollution dans notre modèle global, nous commettrions une erreur plus importante que celle que nous risquons de commettre en y introduisant actuellement des données même imparfaites. Notre approche du « meilleur mode de quantification actuellement possible » est expliquée ci-dessous et illustrée par la figure 30.

Si la multiplication par 100 du « niveau » global actuel de la pollution n'avait aucun effet sur la longévité, la droite A en traits interrompus (fig. 30) représenterait exactement la relation que nous cherchons. L'espérance de vie n'aurait rien à voir avec la pollution, ce qui est très improbable. Toute autre relation représentée par une courbe telle que B située au-dessus de A semble également invraisemblable : la pollution aurait un effet bénéfique sur la durée de la vie. Il semble donc rationnel d'envisager une relation « négative » entre la pollution et l'espérance de vie, bien que nous ne sachions pas encore quelle allure conférer à la courbe. L'une des trois courbes, C, C' ou C'' (ou toute autre courbe négative) pourrait représenter la fonction cherchée.

Dans un cas comme celui-ci, notre méthode consiste à procéder à plusieurs essais, à observer la manière dont les variables réagissent les unes sur les autres, et à introduire successivement les diverses relations possibles dans le modèle. Si le comportement du modèle est extrêmement sensible à de faibles altérations de la courbe, nous savons qu'il nous faut rechercher des informations complémentaires avant inclusion dans le modèle. Si (comme c'est le cas ici) le mode de comportement du modèle entier n'est pas sensiblement altéré par les

modifications apportées à la fonction, nous supposons qu'elle est valable et nous introduisons dans nos calculs les valeurs correspondantes. Nous avons finalement choisi la courbe C'' (fig. 30). La fonction qu'elle représente suppose qu'en multipliant par 10 le niveau de pollution actuel, la réduction de l'espérance globale de vie sera relativement faible, mais qu'en centuplant la pollution on réduirait de près de 50 % la durée moyenne et globale de la vie humaine.

Figure 30. — Influence de la pollution sur la durée de vie
coefficient de durée de vie en fonction de la pollution



L'influence des polluants est encore mal connue. Différentes hypothèses peuvent être envisagées.

Courbe B (apparemment irréaliste) : la pollution augmenterait la durée de la vie.

Courbe C : la durée de vie décroîtrait linéairement en fonction de la pollution.

Courbe C'' : les effets nocifs de la pollution croîtraient brutalement à partir d'un certain seuil.

Courbe C' : la nocivité augmenterait lentement d'abord et évoluerait suivant une courbe en S. C'est l'hypothèse retenue.

Utilité du modèle global

Les relations discutées ci-dessus n'en sont que trois parmi la centaine qui contribuent au modèle global. Ces relations sont des exemples destinés à montrer la nature des informations utilisées et la manière dont elles ont été mises à profit. Dans bien des cas, les données complètes manquent. Néanmoins, nous estimons que, malgré ces lacunes, ce modèle, au stade préliminaire des recherches, a une utilité incontestable à plus d'un titre.

D'abord en formulant chaque relation comme une hypothèse, et en faisant ressortir son rôle dans un modèle global, nous allons provoquer des discussions, voire des controverses, qui induiront les recherches susceptibles d'améliorer les données dont nous avons besoin. En considérant nos lacunes comme des stimulants, nous espérons trouver, et plus particulièrement pour les secteurs du modèle impliquant des recherches interdisciplinaires (par exemple pollution et durée de vie), des moyens de quantification plus précise des interactions.

Deuxièmement, même en l'absence de données plus affinées, celles que nous possédons actuellement nous apparaissent suffisantes pour définir des modes de comportements fondamentaux fiables. Cela, parce que la structure même du modèle caractérisée par les boucles de rétroaction est un déterminant encore plus important du comportement d'ensemble que la précision des données numériques utilisées pour quantifier les relations. Même d'importantes variations des valeurs d'entrées ne modifient généralement pas le mode de comportement comme nous le verrons plus loin. Des changements de valeurs numériques ne peuvent qu'affecter la période d'une oscillation, le taux de croissance ou de décroissance ou le délai d'effondrement d'un facteur; mais en aucun cas ils n'affectent le caractère fondamental du phénomène : oscillation, croissance ou effondrement¹. Comme notre but est d'utiliser le modèle global pour répondre à des questions

1. L'importance donnée aux structures de préférence aux nombres est une notion difficile à représenter en l'absence d'exemples nombreux et détaillés tirés à la fois de l'observation et de l'expérience des techniques de simulation à l'aide de systèmes dynamiques. Pour plus de précisions sur ce point, cf. chap. 6 in J. W. Forrester, « *Urban Dynamics* » (M.I.T. Press Cambridge Mass, 1969).

concernant les modes de comportement, et non pour faire des prédictions exactes, ce qui nous importe d'abord c'est l'établissement de boucles dont la structure soit parfaitement correcte. La précision des données, à ce stade, est secondaire. Toutefois, à partir du moment où nous voudrions avoir une connaissance plus précise de situations à court terme, il nous faudra accorder une importance accrue à l'exactitude des données numériques.

Troisièmement, si des responsables, à quelque niveau que ce soit, avaient accès à des prévisions précises et à des analyses scientifiquement correctes pour évaluer différentes politiques, nous hésiterions à construire ou diffuser un modèle de simulation fondé sur des connaissances incomplètes. Malheureusement, il n'y a pas de modèle parfait disponible pour mesurer les conséquences des grandes options politiques actuelles. Pour le moment, en face de notre modèle, si imparfait qu'il soit, on ne trouve que des « modèles mentaux » construits à partir d'un conglomérat d'informations parcellaires et de démarches intuitives, et ce sont sur ces modèles mentaux que s'appuient la plupart des décisions politiques.

Un modèle dynamique tel que le nôtre n'a peut-être pas pour entrée des informations plus complètes que celles dont disposent les instances de décision, mais il a le mérite de pouvoir ordonner ces informations et de les introduire dans des boucles dont le fonctionnement peut être parfaitement analysé. Lorsque toutes les hypothèses sont rassemblées et affichées, elles peuvent être plus aisément critiquées et modifiées. Le modèle dynamique, lui, est capable de donner une réponse valable en fonction des diverses décisions qui seront proposées.

Le comportement du modèle global

Nous voici donc, enfin, en mesure d'examiner sérieusement les questions que nous avons posées au début de ce chapitre :

- Quel sera le mode de comportement le plus probable d'un écosystème mondial progressant vers des ultimes limites?
- Quels changements interviendront dans les relations que nous connaissons actuellement lorsque la croissance exponentielle touchera à sa fin?
- A quoi ressemblera le monde lorsque la croissance s'arrêtera?

Différentes réponses peuvent être fournies. Nous examinerons plusieurs solutions, chacune dépendant d'un groupe d'hypothèses différentes sur les réactions possibles des hommes face aux problèmes posés par les limites à la croissance.

Commençons par l'hypothèse d'un quasi-statut quo des valeurs humaines et des relations propres au système population-investissements tel que nous l'avons connu au cours des cent dernières années (voir fig. 31). Nous donnerons à ce diagramme fourni par l'ordinateur le nom de « passage standard » et comparerons ce passage à ceux obtenus à partir d'hypothèses ultérieures.

En abscisses (fig. 31) nous avons un intervalle de temps de deux siècles (1900 à 2100), en ordonnées huit grandeurs :

—————	Population (nombre total d'habitants)
- - - - -	Produit industriel brut par tête (équivalent dollars par personne et par an)
—————	Ration alimentaire moyenne par personne (équivalent en kg de grain/personne/an)
.....	Pollution (multiple du niveau 1970)
— • — • —	Ressources non renouvelables (fraction des réserves résiduelles en 1900)
B	Taux de natalité brut (naissances/1 000/an)
D	Taux de mortalité brut (décès/1 000/an)
S	Services par tête (équivalent dollars/personne/an)

A chacune de ces variables correspond, en ordonnées, une échelle différente que nous avons volontairement omise, de même que nous n'avons pas découpé l'échelle des temps, cela pour confirmer que nous attachons davantage d'importance aux modes de comportement qu'aux valeurs numériques (que d'ailleurs nous connaissons assez bien).

Les échelles sont identiques sur tous les graphiques, de sorte que les figures peuvent être aisément comparées.

Tous les niveaux du modèle (population, investissement, pollution) sont exprimées à l'origine par leurs valeurs en l'an 1900. *Entre 1900 et 1970, les variables* représentées figure 31 (ainsi que de nombreuses autres variables introduites dans le modèle mais non représentées) *concordent* généralement avec les statistiques relatives à cette période, dans la mesure où nous en avons connaissance.

La population est passée de 1,6 milliard en 1900 à 3,5 milliards en 1970. Le taux de natalité baisse progressivement mais le taux de mortalité décroît encore plus rapidement, particulièrement après 1940. La production industrielle, le quota alimentaire, et le quota « services » croissent exponentiellement¹. Les réserves de matières premières atteignent encore, en 1970, 95 % de leur niveau de 1900, mais décroissent dangereusement ensuite au fur et à mesure de l'accroissement de la population et de la production industrielle.

Dans cette première hypothèse, le système tend inéluctablement vers une surchauffe suivie d'un effondrement. La cause de cet effondrement est la disparition des matières premières suivant un processus analogue à celui décrit au chapitre II (*cf.* fig. 9). A partir du moment où les investissements nécessaires pour maintenir un certain niveau de production ne peuvent plus compenser la dépréciation du capital, tout le système de la production industrielle s'effondre et entraîne l'effondrement des activités agricoles et des services dépendant de la production industrielle. Pendant un certain temps, la situation est extrêmement dramatique, car la population, compte tenu du temps de réponse relativement long, continue à croître. Un réajustement progressif, mais vraisemblablement à un niveau plus bas ne pourra se produire qu'après une période de recrudescence de la mortalité par suite de carence alimentaire et de détérioration des conditions d'hygiène et de prophylaxie.

L'étalement dans le temps de ces événements n'aurait pas grande signification, étant donné le degré d'agrégation élevé et les nombreuses incertitudes du modèle. On peut cependant affirmer que dans cette hypothèse particulière, la croissance s'arrêtera bien avant l'an 2100. Dans tous les cas douteux, nous nous sommes efforcés de donner aux grandeurs inconnues les valeurs les plus raisonnablement optimistes et nous avons délibérément ignoré des épiphénomènes tels que guerres ou épidémies, susceptibles de mettre un terme à la croissance beaucoup plus tôt que notre modèle ne l'indique. En d'autres termes, le modèle est « polarisé » pour permettre à la croissance de continuer plus longtemps qu'elle ne le ferait probablement dans un monde réel. *Cela nous permet d'affirmer avec une quasi-certitude que, au cas où aucun changement n'interviendrait dans notre système actuel, l'ex-*

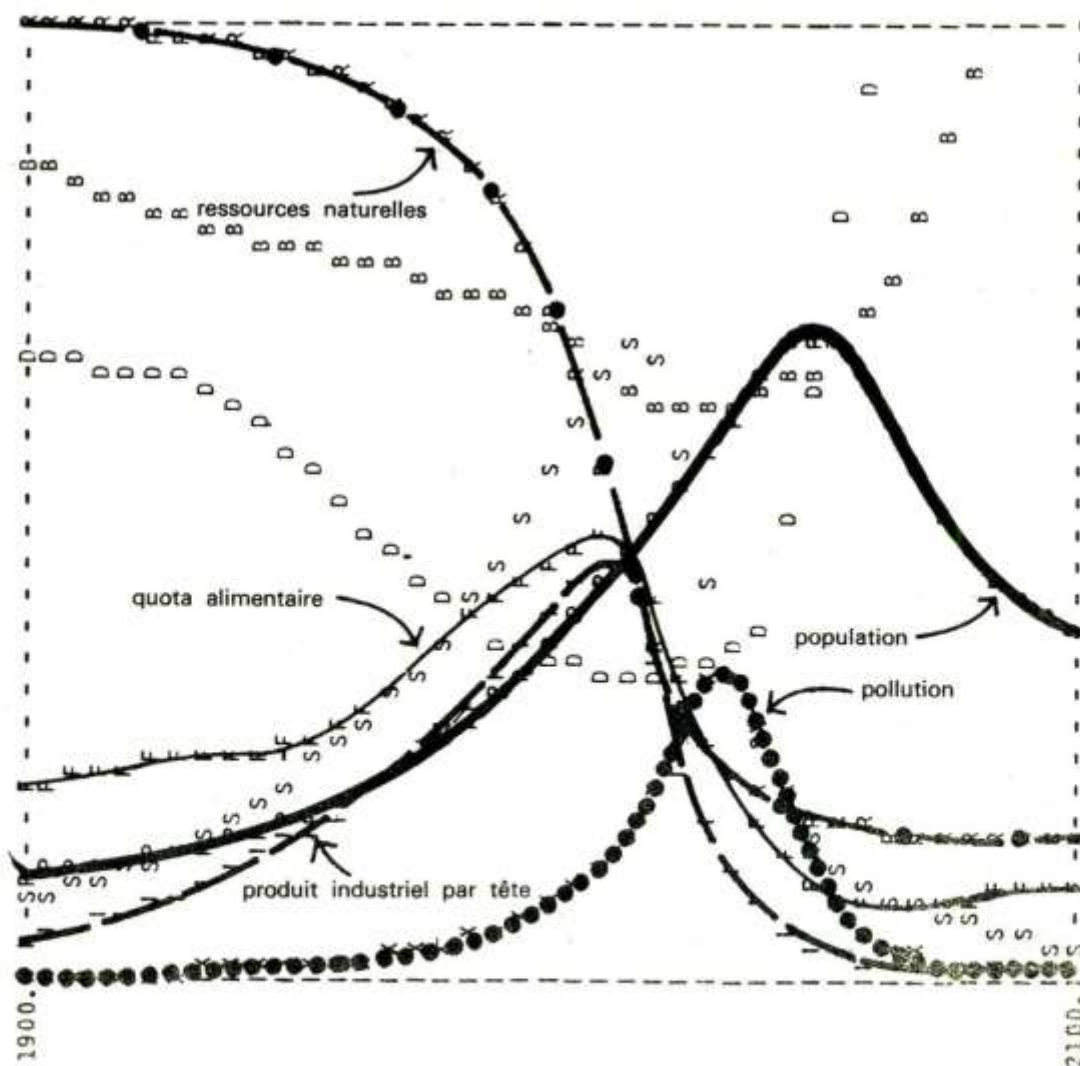
1. N.D.T. : Nous rappelons qu'il s'agit des moyennes mondiales.

pansion démographique et l'expansion économique s'arrêteraient au plus tard au cours du siècle prochain.

Le système (fig. 31) s'effondre par suite d'une pénurie de matières premières. Qu'advviendrait-il de notre estimation si nous avions sous-évalué le stock de ressources naturelles? Supposons que les ressources réelles soient équivalentes au double de celles que nous avons estimées en 1970 (voir fig. 32).

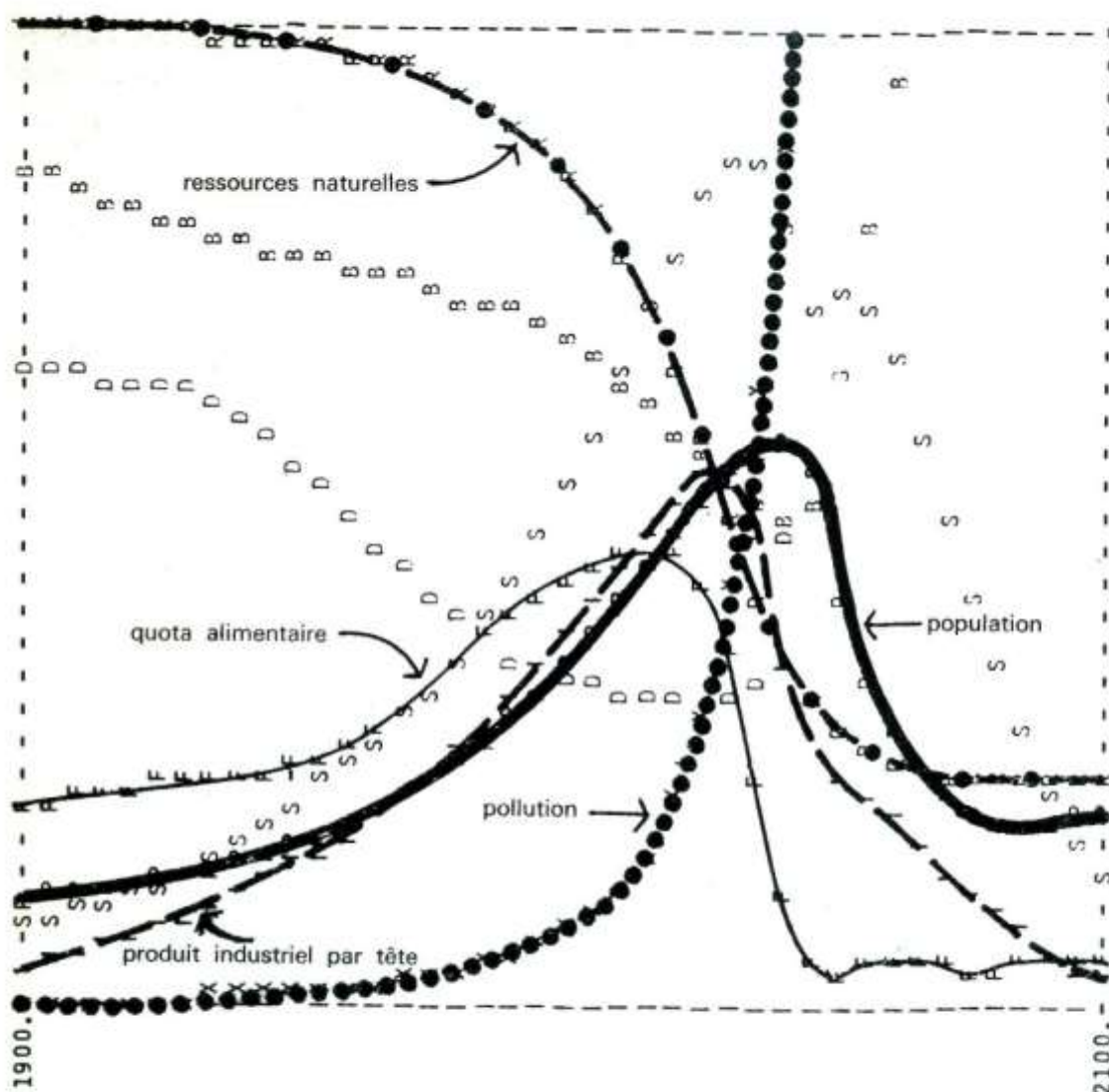
L'allure des courbes de la figure 32 est, aux valeurs numériques près, analogue en bien des points à celle des courbes de la figure 31, à cette différence fondamentale près, que c'est le niveau de pollution qui est la cause essentielle de l'arrêt de la croissance. Le taux de mortalité monte rapidement sous l'action conjointe des polluants et du manque de nourriture. A la même époque, les ressources s'épu-

Figure 31. — Comportement du modèle global



Résultats fournis par le modèle dans l'hypothèse du maintien des tendances actuelles.

Figure 32. — Comportement du modèle global avec ressources naturelles doublées



L'augmentation du stock de ressources naturelles ne change rien à l'issue finale

sent dangereusement, bien que les réserves initiales aient été doublées, tout simplement parce que quelques années supplémentaires de consommation suivant une loi exponentielle ont été suffisantes pour accélérer leur disparition.

L'avenir de notre monde sera-t-il caractérisé par une croissance exponentielle suivie d'un effondrement brutal? Si nous nous contentons de l'hypothèse selon laquelle rien ne sera changé à la politique actuelle, cela deviendra une certitude. Il nous faut être confiants en

l'ingéniosité et l'adaptabilité de l'espèce humaine. Beaucoup de choses peuvent changer dans le système et certains de ces changements sont déjà amorcés. La Révolution verte accroît les rendements agricoles dans les pays non industrialisés et les connaissances relatives aux méthodes de régulation des naissances commencent à se répandre. Utilisons donc le modèle global comme un outil pour étudier les conséquences possibles de la mise en œuvre de nouvelles techniques destinées à reculer les limites de la croissance.

4.

La technologie et les limites de l'expansion

A quelle finalité notre société tend-t-elle par son progrès industriel? Quand le progrès s'arrêtera, dans quel état peut-on s'attendre à ce qu'il laisse l'humanité?

John Stuart Mill, 1857

Au cours de son histoire l'espèce humaine s'étant trouvée à maintes reprises dans l'impossibilité de vivre confinée à l'intérieur de limites de nature matérielle, c'est son aptitude à franchir ces limites qui a constitué la tradition culturelle de la plupart des nations dominantes du monde actuel. Durant les trois derniers siècles des records impressionnants ont été accumulés, reculant chaque fois, grâce à une série de progrès technologiques spectaculaires, les bornes apparentes de la population et les limites à l'expansion. Des succès ininterrompus ayant ainsi été remportés par une grande partie des sociétés humaines, au cours des dernières phases de notre histoire, il est tout à fait normal que bien des gens continuent à espérer des solutions techniques permettant d'élever indéfiniment le plafond qui limite matériellement la vertigineuse ascension de l'humanité.

Un optimisme tonitruant est de rigueur chez certains : « il n'y a pas de limites prévisibles, qu'il s'agisse de l'approvisionnement en

matières premières ou de la production d'énergie, que l'on ne puisse espérer franchir grâce à des modifications du mécanisme des prix de revient, à la fabrication de produits de remplacement, à de futurs progrès technologiques et à un contrôle de la pollution [32].

« Étant donné la capacité actuelle des sols à produire des denrées alimentaires et les perspectives offertes par les techniques modernes si elles étaient pleinement utilisées, il est clair que l'humanité peut faire disparaître la faim d'ici dix ou vingt ans [33]. »

« La maîtrise de l'humanité sur des sources d'énergies incommensurables, encore inertes, inépuisables, l'utilisation rationnelle de l'air, des océans et les techniques spatiales, consacrent la faillite du dogme de Malthus. L'humanité peut être assurée d'un succès total dans les domaines techniques et économiques d'ici moins d'un quart de siècle [34]. »

De telles déclarations sont-elles compatibles avec l'existence de limites à la croissance telles que nous venons de le démontrer? De nouvelles techniques pourront-elles modifier le cheminement vers une expansion accélérée suivie d'un effondrement? Avant d'accepter ou de rejeter cette vision optimiste d'un avenir où les difficultés humaines seront surmontées à l'aide de solutions techniques, il est préférable de s'interroger sur l'impact global à court et à long terme, de ces nouvelles techniques, sur chacun des cinq secteurs interdépendants du système population-investissements.

La technologie dans le modèle global

La « technologie » n'est pas introduite dans le modèle en tant que variable indépendante. Elle est multiforme, en ce sens qu'elle peut être issue d'un des secteurs étudiés ou l'influencer. Tout élément ressortissant de la technologie (pilules anticonceptionnelles, semences à haut rendement, télévision, plates-formes de forage en mer) peut être appelé à jouer un rôle distinct dans l'un ou l'autre secteur et avoir une action précise sur le comportement du système. Nous sommes donc amenés à considérer toute nouvelle technique séparément en prenant bien soin de vérifier dans quelle mesure elle affecte les hypothèses que nous avons introduites dans chaque élément du modèle. Nous allons donner quelques exemples de cette approche des « incidences globales à long terme de la technologie ».

Énergie et ressources

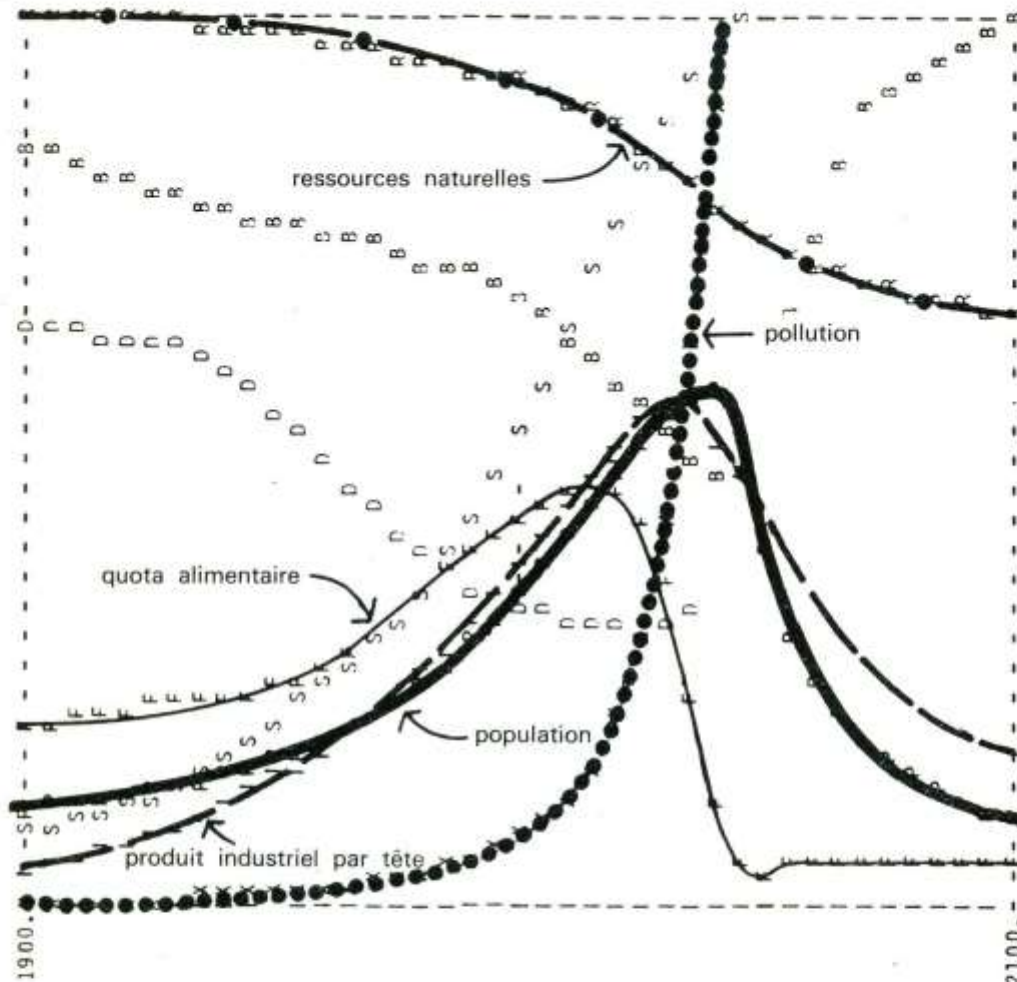
La maîtrise de la fission nucléaire a déjà permis de reculer la limite de nos disponibilités en énergie, récemment fixée par les réserves de combustibles fossiles. Il est possible que la généralisation des réacteurs rapides et, peut-être de techniques utilisant les réacteurs à fusion, permettent d'accroître considérablement la durée d'utilisation de matériaux fissibles tels l'uranium. Ceci signifie-t-il que l'homme se soit réellement rendu maître de « sources d'énergies incommensurables, inertes, inépuisables » qui lui fourniront sans fin les matières premières que dévoreront les usines? Quelle sera l'influence d'une utilisation accrue de l'énergie nucléaire sur les disponibilités en ressources naturelles de notre monde?

Certains experts prétendent qu'un potentiel énergétique considérable permettra à l'homme de découvrir et d'exploiter des matières premières jusqu'alors inaccessibles (dans les fonds marins par exemple), de traiter des minerais pauvres, et même de tirer profit des roches les plus communes, de recycler les déchets solides et de récupérer le métal qu'ils contiennent. C'est une croyance assez répandue, mais qui n'est cependant pas partagée par tout le monde. Ce n'est en tout cas pas le point de vue du géologue Thomas Lovering.

« Une énergie à bon marché n'aurait finalement qu'un impact assez négligeable sur le prix de revient total (dont la plus grande partie résulte des investissements et de la main-d'œuvre) d'une opération d'extraction et de traitement des roches. Les quantités considérables de déchets irrécupérables produites pour chaque unité de métal extraite (un rapport de 2 000 à 1 au minimum) sont plus facilement traitées en bureau d'études que sur le tas... Pour récupérer le peu de métal recherché, on doit d'abord faire éclater la roche à l'aide d'explosifs, la percer pour creuser les puits d'accès et d'évacuation, la noyer dans des solutions à base de composés chimiques se combinant au métal à extraire. Il faut aussi veiller à ce que ces solutions ne soient pas perdues et ne viennent pas contaminer les eaux souterraines et leurs effluents. Ce n'est pas en utilisant l'énergie nucléaire que l'on pourra éviter cette séquence d'opérations [35]. »

Supposons cependant que les optimistes aient raison sur ce point et introduisons dans le modèle l'hypothèse selon laquelle on pourra tirer parti de l'énergie nucléaire (voir fig. 33).

Figure 33. — Comportement du modèle global avec ressources naturelles « illimitées » (recyclables)



Pour résoudre le problème des disponibilités en ressources naturelles, deux hypothèses ont été formulées : 1) l'utilisation de quantités illimitées d'énergie nucléaire permet l'exploitation de réserves doubles de celles qui avaient été initialement prévues et 2) l'énergie nucléaire autorise la mise en œuvre de procédés de recyclage des ressources et de fabrication de produits de substitution. Si ces hypothèses sont les seules introduites dans le modèle, la croissance se trouve arrêtée, tout comme dans l'hypothèse formulée figure 32, par un accroissement considérable du niveau de pollution.

La possibilité de traiter les minerais à faible teneur ou d'exploiter les fonds marins se traduira ici par la duplication des réserves disponibles, hypothèse déjà envisagée figure 32, (chapitre 3).

Nous supposons également qu'à partir de 1975, une politique de récupération systématique et de recyclage réduira de 75 % les apports de ressources naturelles indispensables à la fabrication de chaque

unité de produit industriel. Ce faisant, nous savons parfaitement que cette dernière hypothèse est nettement plus optimiste que réaliste.

La figure 33 montre que, dans ces conditions, il n'y a pas de risque de pénurie de matières premières. Mais la croissance se trouve, comme dans le cas de la figure 32, entravée par la pollution. L'absence de toute contrainte relative à l'approvisionnement en matières premières permet l'expansion de la production industrielle et agricole et le développement des services à un niveau légèrement supérieur à celui indiqué figure 32, cela avant que la chute ne soit amorcée. La population atteint un niveau équivalent, mais chute plus rapidement et finalement jusqu'à un niveau inférieur.

La possession de ressources « illimitées » ne semble donc pas devoir être la clé d'une expansion continue du système global. Apparemment l'impulsion donnée à l'économie par l'abondance des ressources naturelles, si elle ne s'accompagne pas de mesures propres à arrêter le développement de la pollution, ne peut en aucune façon empêcher l'effondrement du système.

Contrôle de la pollution

Nous avons supposé, figure 33, que l'utilisation généralisée de l'énergie nucléaire ne modifierait en aucune manière le niveau de pollution moyenne afférente à la fabrication d'une unité de produit fini. Les conséquences, pour l'écologie, de l'utilisation de l'énergie nucléaire ne sont pas encore clairement prévisibles. Une diminution de la teneur en sous-produits de la combustion du charbon, du pétrole et du gaz, tels que l'anhydride carbonique et l'anhydride sulfureux est très probable mais sera vraisemblablement annihilée par une augmentation de la teneur en produits radioactifs. De son côté, le recyclage des matières premières induira une baisse de la pollution due aux déchets solides et à quelques métaux toxiques. Toutefois le passage à l'énergie nucléaire comme source essentielle d'énergie n'aura probablement qu'une incidence très faible sur la plupart des autres sources de polluants, y compris celles qui sont liées aux différents processus de fabrication, notamment la pollution thermique et celle résultant des techniques agricoles.

On peut penser toutefois qu'une société humaine ayant à sa discrétion les sources d'énergie nucléaire pourra mettre au point des techni-

ques susceptibles d'empêcher la génération des polluants d'origine industrielle. Des systèmes de contrôle de la pollution sont en cours d'élaboration et bon nombre déjà installés dans de grandes zones industrielles.

Dans quelle mesure une politique très stricte de contrôle de la pollution, si elle était appliquée, disons à partir de 1975, pourrait-elle modifier le comportement du modèle global?

Un contrôle strict de la pollution ne signifie pas forcément l'élimination totale de tous les polluants. Cette élimination totale se heurte à des impératifs techniques et surtout économiques. Le coût de l'élimination des polluants croît vertigineusement en fonction du pourcentage éliminé : la figure 34 illustre l'évolution du coût de la purification des eaux effluents d'une sucrerie. Pour éliminer jusqu'à 30 % des déchets, le coût est raisonnable (environ 12 de nos francs par kilo de déchets éliminés). Au-delà, le coût grimpe exponentiellement : 800 F le kilo pour éliminer 95 % des déchets et près de 1 200 pour purifier totalement les eaux effluents.

De même, la réduction de la pollution atmosphérique pose des problèmes similaires. On verra au tableau 6 l'estimation du coût de l'élimination de l'atmosphère d'une grande ville [36] des vapeurs de SO_2 et des particules solides.

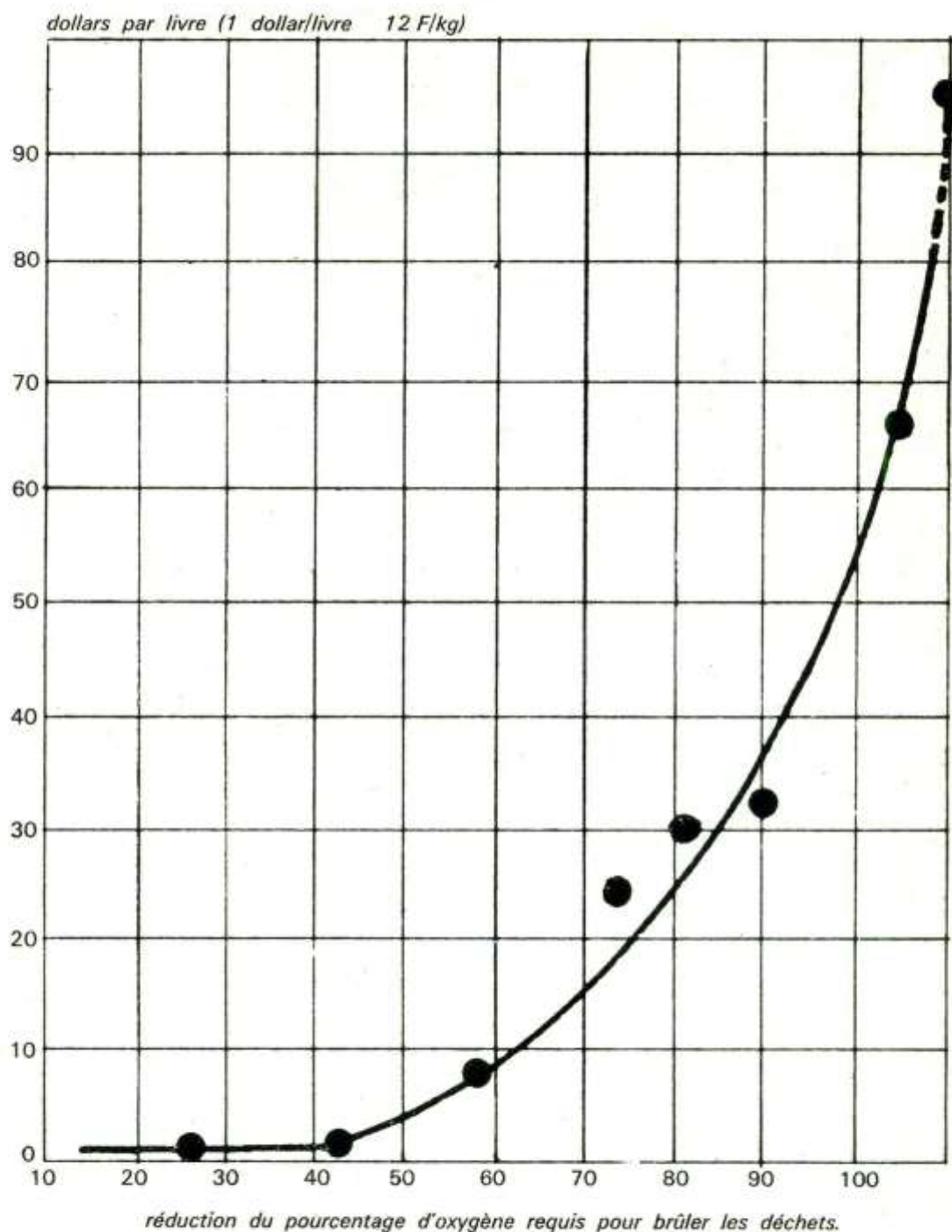
Tableau 6

Coût de la réduction de la pollution atmosphérique dans une grande agglomération américaine

% élimination du SO_2	% élimination des particules solides	Coût estimé (dollars)
5	22	50 000
42	66	7 500 000
48	69	26 000 000

Sur la figure 35, nous avons introduit dans le modèle à la fois l'élévation optimiste (recyclage) des réserves de matières premières déjà envisagée figure 33 et une réduction de la pollution à un taux de 25 % de sa valeur prévue et ceci à partir de 1975. Cette dernière

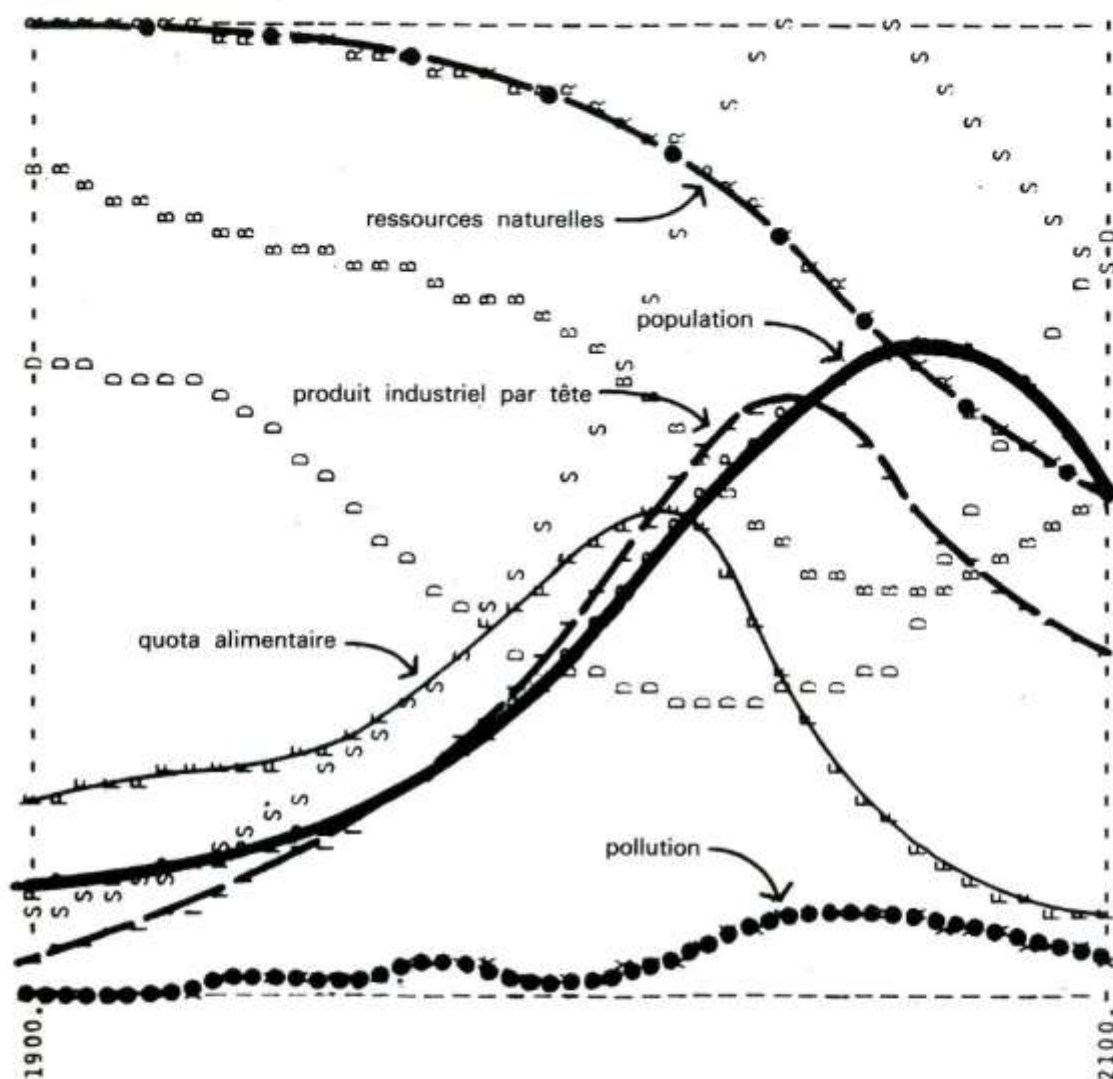
Figure 34. — Coût de la réduction de la pollution



Le coût supplémentaire de l'élimination des déchets d'une sucrerie produisant chaque jour 2 700 t de sucre de betterave croît rapidement au fur et à mesure que l'on s'efforce de parvenir à une élimination complète. La réduction de la demande en « oxygène biologique » (mesure de l'oxygène requis pour décomposer les déchets organiques) revient à moins de 12 F au kilogramme jusqu'à 30 % de réduction. Au-delà de 65 % de réduction, le coût supplémentaire s'élève à plus de 240 F/kg et à 95 % de réduction, il atteint 7 200 F/kg.

SOURCE : Second rapport annuel du « Council on Environmental Quality », U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 1971.

Figure 35. — Comportement du modèle global avec ressources « illimitées » et contrôle de la pollution



Une nouvelle hypothèse est introduite à partir de 1975. Il s'agit de nouvelles avances technologiques permettant de réduire au quart de la valeur atteinte en 1970 la pollution par unité de produit industriel et de produit agricole. Cette hypothèse complémentaire devrait éliminer les problèmes d'épuisement des ressources naturelles et de pollution rencontrés sur les graphiques précédents, les politiques en matière de ressources naturelles étant celles indiquées figure 33. Ces changements permettent la croissance de la population et de la production industrielle jusqu'à ce que la limite des superficies cultivables soit atteinte. A partir de ce seuil, le quota alimentaire décline, et la production industrielle diminue, une partie de plus en plus importante du capital global devant alors être consacrée à la production de denrées alimentaires.

hypothèse, à notre avis, manque de réalisme, étant donné ce que nous savons actuellement des coûts de l'opération et d'autre part des difficultés rencontrées pour éliminer d'autres types de polluants : effet thermique, radio-isotopes des réacteurs nucléaires, dispersion des

engrais chimiques, particules d'amiante, provenant des garnitures de freins des véhicules.

Cette hypothèse, nous la formulons pour étudier le comportement de notre modèle global dans ce cas précis, mais non par ce que nous la croyons politiquement possible en l'état actuel de nos institutions.

En réponse aux données que nous avons introduites, le modèle fournit les conclusions suivantes (fig. 35) :

Une telle politique de contrôle de la pollution est efficace en ce sens qu'elle permet d'éviter la crise due à la pollution illustrée par la figure 34. La population et le produit industriel par tête augmentent au-delà du maximum précédent et ni les réserves de matières premières ni la pollution ne posent de problèmes. Un déséquilibre apparaît cependant : l'effondrement du système est cette fois le fait du manque de nourriture.

Tant que l'augmentation de la production se poursuit, on obtient de la terre des rendements à l'hectare sans cesse croissants, jusqu'à 7 fois ceux de 1900, et de nouvelles terres sont mises en valeur. Cependant que des terres arables sont simultanément transformées en zones industrielles ou urbaines, et qu'une partie des terres commence à s'éroder surtout à la suite des méthodes de culture intensive. L'ultime limite du potentiel cultivable est atteinte. Au-delà de ce point, la population continuant à croître, les quota alimentaires individuels diminuent. Lorsque la carence alimentaire devient évidente, la proportion des investissements consacrés à l'agriculture augmente au détriment des investissements industriels, ce qui entraîne une baisse du produit industriel par tête. Lorsque le quota alimentaire descend au niveau de son seuil critique, le taux de mortalité commence à croître, mettant un terme à l'expansion démographique.

Rendement agricole accru et régulation des naissances

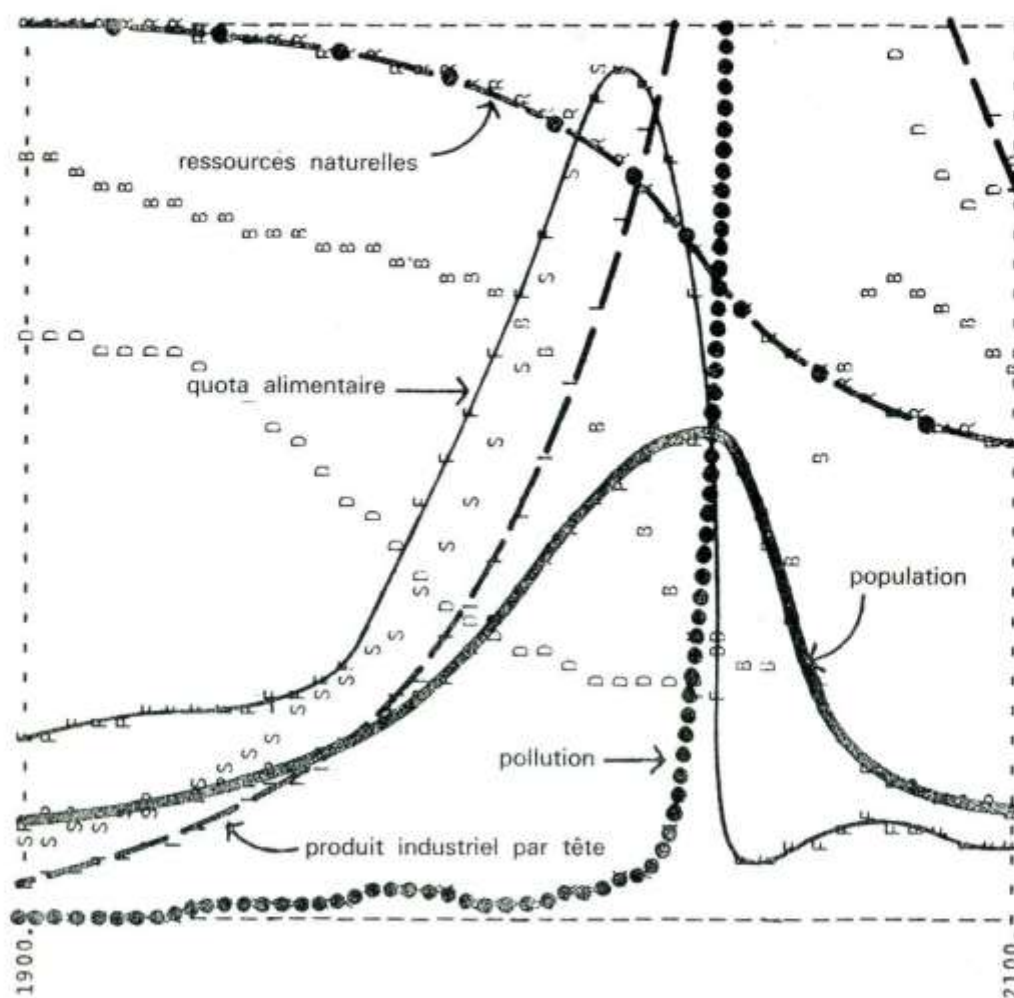
Le problème illustré par la figure 39 peut être examiné sous deux angles différents : ou bien il y a carence alimentaire, ou bien il y a trop de monde sur terre.

La solution technique au premier terme de l'alternative serait de produire davantage de denrées, peut-être grâce à une application plus large des méthodes de la Révolution verte (la mise au point de

nouvelles variétés de semences à haut rendement a néanmoins déjà été incluse dans les équations initiales du modèle). La solution technique au second terme serait de promouvoir des méthodes plus efficaces de régulation des naissances.

Nous allons supposer que ces deux solutions auront été mises en œuvre en 1975 et que, d'autre part, les hypothèses qui ont servi à

Figure 36. — Comportement du modèle global avec ressources « illimitées », contrôle de la pollution et productivité agricole accrue

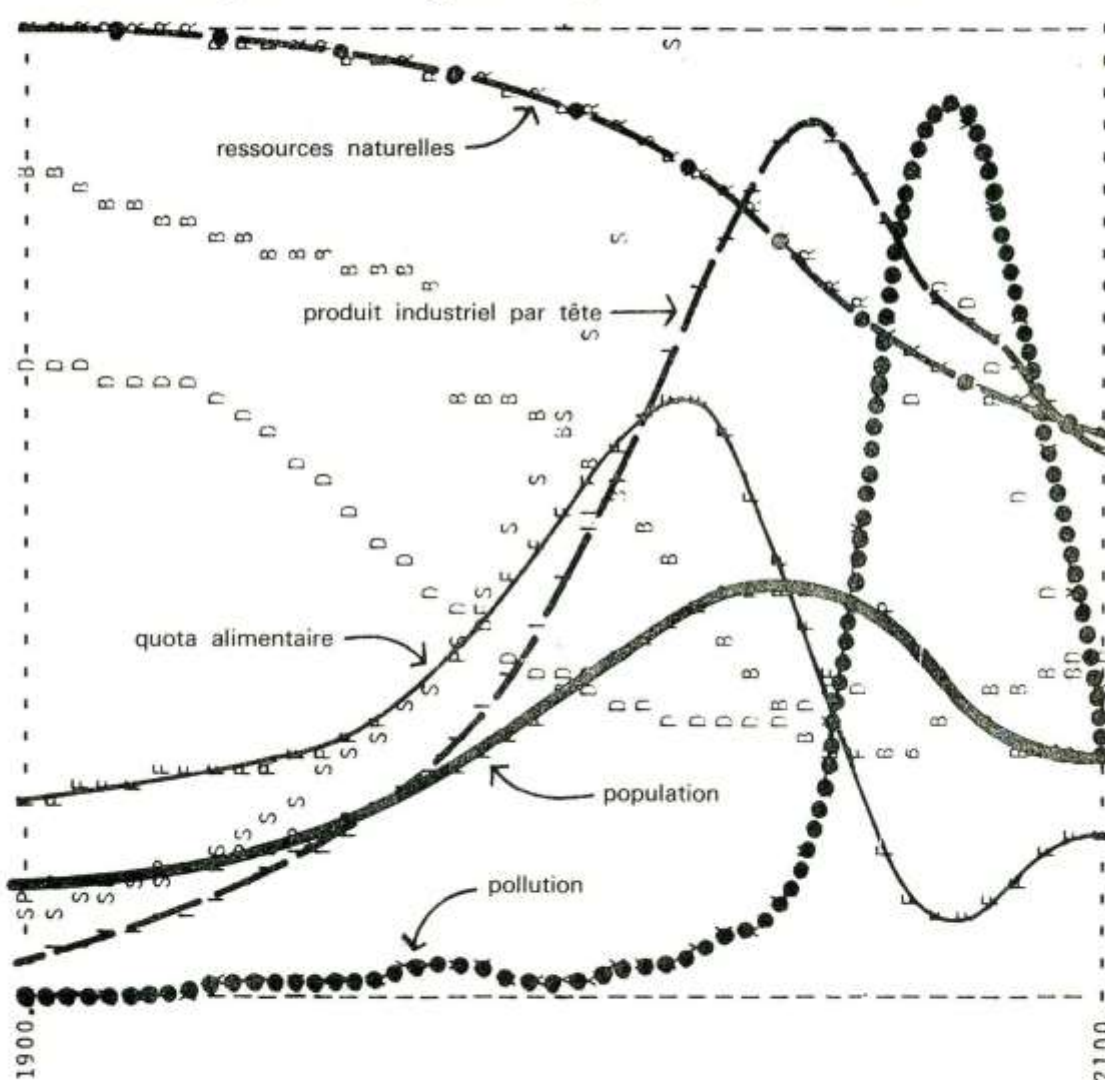


Pour éviter la crise alimentaire (fig. 35), on double le rendement moyen des terres à partir de 1975 (les politiques en matière de ressources naturelles et de pollution restant les mêmes que dans le cas précédent). La combinaison de ces trois mesures fait disparaître tellement de contraintes que la population et la production industrielle atteignent des niveaux très élevés. Bien que le taux de pollution par unité de produit industriel reste bas, l'ampleur même de la production engendre un niveau de pollution catastrophique qui provoque l'effondrement du système.

l'établissement des graphiques précédents sont maintenues. Selon les combinaisons choisies, nous obtiendrons les figures 36, 37 et 38.

Sur le graphique 36, nous supposons que les rendements moyens à l'hectare, en toutes régions du globe, sont doublés. Le résultat de cette hypothèse est un accroissement énorme des quota individuels : nourriture, produits industriels, services. C'est ainsi que le produit industriel par tête atteindra dans le monde entier la valeur qu'il avait

Figure 37. — Comportement du modèle global avec « ressources illimitées », contrôle de la pollution et régulation « parfaite » des naissances



Plutôt que de recourir à un accroissement de la production de denrées alimentaires, on tente de mettre en œuvre une politique plus efficace de régulation des naissances afin de remédier à la crise alimentaire. Le contrôle des naissances restant volontaire et n'entraînant aucun changement dans l'échelle des valeurs, la population continue à croître, toutefois plus lentement que sur la figure 35. Néanmoins, la crise alimentaire ne se trouve différée que d'une dizaine d'années.

aux États-Unis en 1970, mais ne restera à ce niveau que pendant une très courte période. En dépit d'une politique antipollution strictement appliquée (pollution réduite à un quart de sa valeur) on n'empêchera pas le niveau de pollution global de monter presque verticalement, cette ascension vertigineuse étant liée au fait que le produit industriel par tête aura quadruplé (on se souviendra que la population aura plus que doublé, ce qui nous conduit à un multiplicateur global de 8). Dans ce cas, c'est la pollution qui arrête l'expansion, tout comme dans le cas représenté figure 33.

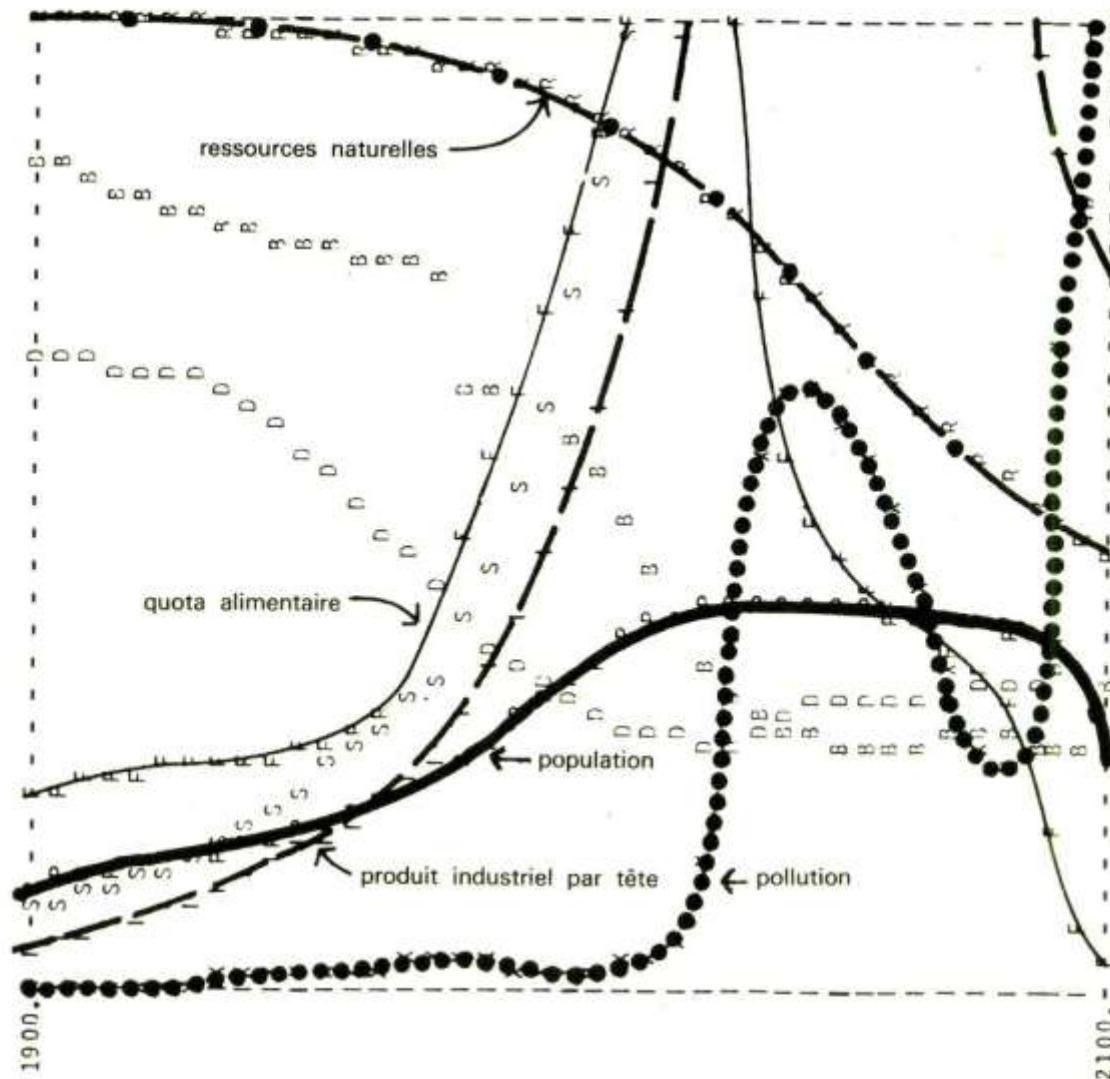
L'autre solution est représentée figure 37. Les trois entrées choisies sont : ressources « illimitées », contrôle de la pollution et régulation « parfaite » des naissances. Cette régulation s'applique à partir de 1975 et est pratiquée *volontairement*. Le résultat ne se traduit pas par un arrêt de l'expansion démographique, puisqu'une telle politique se borne à éviter les enfants non désirés. Néanmoins, elle aboutit à une baisse sensible de la natalité et l'on voit la courbe de population croître plus lentement que sur les figures 35 et 36. L'expansion se trouve cependant stoppée par une crise alimentaire, à peine 20 ans plus tard que dans le cas de la figure 35.

Figure 38, nous avons supposé que l'on applique l'ensemble des hypothèses formulées jusqu'ici et que dans tous les secteurs du modèle, des mesures sont prises pour reculer les limites à l'expansion. On aboutit cependant à un arrêt de l'expansion et à l'effondrement total du système avant l'an 2100. La crise a, cette fois, trois déterminants majeurs : érosion quasi totale des terres arables et famine, sérieuse brèche dans les réserves de ressources naturelles malgré la récupération et le recyclage, et accroissement brutal de la pollution après des passages successifs par un maximum et un minimum. La pollution, ultime déterminant, réduit presque à néant la production agricole et, par effets directs et indirects, provoque une augmentation rapide du taux de mortalité.

Recul des limites ?

Compte tenu des nombreuses approximations et des limites mêmes de modèle global, il est inutile de s'appesantir tristement sur les catastrophes qu'il fait apparaître. Nous précisons une fois de plus qu'aucun de ces passages en machine ne peut constituer une prédiction. Nous

Figure 38. — Comportement du modèle global avec ressources « illimitées » contrôle de la pollution, productivité agricole accrue et régulation « parfaite » des naissances



Quatre solutions technologiques sont simultanément introduites dans le modèle global de manière à tenter d'éviter le processus de surchauffe et d'effondrement des cas précédents. Les ressources sont exploitées pleinement et recyclées à 75 %. La pollution est toujours réduite à un quart du taux de 1970. Les rendements des terres sont doublés, et la population dispose, à l'échelle mondiale, de méthodes de contrôle des naissances parfaitement efficaces. On parvient, provisoirement, à une population stable avec un niveau de vie moyen voisin du niveau de vie actuel aux États-Unis. Toutefois, la croissance de la production industrielle se trouve arrêtée et le taux de mortalité augmente car les ressources naturelles sont épuisées, la pollution s'accumule et la production de denrées alimentaires décline.

n'espérons pas non plus devoir imaginer un monde réel qui se comporterait comme le montrent les graphiques sortis par notre modèle, et plus spécialement dans un contexte d'effondrement. Le modèle contient des hypothèses dynamiques uniquement axées sur les aspects matérialisables des activités humaines. *Il suppose en outre, que les variables sociales*, distribution des revenus, attitude vis-à-vis des structures familiales, choix entre les divers biens de consommation, *continueront à suivre les mêmes schèmes* que ceux qui les ont caractérisés dans l'ensemble du monde au cours de son histoire récente. Ces schèmes et les valeurs humaines qui y sont liées se sont tous construits durant la phase de croissance de notre civilisation. Ils seraient certainement révisés fondamentalement dès que la population et les revenus commenceraient à décroître. Nous n'avons même pas tenté de simuler de tels changements. La validité de notre modèle réside uniquement dans le fait que, quelles que soient les conditions initiales, il y a toujours un point sur le graphique où l'expansion s'arrête et où l'effondrement commence.

En dépit des réserves que l'on peut faire et dont nous sommes parfaitement conscients, tant en ce qui concerne les approximations des valeurs numériques que le caractère trop simplifié des structures, nous sommes amenés à la conclusion suivante :

Le comportement fondamental de l'écosystème mondial est défini par une croissance exponentielle de la population et des investissements, suivie d'un effondrement.

Ce comportement est vérifié lorsque nous admettons que le système actuel ne sera pas modifié ou lorsque nous n'apportons que des solutions purement techniques aux problèmes qui se posent. Ce que nous n'avons pas exprimé clairement mais qui était implicitement contenu dans toutes les propositions soumises à l'ordinateur, c'est que nous avons admis que population et investissements pourraient croître jusqu'à ce qu'ils aient atteint quelque limite « naturelle ». Cette hypothèse de départ a été retenue parce qu'il s'agit là d'un concept classique et élémentaire qui fait partie intégrante de la plupart des systèmes de valeurs de notre société actuelle. Quelque essai que nous ayons fait, le résultat unique à plus ou moins long terme est l'effondrement du système, même si cet effondrement peut être différé.

En fait, il n'est pas difficile de trouver les raisons de cet effondrement. Partout, dans le réseau des interactions, nous avons introduit des délais qui, eux, existent bel et bien dans un monde réel et sur lesquels

les techniques les plus élaborées n'ont aucun effet. Il faut neuf mois pour procréer un enfant, quinze ans environ pour que cet enfant lui-même soit géniteur, il est peu probable que cela change. Première conséquence de cet état de choses, les effets d'une politique de régulation des naissances ne pourront devenir sensibles qu'avec un retard de l'ordre de 15 à 20 ans. Le cycle de la pollution est très long : il faut considérer le temps de passage du polluant, de l'air, de l'eau ou du sol à la chaîne alimentaire, puis à l'homme chez lequel certains effets ne se manifestent que longtemps après ingestion. Pour certains cancérigènes, le délai peut atteindre 20 ans. Sur un autre plan, le transfert des investissements d'un secteur à l'autre n'est pas une opération instantanée : il faut du temps pour constituer un capital, pour mettre en valeur de nouvelles terres, etc.

Dans un système dynamique, ces retards n'ont d'effets sérieux que si le système évolue rapidement. Le contrôle du système présente dans un certain sens des analogies avec la conduite d'une automobile... Entre l'instant où le conducteur perçoit l'obstacle (obstacle étant pris dans son sens le plus général) et celui où il amorce la manœuvre requise pour l'éviter (freinage, accélération, coup de volant), il s'écoule un laps de temps très bref qui est le temps de réaction propre du conducteur. A ce temps de réaction (ou de réponse) du conducteur vient s'ajouter un temps relativement beaucoup plus long, celui à l'issue duquel la manœuvre amorcée a atteint son plein effet : ralentissement jusqu'à la vitesse optimale, arrêt total, dépassement dans des conditions correctes ou prise de virage dans les conditions optimales. Ce dernier temps, qui est le temps de réponse du véhicule, dépend essentiellement de la vitesse à laquelle se déplace celui-ci. Il apparaît donc évident que la solution de sagesse consiste à rouler raisonnablement, sinon le conducteur expérimentera tôt ou tard, et à ses dépens, la surchauffe (euphorie due à la vitesse) suivie de l'effondrement (l'accident rendu inévitable).

Supposons maintenant, que, pour une raison quelconque, le conducteur ait perdu toute visibilité et ne puisse effectuer de manœuvre que d'après les instructions fournies par son passager. Le temps de réaction du conducteur va se trouver considérablement allongé et la seule manière sûre de conduire sera alors de réduire la vitesse bien en dessous de la normale. Rouler à la vitesse de croisière conduirait déjà au désastre et accélérer (ce qui correspond dans ce cas à une croissance exponentielle) serait impensable.

Les temps de réponse dans les boucles d'un système dynamique ne poseraient pas de problèmes si le *système évoluait lentement*. S'il en était ainsi, toute nouvelle action, tout changement de politique s'effectuerait en un temps suffisamment long pour que les conséquences de cette action puissent se manifester au travers des circuits de rétro-action avant de passer à l'étape suivante.

Dans les systèmes à croissance rapide ou exponentielle, les changements d'orientation doivent intervenir tellement vite (si l'on veut qu'ils aient les effets voulus), que les impacts des changements précédents n'ont pas encore pu être déterminés, ou même entièrement intégrés. Le système continue donc à évoluer en fonction de l'orientation qui lui a été précédemment donnée (comme un véhicule sur sa lancée) bien après qu'un changement d'orientation a pourtant été décidé et mis en œuvre. Cela explique que la population et les investissements soumis à un rythme de croissance exponentielle non seulement atteignent leurs limites, mais les dépassent même avant que le reste du système, compte tenu des temps de réponse, ne réagisse pour arrêter la croissance.

Technologie et monde réel

Les espoirs des fervents de la technologie reposent sur leur croyance en ses capacités à faire disparaître les limites à la croissance démographique et économique.

Nous avons démontré que dans notre modèle global, les tentatives pour résoudre par la technologie des problèmes tels que l'épuisement des ressources, la pollution ou la pénurie alimentaire, n'avaient en fait aucune incidence sur l'*essence* même du problème : la croissance exponentielle dans un système complexe et fermé. Quelque optimistes, qu'aient été nos hypothèses quant à la valeur des solutions technologiques, aucune de nos tentatives n'a réussi à éviter l'ultime déclin de la population et de l'économie ni l'effondrement du système avant la fin du XXI^e siècle. Avant de traiter des solutions autres que technologiques, nous poursuivons notre analyse par certains aspects de la technologie qui ne peuvent pas, pour l'instant, être inclus dans notre modèle global.

Les « effets parallèles » de la technologie

Lors de la mise en œuvre de toute nouvelle technologie, les effets parallèles sont inséparables de l'effet principal. Notre rôle est de prévoir ces effets parallèles, chaque fois que nous nous efforçons de construire un modèle.

Les graphiques que nous avons produits ont montré quelques-uns de ces effets parallèles des techniques sur les caractéristiques physiques et économiques de l'écosystème mondial. Malheureusement notre modèle n'indique pas, pour le moment, leurs effets sociaux qui sont souvent les plus importants dans la vie des individus.

Prenons l'exemple de la Révolution verte. Son objectif était de combattre la faim dans le monde. Grâce à de nouvelles variétés de semences, d'engrais et de pesticides. Les promoteurs de cette révolution espéraient par ces méthodes non seulement améliorer considérablement les rendements, mais encore favoriser la création d'emplois au prix de peu d'investissements. Dans quelques régions, comme au Pendjab (Inde), elle a créé effectivement des emplois et cela à un rythme plus élevé que celui de l'accroissement de la population. Dans la partie orientale du Pendjab, on a noté un accroissement effectif du pouvoir d'achat des travailleurs de 16 % entre 1963 et 1968 [37].

Le but essentiel de la Révolution verte — l'augmentation de la production agricole — semble avoir été atteint partout où elle a été appliquée. Malheureusement les effets parallèles n'ont pas été bénéfiques partout. Nous avons cité l'exemple du Pendjab. Dans cette région, on pourrait parler de réussite à tous les plans. N'oublions pas cependant qu'avant la Révolution verte le système de répartition des terres au Pendjab était parfaitement équitable, ce qui explique largement pourquoi elle y a permis un accroissement de la production et une augmentation du niveau de vie pour l'ensemble de la population.

Que s'est-il passé ailleurs?

La Révolution verte peut, au contraire, accentuer les inégalités fondamentales quand celles-ci préexistent à son application : s'il s'agit de régions où une minorité possède de vastes domaines et une majorité se partage de petits lopins de terre, les gros fermiers sont toujours les premiers à se saisir des innovations techniques, ils sont

plus instruits, plus avertis et ont des capitaux. Bien que les nouvelles variétés de semences ne nécessitent pas obligatoirement l'utilisation de moyens mécaniques, les gros propriétaires les emploient pour obtenir un rendement accru avec moins de main-d'œuvre. S'enrichissant donc, ils achètent de nouvelles terres [38] contraignant les paysans défavorisés à aller grossir les rangs des chômeurs citadins. Pour les plus pauvres, cette innovation technique ne se sera pas traduite par une amélioration mais par une aggravation de leur condition. C'est ce qui s'est passé au Pakistan occidental et au Mexique.

Quelques exemples :

- « Au Pakistan occidental, le revenu d'un ouvrier agricole est aujourd'hui ce qu'il était il y a cinq ans : 100 dollars par an. Mais un propriétaire de 600 ha de terres à blé se félicite d'avoir tiré plus de 100 000 dollars de bénéfice net de sa dernière récolte [39]. »
- « Au Mexique, la Révolution verte a débuté dans les années 1940 : entre 1940 et 1960, la production agricole a augmenté quasi régulièrement de 5 % par an. En 1950, un ouvrier agricole travaillait 194 jours par an et gagnait 68 dollars. En 1960, il n'a plus que 100 jours de travail par an et ses ressources sont réduites à 56 dollars. 80 % de l'accroissement global de la production agricole ont été réalisés dans 3 % des fermes [40]. »

Ces conséquences non prévues de la Révolution verte, même si elles ne signifient pas que sur le plan purement technique elle soit un échec, entraînent dans certaines régions un échec au plan social et humain. Ce qui nous amène à conclure que tous les effets parallèles doivent être prévus et que les modifications de structure indispensables doivent être réalisées avant d'appliquer des techniques nouvelles sur une grande échelle :

« Lorsque l'agriculture émerge de ses formes traditionnelles pour se transformer en une activité à caractère industriel et commercial moderne... il devient de plus en plus impératif de veiller à ce qu'une part juste des bénéfices de cette modernisation revienne à ceux qui travaillent le sol. En vérité, il est difficile de concevoir une modernisation rationnelle des méthodes de production agricole en Amérique latine et en Afrique subsaharienne sans avoir au préalable recensé, enregistré et redistribué plus équitablement les terres [41]. »

Préparer des changements technologiques demande beaucoup

de temps. A tout changement il faut un temps d'adaptation, au cours duquel la population sciemment ou non restructure son système social pour assimiler ce changement. La technologie peut évoluer très rapidement, mais les institutions sociales ou politiques ont une très grande inertie. En outre, ces institutions n'anticipent pas les besoins mais y répondent lorsqu'ils se manifestent.

Nous avons déjà mentionné l'effet des temps de réponse « matériels » (physiques, biologiques...) sur le comportement dynamique du modèle. Nous ne devons pas omettre les temps de réponse « sociaux » : ceux nécessaires à la société pour assimiler un changement déjà effectué ou se préparer à un futur changement. La plupart de ces temps de réponse matériels ou sociaux, réduisent la stabilité de notre écosystème et accroissent la probabilité de « surchauffe ». Ils deviennent des facteurs de plus en plus critiques. En effet, les sociétés subissent des pressions dont l'intensité et la fréquence sont liées au caractère exponentiel de la croissance. Ainsi la population a mis plus d'un siècle pour passer de un à deux milliards, trente ans plus tard, nous avons dépassé le troisième milliard et nous disposons d'à peine vingt ans pour accueillir le quatrième milliard. Et, avant l'an 2000, nous passerons à cinq, six et peut-être sept milliards. La rapidité des progrès techniques nous a jusqu'ici permis de faire face à cette démographie galopante, mais l'humanité n'a pratiquement rien inventé sur le plan politique, éthique et culturel, qui lui permette une évolution sociale aussi rapide.

Problèmes sans solutions techniques

L'histoire de l'urbanisation aux États-Unis est une longue liste de problèmes successifs auxquels on s'est contenté d'apporter des solutions purement techniques. Les villes jeunes croissent rapidement. Le terrain y est abondant, bon marché, de nouveaux immeubles se construisent, la population augmente et l'activité économique se développe. Cependant, le cœur, le centre de la ville, arrive assez rapidement à saturation : c'est la première limite imposée à la croissance démographique et économique d'un secteur. Pour y faire face, on construit des gratte-ciel (ou des tours) : cette construction verticale est la réponse fournie au manque de place au sol. Elle résout momentanément le problème de la population et de l'expansion

économique, mais ne peut empêcher l'apparition d'une nouvelle contrainte : la circulation des personnes et des produits. Celle-ci se ralentit et finit par devenir impossible. Nouvelle solution technique : un réseau de voies express, des transports en commun améliorés et même des héliports sur les terrasses des plus hauts immeubles. Le problème de la circulation à son tour résolu, on construit encore plus haut et la population augmente...

Aujourd'hui, bien des grandes villes américaines ont terminé leur croissance. Certaines même ont vu leur population diminuer depuis 1960 : New York, Chicago, Philadelphie, Baltimore, Detroit. D'autres stagnent comme Washington. D'autres villes poursuivent leur croissance en annexant progressivement les territoires environnants [42], ce qui entraîne un exode progressif de la population du centre vers la périphérie : Los Angeles, Houston, Dallas. Les gens les plus fortunés émigrent vers les quartiers résidentiels des zones suburbaines, tandis que le bruit, la pollution, la misère, la drogue et le crime deviennent le lot des quartiers centraux des grandes cités; New York en fournit un exemple frappant : les conflits sociaux y sont nombreux et le fonctionnement des services publics défaillant. La qualité de la vie au cœur de la ville s'est dégradée. L'arrêt de la croissance est, en partie, imputable à des problèmes sans solutions techniques.

Une solution technique peut être définie comme « une solution ne faisant appel qu'à une modification des applications des sciences physiques et naturelles, et n'impliquant que peu ou pas de changement dans l'échelle des valeurs humaines ou des conceptions éthiques [43] ». Bien des problèmes aujourd'hui ne comportent pas de solution technique, entre autres la course aux armements, le racisme, et le chômage. Même si le progrès technologique dont sont capables nos sociétés dépasse toutes les espérances, ce sera vraisemblablement l'un de ces problèmes sans solutions techniques, ou la combinaison de plusieurs d'entre eux, qui mettront un terme à l'accroissement de la population et des investissements.

Le choix de limites

L'élimination progressive des contraintes de l'environnement grâce aux progrès techniques s'est poursuivie jusqu'à un passé récent avec un tel succès que toute une culture s'est bâtie à partir de cette

foi en la technique. Rares sont ceux qui imaginent devoir apprendre à vivre à l'intérieur de limites rigides lorsque la plupart espèrent les repousser indéfiniment. Cette foi s'est trouvée renforcée par une croyance en l'immensité de la terre et de ses ressources et en la relative insignifiance de l'homme et de ses activités dans un monde apparemment vaste.

Ce rapport entre les limites de la terre et les activités humaines est en train de changer. Les courbes de croissance exponentielle signifiant l'addition de millions d'êtres humains et de milliards de tonnes de polluants chaque année à l'intérieur de l'écosystème. Même l'océan, qui, longtemps, a semblé inépuisable, voit chaque année disparaître, espèce après espèce, poissons et cétacés. Des statistiques récentes de la F.A.O. montrent que le total des prises des pêcheries a pour la première fois depuis 1950 accusé une baisse en 1969, malgré une modernisation notable des équipements et des méthodes de pêche (on trouve par exemple de plus en plus difficilement les harengs de Scandinavie et les cabillauds de l'Atlantique [44]).

Le secteur de l'industrie baleinière est un secteur marginal de l'économie globale mais il fournit l'un des exemples les plus caractéristiques des résultats de l'accroissement sans frein d'une activité dans un cadre matériellement limité : les baleines les plus rentables, les baleines bleues, ont été systématiquement exterminées avec des moyens sans cesse plus puissants et plus perfectionnés. Pour maintenir et accroître le tonnage d'huile produit chaque année, on a mis en œuvre des bateaux de plus fort tonnage, plus rapides et dotés de moyens de traitement plus productifs. En conséquence il a fallu pourchasser et capturer en nombre croissant les baleinoptères dont le rendement en huile était inférieur. Cette seconde espèce puis une troisième étant en voie de disparition, les baleiniers en sont maintenant réduits à chasser le cachalot. C'est l'ultime folie. Déjà depuis les années 1965, le tonnage capturé accuse une baisse sensible. On a voulu que l'industrie baleinière survive à la baleine, ce qui se passe de commentaires ¹.

Est-il préférable de tenter de vivre en deçà de cette limite en acceptant un frein à la croissance ou bien doit-on poursuivre cette croissance

1. Roger Payne, *Among wild whales* in the New York Zoological Society Newsletter, novembre 1968.

jusqu'à ce qu'une autre limite soit en vue avec l'espoir qu'un nouveau bond technologique permette alors de sauter ce nouvel obstacle?

Au cours des derniers siècles, les hommes ont suivi cette dernière voie avec tellement de constance et de réussite qu'ils en ont oublié la première.

S'entendre affirmer que l'expansion démographique et la croissance économique devraient *bientôt* s'arrêter peut paraître désagréable. Mais qui prétendra que la croissance « matérielle » puisse se poursuivre indéfiniment sur cette terre? Au tournant de l'histoire où nous nous trouvons, l'alternative évoquée ci-dessus est valable dans la quasi-totalité des domaines de l'activité humaine. L'homme peut encore choisir ses limites et arrêter sa course quand il lui plaira, en atténuant certaines des puissantes motivations qui sont à la base de l'expansion démographique et de la croissance économique ou en les équilibrant par des motivations antagonistes ou encore en combinant les deux actions.

Une telle réaction n'ira sans doute pas sans désagréments. Elle impliquerait certainement de profonds changements dans les structures sociales et économiques dont des siècles de croissance ont laissé l'empreinte dans notre culture.

Sinon, il ne lui restera plus qu'à attendre que le prix de la technologie soit devenu prohibitif pour la société, que les effets parallèles du progrès mettent eux-mêmes un terme à la croissance ou que surviennent des problèmes qui ne comportent aucune solution technique. Dans l'un ou l'autre de ces cas, il n'y aura plus de choix de limites possible. La croissance se trouvera bloquée par des phénomènes qui échapperont au contrôle de l'homme et à ce stade, comme le modèle global le suggère, les inconvénients seront d'une nature et d'une gravité tout autres que ceux résultant de restrictions volontairement consenties.

Si nous avons si longuement insisté sur les implications de la technologie, *c'est parce que la foi en la technologie est un comportement très répandu*¹ qui suscite les réactions les plus courantes et les plus dangereuses aux conclusions de notre modèle. *Le progrès technique peut atténuer les symptômes d'une maladie du système, mais il n'en éliminera pas la cause profonde.* Cette croyance en la technologie comme panacée détourne notre attention du problème le plus fonda-

1. N.D.T. : Trop répandu!

mental — celui de la croissance dans un domaine fini — et nous empêche d'en rechercher les solutions.

Il n'est cependant pas question pour nous de vouer le progrès technique aux gémonies : il n'est ni foncièrement mauvais, ni futile, ni inutile. Nous-mêmes sommes des technologues, travaillant dans un Institut de Technologie. Nous croyons — et nous nous efforcerons de le démontrer au chapitre suivant — que beaucoup des solutions techniques : recyclage, systèmes antipollution, contraceptifs, seront absolument vitales pour l'avenir de l'humanité si elles sont appliquées conjointement à des mesures délibérées de ralentissement de la croissance. Nous serions aussi opposés à un refus irraisonné des bienfaits de la technologie que nous le sommes à une foi aveugle en son omnipotence : *Pas d'opposition aveugle au progrès, mais une opposition au progrès aveugle.*

Nous souhaiterions que placée devant une nouvelle avance technologique, chaque société humaine se pose d'abord trois questions avant de l'adopter et d'en généraliser l'application :

1. Quels seront les effets parallèles, tant au plan social qu'au plan matériel, d'une application généralisée de cette invention?
2. Quels seront les changements sociaux nécessaires avant que l'on puisse la mettre en œuvre correctement et combien de temps faudra-t-il pour accomplir ces changements?
3. Si cette invention est vraiment efficace et permet d'éliminer un obstacle matériel à la croissance, quelle sera la limite suivante que rencontrera le système en expansion? Doit-on préférer les contraintes inhérentes à cette dernière limite à celles que l'invention est destinée à supprimer?

Nous pouvons maintenant aborder l'étude des solutions « non techniques » aux problèmes de la croissance dans un système fini.

5.

L'état d'équilibre global

Au cours de chapitres précédents, nous avons vu que les boucles positives du système global opérant sans restrictions conduisaient à la croissance exponentielle de toutes les grandeurs mises en jeu. Dans l'écosystème mondial, il existe deux boucles positives dominantes qui conduisent à la croissance exponentielle de la population et des investissements industriels.

Dans tout système fini, il faut qu'il existe des contraintes dont l'action contribue à l'arrêt de la croissance exponentielle. Ces contraintes sont représentées par des boucles négatives. Leur action est d'autant plus importante que l'on s'approche de la limite ultime ou seuil de tolérance de l'environnement pour le système considéré. Finalement, l'action des boucles négatives contrebalance celle des boucles positives ou l'emporte sur cette dernière et met un terme à la croissance. Dans le système mondial, ces boucles négatives représentent des processus comme ceux de la pollution de l'environnement, de l'épuisement des ressources naturelles et de la famine. Les temps de réponse — ou retards — inhérents à la structure de ces boucles négatives favorisent le dépassement des seuils admissibles pour la population et les investissements. Pendant toute la durée de ce dépassement, on assiste à un formidable gaspillage de ressources naturelles. Ce gaspillage entraîne généralement un abaissement du seuil de tolérance de l'environnement (*cf.* chapitre 3), accélérant le déclin final de la population et des investissements.

On connaît déjà de nombreux cas de ces contraintes tendant, par le canal des boucles négatives, à limiter, voire arrêter, la croissance ¹.

1. N.D.T. : Notamment à la fin du chapitre 4 : déclin de la population des grandes cités américaines.

En général, les sociétés ont réagi en s'attaquant aux boucles négatives elles-mêmes. Les solutions techniques, telles que celles qui ont été évoquées au chapitre 4, ont été conçues en vue d'affaiblir la réaction des boucles, ou de changer l'aspect des contraintes réelles qu'elles engendrent de manière à permettre à la croissance de se poursuivre. De telles mesures peuvent paraître efficaces à court terme, en ce sens qu'elles atténuent les contraintes à la croissance, mais, à long terme, elles ne pourront empêcher un dépassement du niveau critique et l'effondrement subséquent du système.

L'autre solution aux problèmes nés de la croissance serait d'affaiblir l'action des boucles positives qui entretiennent le caractère exponentiel de cette croissance. Nous ne pensons pas qu'une telle solution ait jamais été reconnue comme légitime par aucune société moderne et nous sommes pratiquement certains qu'aucune tentative n'a été faite pour la mettre en application. Quelle politique impliquerait une telle solution? Quel monde en résulterait-il? Il n'y a pas, à notre connaissance, de précédent historique à une telle approche et il ne reste pas d'autre solution que de l'étudier à partir de modèles. Comment le modèle global se comporterait-il si nous y introduisons les éléments d'une politique destinée à contrôler, de propos délibéré, la croissance? Est-ce que ce changement de politique aboutirait à un « meilleur » mode de comportement?

Lorsque nous utilisons des mots tels que « meilleur » et commençons à discriminer entre les résultats fournis par l'ordinateur, nous, les expérimentateurs, introduisons dans le programme des données qui traduisent nos préférences. Cependant nous ne modifions en aucune façon les données qui quantifient les relations fondamentales de cause à effet. Les valeurs de ces données sont les valeurs réelles que nous connaissons, fournies par des statistiques contrôlées, ou tout au moins des valeurs probables avec le meilleur degré de probabilité qu'il soit possible d'afficher en fonction des informations disponibles. Nous avons cependant le droit, nous-mêmes ou nos lecteurs, d'envisager des hypothèses qui soient en concordance avec notre conception d'une échelle de valeurs. Nous avons déjà affirmé notre système de valeurs en rejetant comme indésirable tout phénomène de « surchauffe » entraînant un effondrement du système.

Maintenant que nous recherchons un « meilleur » résultat, nous devons définir aussi clairement que possible la finalité de ce système.

Ce que nous voulons, c'est que l'ordinateur nous fournisse la représentation d'un éco-système mondial qui soit :

1. Capable d'atteindre un régime de croisière sans risques d'effondrement brutal et incontrôlable;
2. Capable de satisfaire tous les besoins matériels fondamentaux de tous les individus vivant sur cette terre.

Examinons maintenant les mesures à prendre, les politiques à suivre, pour que ce mode de comportement apparaisse dans le modèle global.

Contraintes délibérément exercées sur les facteurs de croissance

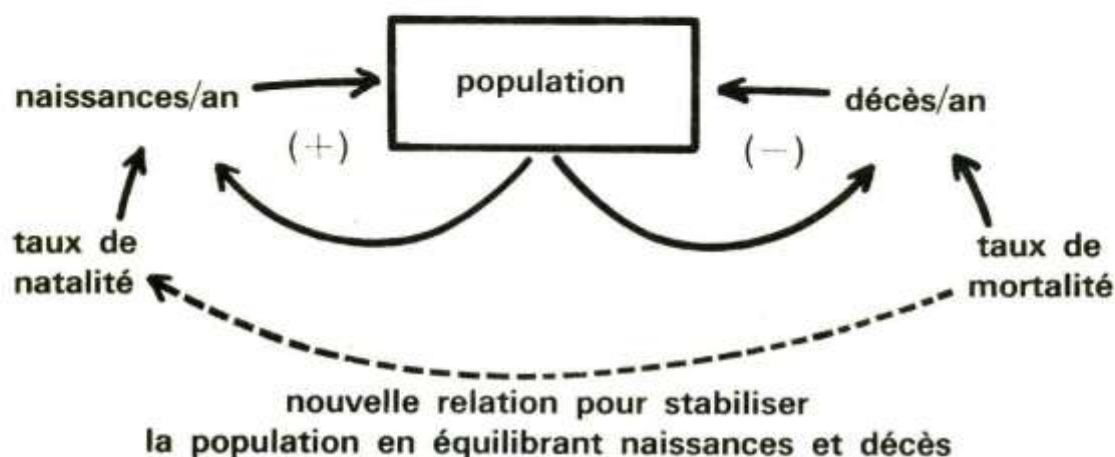
On se rappelle que la boucle positive régissant l'évolution de la population comporte comme variables le taux de natalité et les facteurs socio-économiques qui font varier celui-ci. En face, se trouve la boucle négative caractérisée par le taux de mortalité.

La croissance stupéfiante de la population mondiale est un phénomène récent résultant essentiellement d'une réduction victorieuse de la mortalité¹ dans toutes les parties du monde, le taux de natalité brut restant sensiblement inchangé. Il n'y a que deux façons de rétablir l'équilibre : ou abaisser le taux de natalité au niveau du nouveau taux réduit de mortalité, ou il faudra bien que le taux de mortalité augmente à nouveau. On a vu qu'en laissant le système poursuivre « naturellement » son évolution exponentielle, la croissance de la population se trouvait fatalement stoppée par un accroissement brutal de ce taux de mortalité. Toute société qui tient à éviter ce résultat doit prendre des mesures délibérées pour contrôler le fonctionnement de la boucle positive : réduire le taux de natalité.

Dans un modèle dynamique, il est très simple de corriger une boucle positive. Pour l'instant, nous faisons abstraction de l'aspect politique du problème et utilisons le modèle pour déterminer les implications purement mathématiques de la limitation de la croissance de la popu-

1. N.D.T. : Et plus particulièrement de la mortalité infantile depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. Nous en sommes actuellement à la deuxième génération depuis cette époque.

lation. Il nous suffit d'ajouter une boucle à notre programme, reliant le taux de natalité aux taux de mortalité. En d'autres termes, nous demandons que le nombre de bébés à naître au cours d'une année donnée ne soit pas supérieur au nombre de morts prévisibles la même année. Les actions des boucles positive et négative se trouvent rigoureusement équilibrées. Lorsque l'amélioration de l'alimentation et de l'hygiène entraînent une réduction supplémentaire de la mortalité, il faut encore faire baisser d'autant le taux de natalité. Un tel impé-



ratif, aussi simple à satisfaire mathématiquement que difficile à faire passer dans la réalité sociale n'est à nos yeux, qu'une hypothèse de travail : nous n'en faisons pas nécessairement une recommandation politique¹. Les conséquences de cette hypothèse sont données figure 39 (politique supposée appliquée à partir de 1975).

Analysons les résultats fournis par la figure 39 :

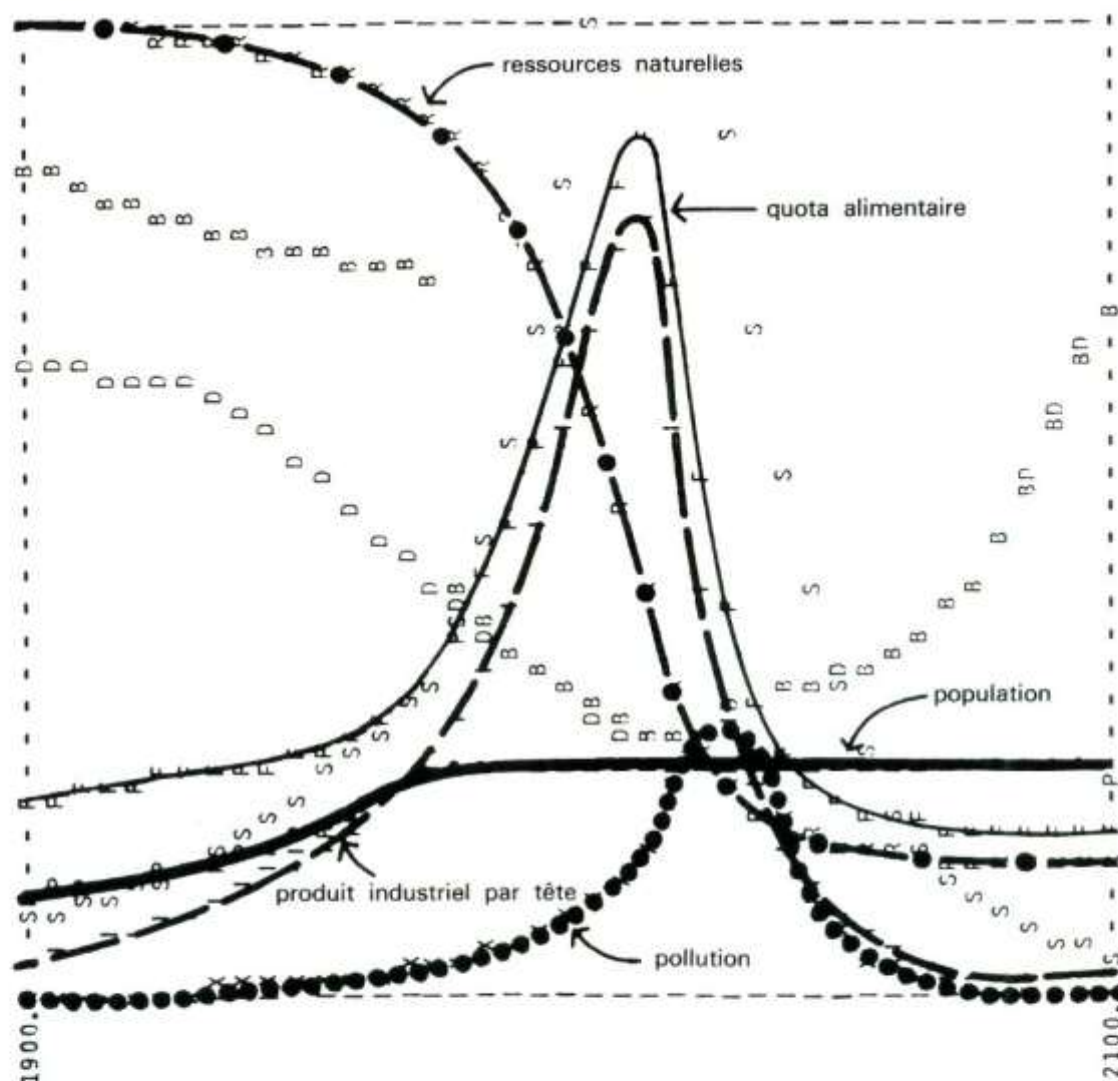
- La boucle positive est effectivement équilibrée par la boucle négative, et la population demeure constante.
- Au début, les taux de natalité et de mortalité sont faibles, mais il y a encore une boucle positive incontrôlée qui intervient dans le modèle — celle qui régit la croissance des investissements industriels. La courbe des investissements croît alors que la population est stabilisée, ce qui aboutit à un accroissement rapide des revenus individuels, des rations alimentaires et des services. Cette croissance est cependant vite arrêtée par l'épuise-

1. Cette suggestion a été initialement proposée par Kenneth E. Boulding *The Meaning of the 20th Century* (N.Y. Harper and Row, 1964).

ment des ressources naturelles. Le taux de mortalité croît mais la population totale ne diminue pas puisque notre hypothèse de départ suppose que le taux de natalité continue à l'équilibrer : nous voici loin de la réalité.

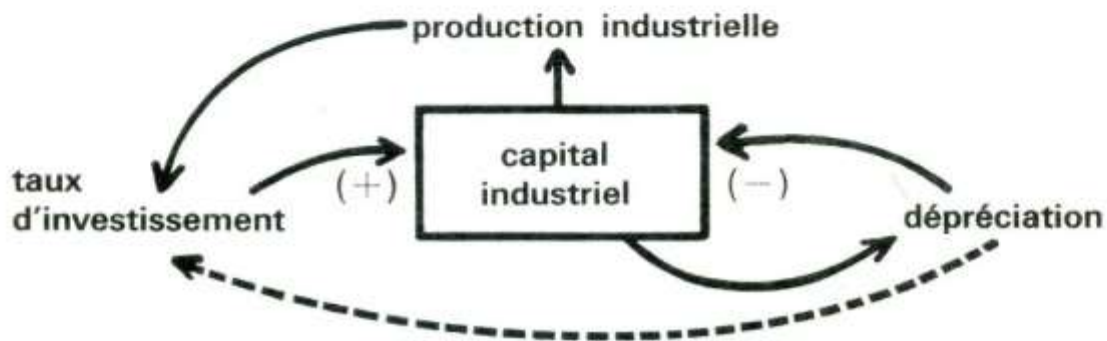
Si nous voulons un système stable, il semble donc qu'il faille s'attaquer *deux* boucles positives critiques qui engendrent une croissance

Figure 39. — Comportement du modèle global avec une population stabilisée



Les hypothèses retenues ici sont celles de la figure 31, sauf une : Nous avons supposé qu'à partir de 1975, la population se trouvait stabilisée en égalant taux de mortalité et taux de natalité. La boucle positive du système population-capital qui reste libre de toute contrainte, est celle qui entraîne la croissance du capital industriel. Cette boucle continue à engendrer une croissance exponentielle par tête d'habitant, du produit industriel, de l'alimentation et des services. L'épuisement des ressources naturelles provoquera un effondrement brutal de l'industrie.

incontrôlée. Stabiliser uniquement la population ne suffit pas à empêcher la surchauffe et l'effondrement. De même un passage similaire avec pour hypothèses de base un capital constant et une population croissante montre que la seule stabilisation des investissements ne suffit pas davantage. Qu'arrive-t-il si nous contrôlons les deux boucles simultanément? Nous pouvons stabiliser le niveau des investissements dans le modèle en posant pour principe que le taux d'investissement reste égal aux taux de dépréciation du capital, à l'aide d'une boucle analogue à celle que nous avons utilisée pour la régulation de la population.



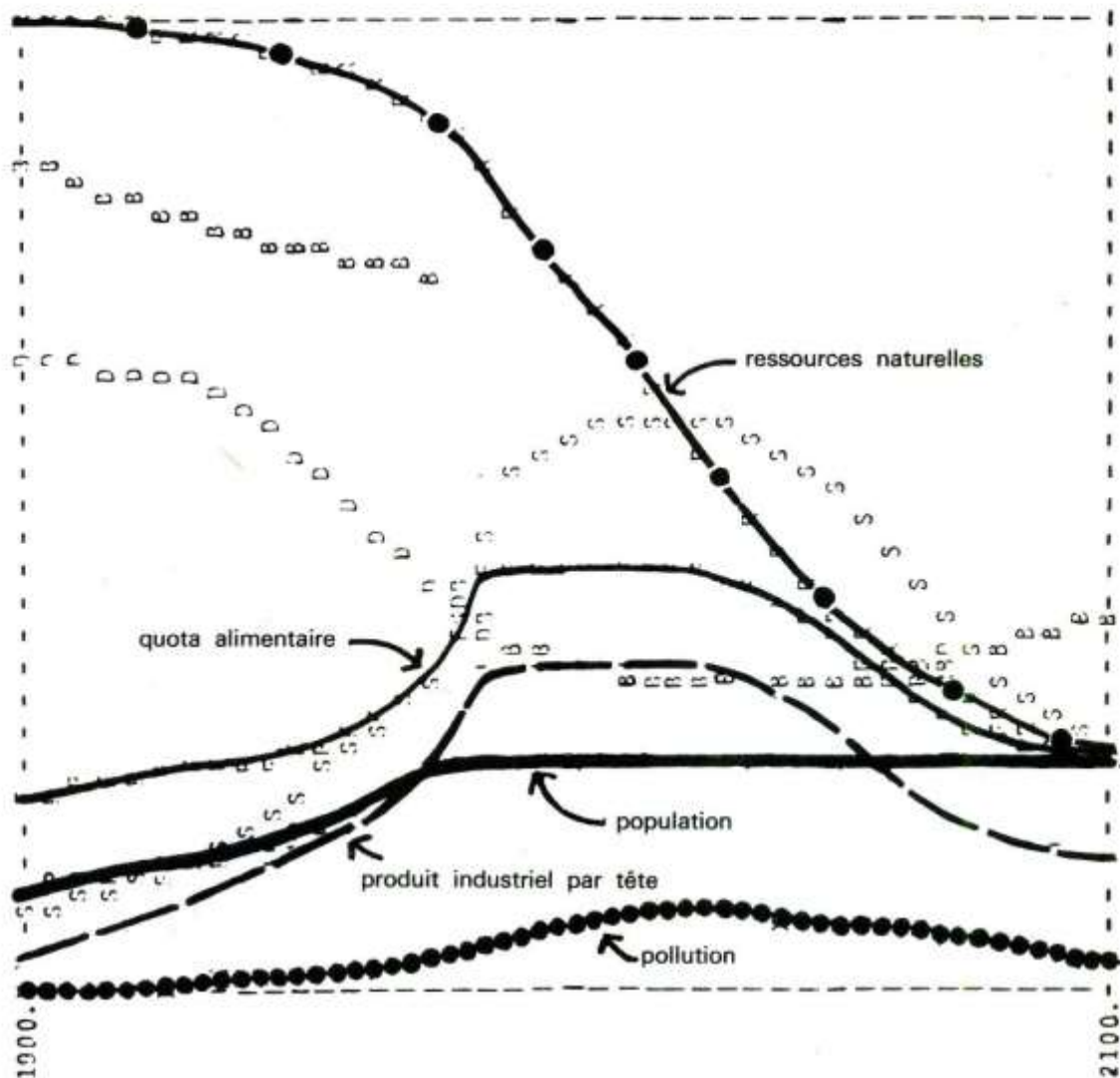
Nouvelle relation pour stabiliser le capital en équilibrant les taux d'investissement et de dépréciation.

La figure 40 résume les résultats d'un arrêt de la croissance de la population en 1975 suivi en 1985 d'un arrêt de la croissance des investissements, sans autre changement. (Le décalage entre les deux mesures de stabilisation est intentionnel afin de permettre une légère amélioration du niveau de vie matériel moyen à l'échelle du globe.) Ces mesures permettent d'éviter la tragique surchauffe et l'effondrement prévus sur la figure 44. La population et les investissements restent constants avec en corrélation, un niveau relativement élevé de la ration alimentaire, du produit industriel et de la valeur des services par personne.

Néanmoins la diminution des réserves naturelles réduit la production industrielle et cet état d'équilibre relatif dégénère en fin de compte.

Quelles hypothèses devons-nous formuler pour obtenir simultanément un niveau de vie décent et une stabilité plus grande que dans le cas précédent (fig. 40)? Nous pouvons améliorer considérablement le comportement du modèle en combinant des changements de technologies avec des changements de valeurs, afin de réduire les tendances à la

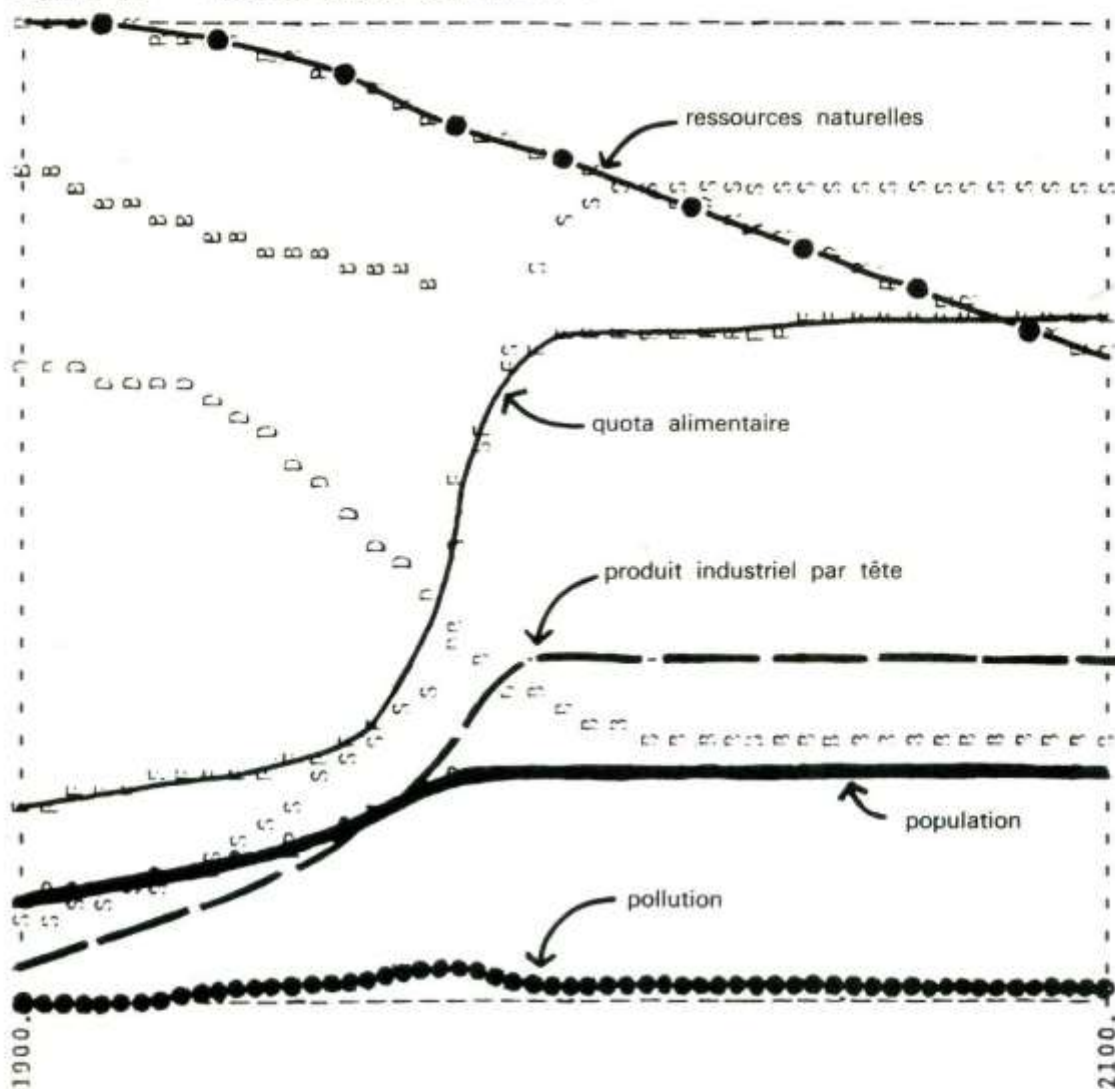
Figure 40. — Comportement du modèle global avec capital et population stabilisés



La politique de stabilisation de la population (fig. 39) est maintenue. Nous y ajoutons une politique de stabilisation du capital grâce à une égalisation des taux d'investissement et de dépréciation. La croissance exponentielle est alors arrêtée et on parvient à un état temporairement stable. Dans cet état d'équilibre, les niveaux de la population et du capital sont suffisamment élevés pour provoquer un épuisement rapide des ressources naturelles, aucune hypothèse relative à un recyclage de ces ressources n'ayant été formulée. Au fur et à mesure de l'épuisement de ces ressources, la productivité décroît ainsi que la production industrielle. Bien que le capital soit maintenu à un niveau constant, son rendement baisse puisque une fraction de plus en plus grande doit être consacrée à l'obtention de nouvelles ressources plutôt qu'à la production de biens d'équipement ou de consommation.

croissance à l'intérieur du système. Différentes combinaisons nous donnent une série de résultats représentant un système dans lequel le niveau du produit industriel par tête est raisonnable, et la stabilité durable. Un exemple en est donné figure 41.

Figure 41. — Modèle global stabilisé n° 1



Outre les politiques de régulation mentionnées à la figure 40, des mesures techniques sont prises pour parvenir à un état d'équilibre se maintenant dans un avenir lointain. Ces mesures techniques comprennent : le recyclage des ressources naturelles, l'utilisation de dispositifs anti-pollution, l'accroissement de la durée de vie de toutes les formes de capital, et l'utilisation de méthodes de reconstitution des sols. Des changements interviennent dans l'échelle des priorités : la production de denrées alimentaires et les services l'emportent sur la production industrielle. Comme dans la figure 40, le taux de natalité est déterminé de manière à compenser le taux de mortalité et le taux d'investissements équilibre le taux de dépréciation du capital. La valeur d'équilibre du produit industriel par tête d'habitant équivaut à trois fois la moyenne mondiale de 1970.

Les hypothèses que nous avons introduites dans le programme sont les suivantes :

1. La population est stabilisée en équilibrant les taux de natalité et de mortalité dès 1975. Les investissements croissent « naturellement » jusqu'en 1990, date à partir de laquelle ils sont stabilisés à leur tour en ajustant le taux d'investissement au taux de dépréciation du capital.

2. Pour éviter une pénurie de ressources naturelles non renouvelables, telle celle illustrée par la figure 40, la consommation de matières premières par unité de produit industriel est réduite au quart de sa valeur de 1970 (cette mesure et les suivantes sont prises à partir de 1975).

3. Pour réduire encore la consommation des ressources naturelles et la pollution, on suppose que les sociétés ont été amenées à consacrer davantage de leurs revenus à l'obtention de services (éducation, hygiène, soins médicaux) qu'à l'achat de produits fabriqués. (Cette évolution se traduit dans le modèle par la relation donnant le niveau des services par tête « nominal » ou « souhaité », en fonction de l'accroissement des revenus individuels).

4. Le taux de pollution par unité de produit agricole ou industriel est réduit au quart de sa valeur de 1970.

5. Les quatre mesures précédentes, si elles étaient les seules appliquées, conduiraient à des rations alimentaires relativement faibles, et bien des individus seraient encore mal nourris, si les inégalités traditionnelles dans la répartition subsistaient. Pour éviter cet inconvénient, l'accent sera placé sur la nécessité de produire suffisamment de nourriture pour *tous* les individus. Des capitaux seront transférés dans le secteur agricole et celui des industries alimentaires même si ces investissements ne sont pas considérés comme « rentables ». (La relation : ration alimentaire « nominale », régit, dans le programme, la fraction de la production industrielle qui doit être consacrée à l'agriculture.)

6. Une agriculture basée sur les énormes investissements indispensables à la production d'une quantité satisfaisante de denrées alimentaires, pourrait rapidement conduire à une érosion rapide des sols et à une baisse tragique des rendements, hypothéquant la stabilité à long terme du secteur agricole. L'utilisation des investissements agricoles

a donc été modifiée de manière à donner la priorité à l'enrichissement des sols et à leur conservation. Cette politique suppose, par exemple, des investissements consacrés au traitement des déchets organiques urbains et à leur réutilisation comme engrais. Cette pratique aurait en outre l'avantage de réduire la pollution.

7. Les prélèvements effectués sur le capital industriel au profit de l'agriculture, des services, du recyclage et du contrôle de la pollution dans les six conditions ci-dessus aboutiraient finalement à une réduction substantielle du niveau des investissements industriels. Pour contrebalancer cet effet, il faudra élever la durée de vie moyenne du capital industriel, ce qui implique une meilleure conception des machines et des produits destinés à leur conférer une durée bien plus grande, ainsi que la possibilité de réparation et de rénovation. Le matériel ne devra plus se périmer aussi rapidement qu'aujourd'hui. Cette mesure contribuera également à diminuer la pollution et la consommation des matières premières.

Sur cette figure 41, on voit que la population est à peine supérieure à la population actuelle. La ration alimentaire est le double de celle de 1970, et l'espérance de vie moyenne dans le monde est de près de 70 ans. Le produit industriel par tête est bien supérieur au niveau actuel. Quant aux services, ils atteignent trois fois ce niveau. Le revenu total moyen par tête (produit industriel, ration alimentaire et services) est de l'ordre de 1 800 dollars. Cette valeur, qui représente la moitié du revenu moyen actuel aux États-Unis, est sensiblement égale au revenu européen, et atteint le triple du revenu mondial moyen par tête pour 1970. Les ressources naturelles s'épuisent comme il est inévitable à partir de toute hypothèse réaliste, mais le rythme de consommation de ces ressources est si faible qu'il reste une marge de temps suffisamment élevée à la recherche scientifique et à la recherche appliquée pour trouver des solutions de rechange.

Les constantes numériques, qui caractérisent ce passage en machine ne sont pas les seules qui soient susceptibles d'engendrer un système stable. D'autres personnes, d'autres groupes sociaux pourraient résoudre les divers problèmes différemment, en insistant plus ou moins sur l'un ou l'autre des paramètres essentiels : services, ration alimentaire, pollution, niveau de vie matériel. Cet exemple est uniquement destiné à montrer les niveaux de la population et des investissements qui peuvent être *matériellement maintenus* sur terre, dans les hypo-

thèses les plus optimistes. *Le modèle ne prétend pas dire comment parvenir à ces niveaux.* Il peut seulement indiquer une série cohérente d'objectifs accessibles.

Retournons maintenant à l'écosystème réel et abandonnons quelque peu nos hypothèses irréalistes : c'est-à-dire la possibilité de stabiliser brutalement et efficacement la population et les investissements. Supposons que nous retenions six des sept grandes lignes que nous avons introduits pour aboutir aux résultats de la figure 41, mais remplaçons la première proposition qui prendrait effet en 1975, par la suivante :

1. La population peut pratiquer à 100 % la régulation des naissances.
2. La famille souhaitée comprend deux enfants.
3. Le système économique s'efforce de maintenir le produit industriel par tête au niveau de 1975. La capacité excédentaire des industries est utilisée pour produire des biens de consommation plutôt que pour élever le taux d'investissement au-dessus du taux de dépréciation.

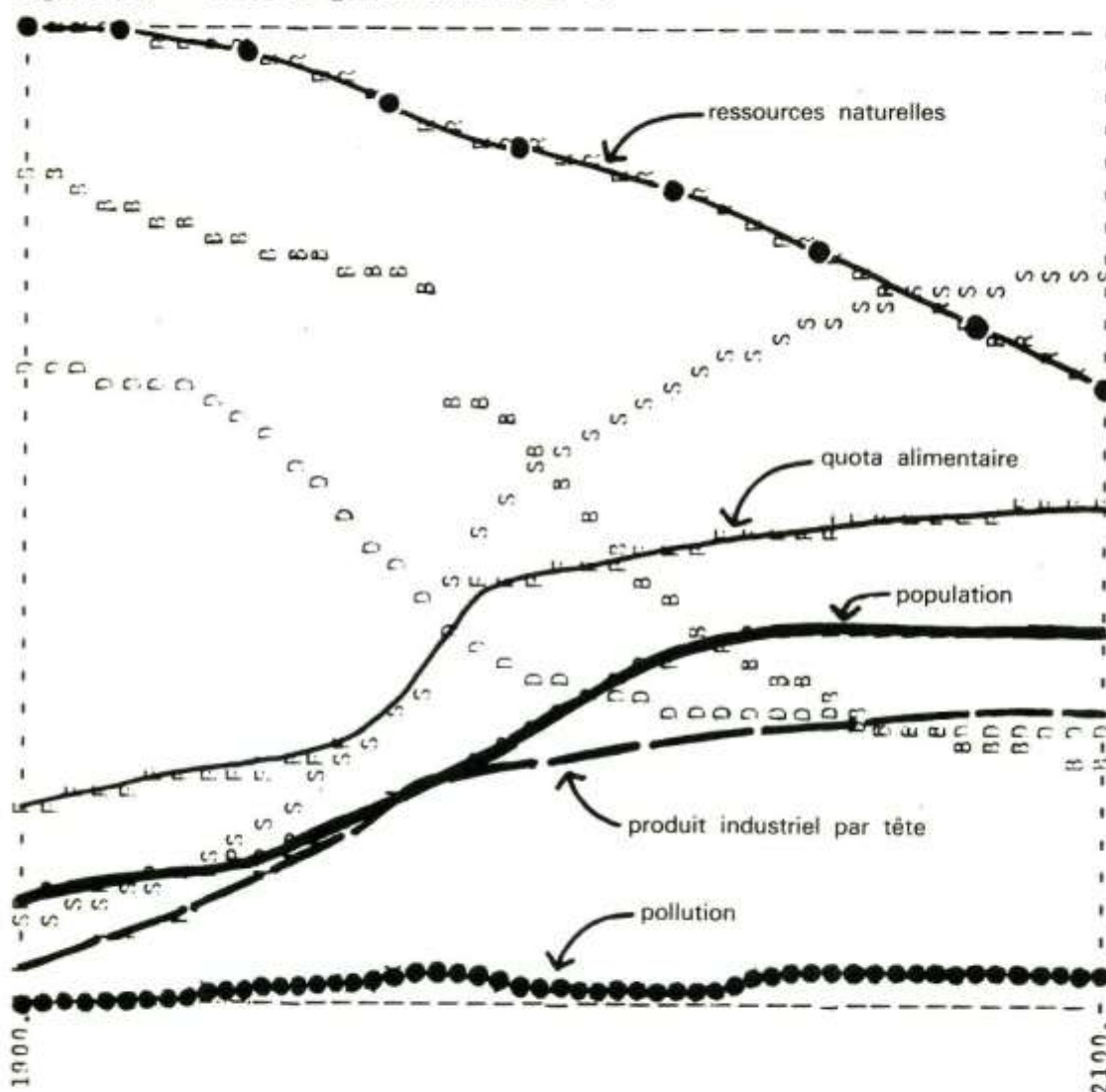
Avec ce nouveau jeu de données, le comportement du modèle est celui illustré par la figure 42 : Les temps de réponse à l'intérieur du système permettent à la population d'atteindre un niveau supérieur à celui de la figure 41. En conséquence, les quota individuels en matière de produits manufacturés, denrées alimentaires et services, restent inférieurs à ceux que nous avons précédemment obtenus sur machine (mais néanmoins supérieurs aux moyennes mondiales actuelles).

Nous ne pensons pas que l'une quelconque des mesures requises pour rendre le modèle stable puisse ou doive, effectivement et sans préavis, être prise en 1975. Une société dont la finalité est la *stabilité*, doit tendre vers cet objectif par approches successives. N'oublions pas pourtant que plus longtemps on permet un développement exponentiel, plus faibles sont les chances de parvenir à un équilibre final. La figure 43 montre ce qu'il adviendrait si, au lieu de prendre dès 1975 les mesures préconisées ci-dessus (fig. 42), on attendait l'an 2000 pour les mettre en application.

D'après la figure 43, la population et le produit industriel par tête atteignent des valeurs nettement supérieures à celles données figure 42. En conséquence, la pollution croît et le stock de ressources naturelles est sérieusement entamé, bien que l'on ait finalement pris des mesures

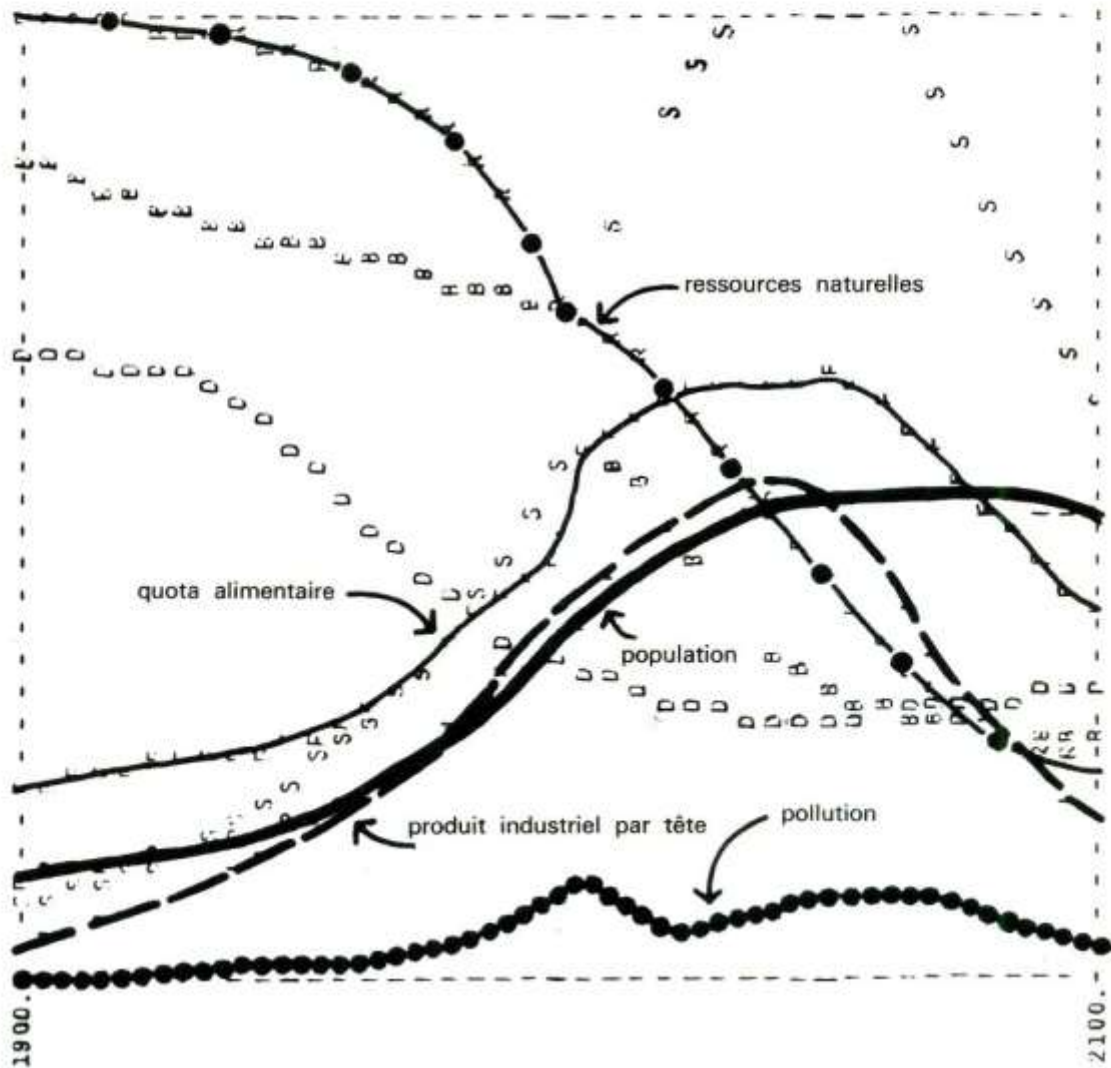
pour économiser les matières premières de base. En fait, pendant les 25 ans que l'on a laissé s'écouler avant d'intervenir, l'humanité aura consommé en ressources naturelles l'équivalent de 125 ans de consommation dans le cadre de l'hypothèse précédente (fig. 42)!

Figure 42. — Modèle global stabilisé n° 2



Si les mesures draconiennes de freinage de la croissance, mentionnées à la figure 41, étaient assouplies et si la population et le capital se trouvaient régulés dans les délais naturels inhérents au système, le niveau d'équilibre de la population se situerait au-dessus du niveau de la figure 41 et le niveau d'équilibre du capital au-dessous. On suppose dans ce cas qu'il existe des méthodes efficaces de contrôle des naissances mises en application en 1975 et qu'à cette date la famille moyenne souhaitée se compose de deux enfants. Le taux de natalité se rapproche progressivement mais lentement du taux de mortalité par suite de retards inhérents à la pyramide des âges de la population mondiale.

Figure 43. — Modèle global avec des mesures de stabilisation prises en 2000



Si la mise en application des mesures prévues pour 1975 se trouvait retardée jusqu'en l'an 2000, l'état d'équilibre ne pourrait être maintenu. Le niveau de la population et du capital industriel atteindrait des valeurs suffisamment élevées pour entraîner, avant 2100, une pénurie de nourriture et de ressources naturelles.

Certains penseront que les modifications que nous avons apportées au modèle en vue d'éviter le processus surchauffe-effondrement sont non seulement impossibles, mais désagréables, dangereuses, pour ne pas dire désastreuses. Des mesures telles que la réduction du taux de natalité et des investissements consacrés à la production des biens de

consommation, quelles qu'en soient les modalités d'application, se révèlent « contre nature » et « propres à dépasser l'entendement », car, de mémoire humaine, elles n'ont jamais été mises à l'épreuve, ou même sérieusement envisagées. En vérité, nous ne trouverions que peu à redire au fonctionnement des sociétés modernes, si nous pensions que le processus de croissance illimitée qui les caractérise actuellement devait finalement amener le paradis sur terre.

Mais, tout nous prouve que sur les trois hypothèses possibles : croissance illimitée, limitation volontaire de la croissance et limitation imposée par l'environnement naturel — seules les deux dernières sont plausibles.

Accepter que la nature se venge des agressions de l'homme ne demande pas plus d'effort intellectuel que de « laisser courir et voir venir ». Adopter un tel comportement, nous l'avons maintes fois démontré, c'est finalement courir au déclin incontrôlé de la population et des investissements par voie de catastrophes successives.

La signification réelle d'un tel effondrement, pour l'humanité, est difficile à imaginer. La récession peut prendre différentes formes. Elle peut être sporadique ou globale, soudaine ou progressive.

Si la première limite atteinte était celle de la production des denrées alimentaires, ce sont les pays non encore industrialisés qui enregistreraient les plus fortes baisses de population. Si les ressources naturelles tombaient en dessous du seuil critique, la récession toucherait d'abord les nations industrialisées. Cette récession pourrait ne pas atteindre le seuil de tolérance pour le maintien de la vie animale et végétale ou, au contraire, pourrait atteindre des proportions telles qu'il soit franchi d'une manière irréversible. Dans ce dernier cas, quelle que soit la fraction de la population qui survivrait, il resterait bien peu de choses sur terre permettant un nouveau départ et la création de sociétés nouvelles sous quelque forme actuellement envisageable que ce soit.

Consentir à une limitation volontaire de la croissance demanderait beaucoup d'efforts. Il faudrait apprendre à faire beaucoup de choses autrement, il faudrait faire appel à l'imagination, à l'ingéniosité, à la souplesse et à l'autodiscipline des hommes. Mettre fin de façon délibérée à la croissance est un pari difficile à tenir. Le résultat final sera-t-il à la mesure de l'effort consenti ? Qu'a l'humanité à gagner en opérant une telle transition ? Et qu'a-t-elle à y perdre ?

Regardons de plus près ce que pourrait être un monde stable.

L'état d'équilibre

Dans l'histoire écrite de l'humanité, nous ne sommes certes pas les premiers à proposer aux sociétés humaines une sorte d'état de non-croissance. Bien des philosophes, des économistes, des biologistes ont évoqué un tel état d'équilibre et lui ont donné autant de noms différents que de significations¹.

Après bien des discussions, nous avons décidé de donner le qualificatif d'*équilibre* à un état caractérisé par une population et un capital global constants. « Équilibre » signifie que dans un écosystème mondial réel, les forces qui engendrent l'accroissement de la population et des investissements (désir d'une grande famille, manque d'efficacité des méthodes de birth-control, taux d'investissements élevés) et celles qui induisent une diminution de ces mêmes grandeurs (manque de nourriture, pollution, taux de dépréciation élevée ou obsolescence du matériel productif) sont égales et opposées.

On doit entendre par « capital » l'ensemble des investissements consacrés aux services, à l'industrie et à l'agriculture. *L'état d'équilibre global est donc caractérisé par une population et un capital essentiellement stables, les forces qui tendent à les accroître ou à les diminuer étant soigneusement équilibrées.*

Le cadre de cette définition est relativement large. Nous avons seulement spécifié que les niveaux de la population et du capital demeuraient constants, mais ils peuvent l'être, seuls ou l'un et l'autre,

1. Voir, par exemple :

Platon, *Les lois*, 350 av. J.-C.

Aristote : *Politique*, 322 av. J.-C.

Thomas Robert Malthus : *Essai sur le principe de la population*, 1798.

John Stuart Mill : *Principes d'économie politique*, 1857.

Harrison Brown : *The Challenge of Man's Future* (New York, Viking Press, 1954).

Kenneth E. Boulding, « The Economics of the Coming Spaceship Earth » in *Environmental Quality in a Growing Economy*, ed. H. Jarrett (Baltimore, md : John Hopkins Press, 1966).

E. J. Mishan : *The Costs of Economic Growth* (New York : Frederick A. Praeger, 1967).

Herman E. Daly : « Towards a Stationary — State Economy » in *The Patient Earth*, ed. J. Harte and Robert Socolow (New York : Holt, Rinehart, and Winston, 1971).

à un niveau bas ou élevés. Un réservoir d'eau peut être maintenu à un niveau constant avec une vanne d'entrée et un clapet de vidange largement ouverts, ou bien simplement au moyen d'un mince filet d'eau à l'arrivée et à la sortie. Si le débit est élevé aux deux extrémités, la goutte d'eau élémentaire restera moins longtemps dans le réservoir que si le débit est très faible. On peut de même concevoir la stabilité du niveau de la population en envisageant les taux de natalité et de mortalité également élevés; dans ce cas, la durée moyenne de la vie est courte. Au contraire, on peut se baser sur des taux de natalité et de mortalité très faibles et la vie est longue. Ce qui est vrai pour la population l'est également pour le capital. Dans ce cas, la régulation s'effectuera sur les taux d'investissement et de dépréciation. Toutes les combinaisons de ces données entrent dans le cadre de notre définition.

Quels critères nous permettront de faire un choix entre toutes les options possibles? Les interactions dynamiques à l'intérieur du système montrent que le premier facteur dans la décision est le temps.

Combien de temps cet état d'équilibre devra-t-il durer ?

Si les sociétés humaines jugent que six mois ou un an suffisent, le modèle indique qu'il est possible de maintenir la population et le capital à presque n'importe quel niveau. Si, au contraire, on veut maintenir cet état d'équilibre pendant vingt ou cinquante ans, le choix est beaucoup plus réduit : taux et niveaux doivent être ajustés de sorte que les investissements ne soient pas freinés par une pénurie de ressources naturelles¹ au cours de la période considérée ou bien que la faiblesse de la ration alimentaire et la pollution ne causent une remontée brutale du taux de mortalité. Plus longtemps l'état d'équilibre devra être maintenu, plus bas devront être les taux et les niveaux.

Bien entendu cet état d'équilibre ne saurait se poursuivre indéfiniment, mais cette limite pourra être reculée d'autant plus que les res-

1. N.D.T. : On se souviendra qu'il existe aussi une pénurie « économique » : les gisements les plus riches étant épuisés, il reste encore des possibilités de se procurer des matières premières mais à un prix de revient qui entraîne le déséquilibre du système.

sources seront rationnellement utilisées et si l'on dispose de suffisamment de temps pour une planification à long terme.

Prenons par exemple un horizon raisonnable : l'espérance de vie d'un enfant qui naîtra demain. La moyenne, si la ration alimentaire et les soins médicaux sont corrects, est estimée à 70 ans. Comme la plupart des hommes consacrent une part notable de leur temps et de leur énergie à élever des enfants, la moindre des choses qu'ils aient à faire c'est s'efforcer de rendre la société qu'ils leur laisseront au moins viable, pour toute la vie de leur enfant.

Si nous prenons un horizon à 70 ans, les niveaux admissibles de la population et du capital peuvent ne pas être tellement différents de ce qu'ils sont aujourd'hui, comme l'indique la figure 42 (qui ne représente qu'une parmi plusieurs possibilités). Toutefois, les taux seront loin d'avoir la même valeur que nos taux actuels. Le souhait élémentaire de tout homme normal étant de vivre le plus longtemps possible et en bonne santé, on donnera toujours la préférence, dans n'importe quelle société, à un taux de mortalité bas. Pour maintenir l'équilibre avec une longue espérance de vie, il faut alors un taux de natalité faible. Il serait aussi souhaitable de maintenir aussi bas que possible les taux d'investissement et de dépréciation du capital qui sont les conditions d'une consommation raisonnable de matières premières et d'un taux de pollution acceptable. En outre, la réduction au minimum possible de la pollution et du gaspillage de matières premières pourra contribuer à une élévation des niveaux de la population et du capital ou bien à une prolongation de l'état d'équilibre, cela en fonction de l'objectif prioritaire que la société se donnera.

En choisissant ainsi comme but un état d'équilibre d'une durée relativement longue associé à une espérance moyenne de vie élevée, nous parvenons à un ensemble minimal de conditions indispensables à la réalisation de cet équilibre global :

1. *Le capital et la population demeurent à un niveau constant.* Il y a égalité entre les taux antagonistes : natalité et mortalité d'une part, investissements et dépréciation d'autre part.

2. *Tous les taux d'entrée et de sortie — natalité, mortalité, investissement et dépréciation — sont maintenus à leur minimum.*

3. *Les niveaux de la population et du capital et la relation entre ces deux niveaux doivent être compatibles avec le système de valeurs de la société.* Ils peuvent être révisés délibérément, et progressivement ajustés

chaque fois que le progrès de la technologie ouvre de nouveaux choix.

Un équilibre défini de cette manière ne signifie nullement une stagnation. Les deux premières des trois lignes d'action définies ci-dessus permettent soit le développement, soit la disparition de certains types d'activité productives, une augmentation ou une baisse de la population de certaines régions, une distribution plus ou moins équitable des revenus. Les progrès techniques devraient permettre d'accroître lentement le rendement des capitaux générateurs de services. La troisième proposition laisse la possibilité à toute nation de modifier le niveau de vie moyen de ses habitants en modifiant le rapport population-capital. En outre, une société peut s'adapter aux variations de facteurs internes ou externes en augmentant ou en diminuant le niveau de sa population ou de son capital global, ou des deux à la fois. Ces changements devront, néanmoins, s'effectuer lentement, sous un contrôle constant et sans perdre de vue l'objectif.

Les trois points ci-dessus définissent un équilibre *dynamique* qui ne doit pas geler, et vraisemblablement ne gèlera pas, le monde dans une configuration imposée par la relation population-capital telle que nous la connaissons aujourd'hui. Avec ces trois propositions, il s'agit d'instituer de nouvelles formes de liberté à l'intérieur de la société et non pas de lui imposer un carcan.

A quoi ressemblerait la vie dans un monde en équilibre? Serait-ce la fin de toute innovation, un terme mis à l'esprit d'entreprise? Cette société serait-elle bloquée dans le réseau d'inégalités et d'injustices que nous constatons dans le monde actuel? Toute discussion dans ce domaine relève encore de la conjecture, car il n'existe pas de modèles mathématiques pour optimiser les comportements sociaux dans un monde en équilibre. *Personne ne peut prédire quels types d'institutions peuvent être créés dans ces conditions nouvelles.* On ne peut pas affirmer que la société qui sera créée sera meilleure ou même tellement différente de celle que nous connaissons. Il semble toutefois possible de faire preuve d'optimisme : une société débarrassée des problèmes complexes posés par la croissance exponentielle pourra consacrer davantage d'énergie à la solution d'autres problèmes et surtout disposera de la faculté de donner plus libre cours à l'imagination créatrice de ses membres. Nous croyons réellement, comme nous le montrerons ci-dessous, que l'évolution d'une société qui favorise la recherche et le progrès technique au service de tous, une société

fondée sur l'égalité et la justice, a beaucoup plus de chance de s'instaurer dans un monde en équilibre que dans l'état de croissance incontrôlée où nous nous trouvons maintenant.

La croissance dans l'état d'équilibre

En 1857, John Stuart Mill écrivait :

« Il semble superflu d'insister sur le fait que le maintien de la population et du capital à un niveau constant ne signifie en aucune façon la stagnation de l'humanité. Il y aurait tout autant que par le passé de perspectives offertes au développement de la culture sous toutes ses formes, au progrès moral et progrès social; il y aurait toujours autant de possibilités d'améliorer l'art de vivre et beaucoup plus de chances de le voir effectivement progresser [45]. »

La population et le capital *sont les seules grandeurs* qui doivent rester constantes dans un monde en équilibre. Toutes les activités humaines qui n'entraînent pas une consommation déraisonnable de matériaux irremplaçables ou qui ne dégradent pas d'une manière irréversible l'environnement, pourraient se développer indéfiniment. En particulier, ces activités que beaucoup considèrent comme les plus souhaitables et les plus satisfaisantes : éducation, art, religion, recherche fondamentale, sports, et relations humaines, pourraient devenir florissantes.

Pour que ces activités puissent accéder à la place qu'elles méritent, deux conditions doivent être satisfaites : il est d'abord indispensable de disposer d'un potentiel de production excédentaire après que satisfaction aura été donnée aux besoins fondamentaux : nourriture et logement. Ensuite, il faut des loisirs. Dans un monde en équilibre, la relation entre les niveaux du capital et de la population peut être déterminée de manière à satisfaire les besoins matériels de l'homme à un niveau donné, variable certes, mais jugé raisonnable par le plus grand nombre.

L'indice de la production industrielle étant stabilisé, toute amélioration de la productivité, grâce au progrès technologique, devrait avoir pour résultat des loisirs supplémentaires qui seraient consacrés à des activités relativement peu polluantes et ne nécessitant pas de

consommation notable de matières premières non renouvelables. On éviterait ainsi des situations aussi absurdes que celle que décrit Bertrand Russell :

« Supposons, à un moment donné, un certain nombre de travailleurs dans des usines fabriquant des goupilles. Ils fabriquent un nombre de goupilles correspondant aux besoins du marché mondial, en travaillant (disons) huit heures par jour. Un inventeur met au point une méthode permettant de fabriquer, avec le même nombre d'ouvriers, deux fois plus de goupilles. Mais le monde n'en a nul besoin. Celles-ci sont d'autre part déjà si bon marché qu'on ne peut plus guère baisser les prix. Dans un monde doué de bon sens, n'importe qui, impliqué dans la fabrication des goupilles, trouverait que la solution consiste à ne plus travailler que quatre heures par jour et tout marcherait comme avant. Mais notre monde n'est pas doué de bon sens et une telle solution ferait crier au sacrilège. Les ouvriers travaillent encore huit heures par jour, quelques industriels font faillite, et la moitié des travailleurs sont mis au chômage. En fin de compte, le total des heures de loisir reste le même pour l'ensemble des ouvriers : la moitié des hommes sont réduits à l'inactivité totale, tandis que l'autre moitié est suremployée. On est certain que, de cette manière, les loisirs inévitables seront source de misère partout au lieu d'être un bienfait universel. Peut-on imaginer quelque chose de plus stupide [46]? »

Croyez-vous que les progrès techniques qui permettent d'augmenter la production de goupilles ou de tout autre produit auraient leur place dans un monde où tous les besoins matériels fondamentaux seraient satisfaits et aucune production excédentaire ne serait tolérée?

La croissance du niveau de vie matériel est-elle une nécessité? Est-elle le seul stimulant qui incite l'homme à chercher des méthodes pour mieux faire ce qu'il fait?

L'histoire montre que la plupart des inventions clés ont été faites par des hommes qui n'avaient pas à consacrer toutes leurs forces à la lutte pour la vie. L'énergie atomique a été découverte dans des laboratoires de recherche fondamentale par des chercheurs ignorants de la menace d'épuisement qui pèse sur les sources de combustibles fossiles. Les premières expériences de génétique, qui, cent ans plus tard, conduisirent à la création des semences à haut rendement, eurent lieu dans la quiétude d'un monastère européen. Sans doute des besoins immédiats ont-ils amené à mettre en application ces décou-

vertes, mais seule l'absence de toute nécessité a permis d'acquérir les connaissances requises pour le passage de la théorie à la mise en œuvre.

Des progrès techniques seraient à la fois nécessaires et bienvenus dans un monde en équilibre. Quelques exemples notoires de découvertes d'ordre pratique qui favoriseraient l'avènement d'un monde en équilibre ou en faciliteraient le comportement sont cités ci-après :

- nouvelles méthodes de ramassage des déchets en vue de réduire la pollution et de faciliter le recyclage du rebut réutilisable;
- techniques de recyclage plus efficaces en vue de diminuer la consommation des matières premières de base;
- meilleure conception des produits manufacturés, leur conférant une durée de vie plus grande et une remise en état plus aisée, cela afin de réduire le taux de dépréciation du capital;
- domestication de l'énergie solaire, source énergétique la moins polluante de toutes;
- moyens de neutraliser les insectes nuisibles, fondé sur une meilleure compréhension des intercalations écologiques;
- progrès de la médecine en vue d'abaisser le taux de mortalité;
- méthodes contraceptives efficaces en vue de faciliter l'alignement du taux de natalité sur le taux de mortalité.

Le meilleur stimulant pour la recherche de ces solutions ne serait-il pas la certitude que toute nouvelle invention se traduira par une amélioration manifeste de la qualité de la vie? La longue liste des inventions humaines, au cours de l'histoire, a abouti au surpeuplement urbain, à la détérioration de l'environnement et à l'accroissement des inégalités sociales, les gains de productivité ayant été absorbés par l'accroissement de la population et des investissements. On ne voit pas pourquoi l'augmentation de la productivité ne pourrait pas servir à améliorer le niveau de vie de chacun, à lui procurer davantage de loisirs ou à rendre plus agréable le cadre de vie individuel ou collectif, si ces objectifs remplaçaient la croissance dans l'échelle des priorités que se donne la société.

L'égalité dans un état d'équilibre

L'un des mythes les plus communément acceptés de notre société actuelle est la promesse que la poursuite de notre processus de croissance conduira à l'égalité de tous les hommes. Nous avons démontré en divers points de notre *étude* que la croissance exponentielle de la population et du capital ne faisait qu'accroître le fossé qui sépare les riches des pauvres à l'échelle mondiale, et qu'en s'obstinant à maintenir le rythme de cette croissance, on aboutira finalement à la catastrophe.

Le plus grand de tous les obstacles à une répartition plus équitable des ressources mondiales est l'accroissement de la population. C'est un fait partout observé, regrettable mais compréhensible, que lorsque le nombre de personnes entre lesquelles une quantité donnée de produits doit être distribuée augmente, la répartition devient de plus en plus inégale. Une répartition équitable devient un suicide social, si la ration individuelle disponible n'est pas suffisante pour entretenir la vie. Cette observation repose sur des études effectuées par la F.A.O.

« L'analyse des courbes de répartition montre que lorsque la nourriture fournie à un groupe donné diminue, les inégalités se trouvent accentuées, le nombre de familles mal nourries augmentant plus rapidement que l'écart par rapport à la moyenne. De plus, la carence alimentaire s'accroît avec la taille des foyers; les familles les plus nombreuses et en particulier leurs enfants, sont statistiquement ceux qui auront probablement le plus à souffrir de la malnutrition [47]. »

Dans un état d'équilibre durable, les niveaux relatifs de la population et du capital ainsi que leurs relations avec des grandeurs soumises à des contraintes prédéterminées : terre arable, eau douce, ressources minières, devront être établis de sorte que l'on dispose de suffisamment de nourriture et de produits industriels pour assurer à chacun au moins de quoi subsister. L'un des obstacles à une répartition équitable serait ainsi éliminé. En outre, le second obstacle à l'égalité — l'illusion des bienfaits de la croissance — ne pourrait plus résister très longtemps, comme le fait remarquer le Dr Hermann E. Daly :

« Pour plusieurs raisons, la fonction la plus importante d'un monde en équilibre sera *de distribuer et non plus de produire*. On ne peut plus éluder le problème de la répartition des biens de ce monde en invoquant la croissance. C'en est fini de l'argument selon lequel chacun

doit s'estimer heureux tant que son revenu individuel augmente en valeur absolue, même s'il diminue en valeur relative. L'état d'équilibre prélèvera moins de nos ressources matérielles, mais en revanche exigera beaucoup plus de nos ressources morales [48]. »

Naturellement, rien ne garantit que ces ressources morales, seront à elles seules suffisantes pour résoudre le problème de la répartition des revenus, même dans un monde en équilibre. Mais il est encore moins certain que de tels problèmes sociaux peuvent être résolus dans le contexte de croissance actuel qui épuise à la fois les ressources matérielles du globe et les forces morales des hommes.

La description de l'état d'équilibre que nous venons de faire est certainement idéalisée. Peut-être cet état d'équilibre tel que nous nous le présentons est-il une utopie. Il est possible aussi que la majorité des hommes ne le souhaitent pas. Notre seul but, en l'analysant, est de montrer que cet équilibre global ne signifie ni la fin du progrès, ni celle du développement de l'homme. Dans cet état, au contraire, les possibilités d'évolution sont presque illimitées.

Un état d'équilibre ne serait pas exempt de contraintes; aucune société ne peut les éviter. Il nous faudrait renoncer à certaines de nos libertés, comme celle d'avoir autant d'enfants que nous le souhaitons, ou de puiser sans limites aux ressources naturelles, pour être libérés de la pollution, de l'encombrement, de la menace de l'effondrement du système mondial.

De nouvelles formes de liberté apparaîtront : une éducation permanente accessible à tous, des loisirs avec pour propices à la créativité et à l'imagination, et surtout cet affranchissement de la faim et du dénuement qui restent, aujourd'hui encore, le privilège de si peu d'hommes sur la Terre.

Le passage de l'état de croissance à l'état d'équilibre

Peu de choses peuvent maintenant être dites au sujet des modalités pratiques, quotidiennes, de la transition vers un état d'équilibre souhaitable et durable. Nous ne sommes suffisamment avancés ni dans la mise au point de notre modèle global ni dans la réorientation de notre pensée pour comprendre toutes les implications du passage de l'état de croissance à l'état d'équilibre. Avant qu'aucun groupe social, où qu'il soit, n'amorce cette transition, on doit encore discuter,

analyser, confronter les idées émises partout dans le monde par tous ceux que le problème concerne. Si après nous avoir lu, chacun est amené à s'interroger sur la manière dont cette transition doit s'opérer, nous aurons atteint notre premier objectif.

Nul doute qu'il nous faille bien plus d'informations pour préparer ce passage. Lorsque nous avons passé au crible toutes les données qui nous sont parvenues et les avons incorporées dans un modèle ordonné, nous nous sommes rendu compte de l'absence de nombreuses données sur le réel, du manque de données numériques relatives à des quantités qui sont scientifiquement mesurables mais qui n'ont pas encore été mesurées. Les principales lacunes concernent le secteur « pollution » du modèle. Quel temps faut-il à un polluant donné pour passer de son point d'émission à son point d'accès dans l'organisme humain ? Le temps nécessaire à la dégradation d'un polluant jusqu'à ce qu'il se transforme en une substance inoffensive dépend-il de la quantité de polluants mise en jeu ? Est-ce que différents polluants agissant simultanément ont un effet synergique sur la santé des hommes ? Quels sont les effets à long terme de faibles doses de polluants sur l'organisme humain et les autres organismes vivants ? Nous avons également besoin d'informations complémentaires sur les rythmes d'érosion des sols et l'épuisement des terres résultant de l'utilisation des méthodes modernes de culture intensive.

Du fait de notre position privilégiée au cœur du problème, nous nous permettons, en tant qu'analystes, de préconiser que les recherches de données ne soient pas conduites au hasard, mais se plient à la nécessité toujours plus évidente d'établir des *structures de systèmes*¹. Le comportement de tous les systèmes sociaux complexes est d'abord déterminé par la trame des interactions physiques, biologiques, psychosociologiques et économiques qui lie toute population humaine à son environnement naturel et à ses activités économiques. Tant que les structures sous-jacentes de nos systèmes socio-économiques ne seront pas complètement analysées, il ne sera pas possible de gérer efficacement ces derniers. Les études de structure des systèmes peuvent faire apparaître qu'une boucle de rétroaction simple suffit parfois à résoudre bien des difficultés. Dans ce domaine, des suggestions intéressantes ont déjà été formulées, par exemple : il faudrait considérer comme élément du prix de revient d'un produit la quote-

1. N.D.T. : Qui auront à se nourrir de ces données.

part des coûts totaux de la pollution et de l'épuisement des ressources, ou bien contraindre tout utilisateur d'eau de rivière à installer la canalisation d'alimentation *en aval* de la canalisation d'évacuation.

Les données les plus impalpables, dont nous aurions le plus grand besoin sont celles qui concernent les valeurs humaines. Dès qu'une société reconnaît qu'elle ne peut pas tout donner à tout le monde, elle doit commencer à procéder à des choix. Doit-il y avoir davantage de monde ou un revenu individuel plus élevé, davantage de sites préservés ou davantage d'automobiles, davantage de nourriture pour les pauvres ou encore plus de services pour les riches ?

L'essence même de la politique consiste à ordonner les réponses des groupes sociaux à ces questions et à traduire ces réponses en un certain nombre d'orientations. Peu de gens jusqu'ici sont conscients du fait que de tels choix se font chaque jour. Bien moins encore se demandent ce qu'ils choisiraient. Une société, dans un monde en équilibre, devra peser les alternatives inhérentes au caractère fini de la planète, eu égard non seulement aux valeurs humaines actuelles, mais aussi en ne négligeant pas l'intérêt des générations futures. Pour ce faire, la société devrait posséder de meilleurs moyens que ceux dont elle dispose actuellement pour clarifier les choix réalistes qui se révèlent possibles, pour assigner des objectifs, et pour mettre en œuvre les orientations correspondant à ces objectifs. Ce qui importe le plus c'est de fixer d'abord les objectifs à long terme, les objectifs à court terme leur étant subordonnés.

Bien que nous ayons souligné la nécessité d'approfondir l'étude et la discussion de ces questions difficiles, c'est sur l'urgence de la tâche que nous concluons. Nous pensons que *l'on peut mener de front la poursuite de l'analyse et l'établissement d'un programme d'action*. Les détails n'en sont pas encore fixés, mais la ligne générale est évidente.

De nombreux pays ont adopté ou étudient des programmes destinés à stabiliser leur population. Nous en savons assez pour pouvoir dire, de telle ou telle stratégie politique si elle tend ou non à maîtriser la croissance. Ça et là, des tentatives sont faites pour enrayer la croissance économique [49]. Il s'agit pour l'instant d'efforts parcellaires, limités, mais qui pourraient être accentués très rapidement si l'état d'équilibre devenait l'objectif souhaité et primordial de toute fraction notable de la société humaine.

Nous avons insisté, à plusieurs reprises, sur l'importance des temps

de réponse naturels du système population-capital mondial. Ces temps de réponse signifieraient par exemple que si le taux de natalité du Mexique diminuait, de sa valeur actuelle à la valeur compensant exactement le taux de mortalité en l'an 2000, la population du pays continuerait à croître jusqu'en 2060, passant au cours de cette période (1970-2060) de 50 à 130 millions [50]. Si, aux États-Unis, ne naissaient plus à partir de maintenant que deux enfants par famille, et si le courant immigration-émigration se traduisait par un solde nul, la population continuerait à croître jusqu'en 2037 et atteindrait 266 millions au lieu de 200 aujourd'hui [51]. Si, dans le monde, on parvenait dès l'an 2000 à atteindre un taux de natalité compensant exactement le taux de mortalité, la population étant à cette date de 5,8 milliards d'habitants, les délais naturels inhérents à la pyramide des âges conduiraient à un chiffre de 8,2 milliards avant qu'elle ne se stabilise [52] (en supposant que le taux de mortalité n'augmente pas entre-temps, hypothèse peu vraisemblable d'après les résultats fournis par le modèle).

Ne rien faire pour résoudre ces problèmes c'est se remettre à des solutions draconiennes. Chaque jour pendant lequel se poursuit la croissance exponentielle rapproche notre écosystème mondial des limites ultimes de sa croissance. Décider de ne rien faire, c'est décider d'accroître le risque d'effondrement. Nous ne savons pas avec certitude pendant combien de temps encore l'humanité pourra différer une politique de contrôle de sa croissance, avant de perdre irrémédiablement la chance de pouvoir exercer ce contrôle. Nous estimons, en l'état actuel de nos connaissances sur les limites physiques de la planète, que la phase de croissance ne pourra durer un siècle de plus. Mais encore une fois, étant donné les temps de réponse du système, si l'on attend que ces limites deviennent évidentes, il sera trop tard.

Avec tous ces motifs d'inquiétude, il y a aussi des raisons d'espérer. Il sera difficile, mais non impossible, de limiter volontairement la croissance. La démarche est évidente, et les étapes à franchir, si elles sont nouvelles pour l'humanité, sont bien en deçà de ses capacités. L'homme possède, pour une courte période de son histoire, la combinaison de moyens la plus puissante qui lui ait jamais été donnée : la science, la technologie, les matières premières. Il a en main tous les moyens matériels qui lui permettraient de créer une forme de société entièrement nouvelle et qui pourrait durer pendant

des générations. Les deux éléments qui lui manquent sont un *objectif réaliste*, à long terme — qui guiderait l'humanité vers un monde en équilibre — *et la volonté de l'atteindre*.

Le choix est donc clair : ou bien ne se soucier que de ses intérêts à court terme, et poursuivre l'expansion exponentielle qui mène le système global jusqu'aux limites de la Terre et à l'effondrement final, ou bien définir l'objectif, s'engager à y parvenir et commencer, progressivement, rigoureusement, la transition vers l'état d'équilibre.

Commentaires

Lorsque nous avons demandé à l'équipe du Massachusetts Institute of Technology d'entreprendre cette étude, nous avions en vue deux objectifs immédiats :

Premièrement, connaître plus avant les limites de notre écosystème global et préciser les contraintes que ce système imposait à la démographie et aux activités humaines. La tendance actuellement répandue est plus que jamais à un accroissement continu, souvent même accéléré, de la population, de la surface des terres occupées, de la production, de la consommation, du volume des déchets produits, etc. Cette tendance repose sur l'espoir aveugle que l'environnement supportera une telle expansion, que l'on triomphera de la concurrence dans la lutte pour la vie ou que la science et la technologie feront disparaître tous les obstacles. Nous souhaitons nous rendre compte de la mesure dans laquelle cette attitude expansionniste était compatible avec la réalité matérielle d'un monde dont les dimensions sont limitées, et avec les besoins fondamentaux de la société mondiale, en gestation de réduction des antagonismes sociaux et politiques, jusqu'à l'amélioration de la qualité de vie de chaque individu.

Deuxièmement, faciliter l'identification et l'étude des variables dominantes qui régissent le comportement à long terme du système global et de leurs interactions.

Une telle étude, croyons-nous, ne peut être menée à bien en se basant uniquement sur des analyses qui se bornent aux systèmes nationaux et sur des analyses à court terme comme ce fut souvent le cas. Nous ne voulions pas d'un nouvel exercice de futurologie. Nous avons cherché, et effectivement obtenu, une analyse des tendances actuelles, de leurs influences réciproques et de leurs conséquences possibles. Notre but était de rendre prévisibles les crises mondiales latentes, au cas où les

tendances actuelles se maintiendraient et d'offrir la possibilité d'apporter aux systèmes politiques, sociaux et économiques les modifications nécessaires pour éviter ces crises.

Le rapport du M.I.T. correspond à notre attente. Un grand pas a été franchi vers une analyse exhaustive et cohérente de la situation mondiale. L'analyse devra être affinée, approfondie, élargie et cela demandera encore plusieurs années de travail. Si grand que soit le pas, il n'est que le premier : les limites de la croissance qui ont été examinées ne sont que les limites physiques supérieures actuellement connues, imposées par la dimension même de notre monde considéré comme un système fini. En fait, ces limites risquent d'être atteintes plus rapidement encore du fait des contraintes politiques, économiques et institutionnelles *de l'injuste répartition des ressources et des revenus tant entre les groupes humains qu'à l'intérieur même de ces groupes*, et par notre incapacité à gérer des systèmes vastes et complexes.

Mais ce rapport vise plus loin : il comporte des propositions quant aux conditions et à la structure du monde de demain, et convie à un débat permanent sur les moyens intellectuels et pratiques de modeler cet avenir.

Nous avons présenté les conclusions de ce rapport à deux réunions internationales tenues au cours de l'été 1971, l'une à Moscou, l'autre à Rio de Janeiro. Si les perspectives évoquées ont suscité beaucoup de questions et de critiques, elles n'ont fait l'objet d'aucun désaccord profond. Une version préliminaire du rapport a également été soumise à une quarantaine de personnes, la plupart membres du Club de Rome. Voici quelques-unes des principales critiques formulées :

1. Les modèles ne pouvant, par définition, comporter qu'un nombre limité de variables, les interactions étudiées n'ont qu'un caractère partiel. En outre, que dans un modèle global tel que celui utilisé au cours de cette étude, le degré d'agrégation est nécessairement élevé. Néanmoins, on reconnaît généralement que, avec un modèle global simple, il est possible d'examiner les effets d'un changement des données de base ou de simuler les effets d'un changement de politique, afin de se rendre compte des effets de ce changement sur le comportement à long terme du système. Une expérience de ce genre, dans les conditions réelles, serait longue, coûteuse, et dans de nombreux cas, impossible.

2. Il a été reproché aux auteurs de ne pas avoir accordé suffisamment d'importance aux possibilités de résoudre certains problèmes, offertes par de nouvelles découvertes scientifiques et de nouveaux progrès techniques : mise au point de techniques contraceptives infaillibles, production de protéines à partir des hydrocarbures naturels, production ou domestication de sources d'énergie inépuisables (y compris celle de l'énergie solaire, dénuée de facteurs polluants), utilisation de ces sources pour la synthèse des aliments à partir de l'air et de l'eau ou extraction des minéraux indispensables à partir des roches. Toutefois, on s'accordait à penser que ces innovations interviendraient probablement trop tard pour éviter une catastrophe démographique ou écologique. Dans le meilleur des cas, elles ne pourraient nous accorder qu'un délai, car nous sommes en présence d'une problématique qui exige des solutions autres que techniques.

3. D'autres pensent qu'il existe dans des régions encore insuffisamment explorées des réserves de matières premières bien plus importantes qu'il n'a été supposé dans le rapport. Mais, là encore, de telles découvertes auraient pour seul effet de reculer l'échéance de la pénurie plutôt que de l'éviter. On doit toutefois reconnaître qu'une augmentation des ressources potentielles susceptible de couvrir plusieurs décennies laisserait à l'homme le temps de réfléchir au problème et peut-être d'appliquer des solutions adéquates.

4. D'autres enfin ont trouvé le modèle trop « technocratique », faisant notamment observer l'absence de certains aspects sociologiques essentiels, tels que les conséquences de l'adoption d'un nouveau système de valeurs. Le président de la Conférence de Moscou résuma ce point de vue en déclarant que « *l'homme n'était pas un simple système biocybernétique* ». Nous admettons volontiers cette critique. Le modèle actuel considère l'homme uniquement à l'intérieur de son système matériel pour la simple raison que dans l'état actuel du modèle, il a été impossible de collecter et d'incorporer des données sociales valables. Toutefois, en dépit de *l'orientation strictement matérialiste* donnée au modèle, les conclusions de l'étude mettent l'accent sur la nécessité d'un changement fondamental du système de valeurs de la société.

La majorité des premiers lecteurs de ce rapport en a adopté les conclusions. Il est évident que, si les arguments qui y figurent (et

compte tenu des critiques reconnues) sont tenus pour crédibles en principe, leur portée ne saurait être surestimée.

Nous avons été largement suivis dans notre opinion selon laquelle le véritable sens du projet réside dans son caractère global, car c'est uniquement grâce à une vision globale des problèmes qu'il est possible de comprendre chacun de leurs éléments et non à partir d'éléments isolés que l'on peut parvenir à une synthèse valable. Ce rapport présente sans ambiguïté les choix qui s'offrent non pas à une nation ou à un peuple en particulier, mais à l'ensemble des nations et des peuples, contraignant ainsi le lecteur à se hausser au niveau de la problématique mondiale. Étant donné le caractère hétérogène du monde d'aujourd'hui, des structures politiques nationales et des stades de développement, l'inconvénient de cette méthode est, bien entendu, que les conclusions de l'étude valables, à l'échelle planétaire, ne s'appliquent à aucun pays, à aucune région en particulier.

L'histoire montre que des bouleversements se produisent dans le monde, d'une manière sporadique et en des points chauds mais que ces bouleversements sont rarement généralisés ou simultanés; de sorte que, si du fait de l'inertie des groupes humains et des difficultés politiques, les conséquences prévues par le modèle se produisaient, elles se traduiraient par des crises, voire des désastres, d'abord limités dans le temps et dans l'espace.

Mais il est aussi vraisemblable que de telles crises auraient des répercussions mondiales. Bien des nations ou des groupes sociaux, soit en prenant des mesures hâtives, soit en se retranchant dans l'isolationnisme et des tentatives d'antarcie, les notions et les peuples ne feraient souvent qu'aggraver la situation du système dans son ensemble.

L'interdépendance des différentes variables du système planétaire rendraient de telles mesures inopérantes à terme. La guerre, la pollution sous toutes ses formes, la pénurie de matières premières chez les nations industrialisées, ou un déclin économique généralisé rendraient contagieuse la désintégration des systèmes sociaux.

Finalement, le rapport a été particulièrement apprécié pour sa mise en évidence de la croissance exponentielle de la population humaine à l'intérieur d'un système fini, notion rarement évoquée et prise en considération au plan politique pratique, en dépit de ses conséquences incalculables pour l'avenir de notre petite planète. Le projet du M.I.T. donne une explication systématique et rationnelle de tendances dont bien peu de gens ont conscience.

Les conclusions pessimistes du rapport ont fait et continueront à faire l'objet de discussions. On entendra souvent dire que la nature est susceptible de trouver un remède à l'augmentation de la population et que le taux de natalité baissera avant que la catastrophe ne se précise. D'autres se contenteront de penser que les tendances mises en évidence par le rapport relèvent de la fatalité et attendront le « miracle ». Certains espéreront que quelques corrections de détail appliquées aux lignes politiques actuelles nous permettront un réajustement progressif et satisfaisant qui rétablira vraisemblablement l'équilibre. Enfin, de nombreux autres croiront aveuglément en la technologie supposée être la panacée.

Nous recherchons et encourageons de toutes nos forces la discussion. Il est essentiel selon nous de déterminer l'ampleur exacte de la crise actuelle de l'humanité et les dimensions qu'elle est susceptible d'atteindre au cours des prochaines décennies.

D'après l'audience qu'a eue la première diffusion de ce rapport, nous sommes persuadés que, dans le monde entier, de plus en plus d'hommes prendront conscience de la monstruosité de la croissance, qui risque d'obérer le potentiel de notre terre et découvriront les tristes perspectives qui s'offrent à nous-mêmes, à nos enfants et à nos petits-enfants.

Nous-mêmes, en tant que promoteurs de cette étude, comment jugeons-nous ses conclusions? Nous ne pouvons formuler une opinion définitive au nom de tous nos collègues du Club de Rome, car il existe entre nous des divergences sur les centres d'intérêt, les priorités à accorder à tel ou tel facteur, et l'évaluation des problèmes. Mais, malgré le caractère provisoire du rapport, malgré les insuffisances de certaines données de base, et la complexité du système global qu'il tente de décrire, nous sommes tous convaincus de l'importance des conclusions essentielles. Nous croyons qu'il porte un message dont la signification va bien au-delà des ordres de grandeur qu'il indique, un message qui concerne tous les aspects des servitudes de l'humanité d'aujourd'hui.

Bien que nous ne puissions faire état ici que de nos premières observations, en reconnaissant qu'elles demandent encore beaucoup de réflexion et de remise en ordre, nous sommes tous d'accord sur les dix points suivants :

1. *Nous avons la conviction que la prise de conscience des limites matérielles de l'environnement mondial et des conséquences tragiques*

d'une exploitation irraisonnée des ressources terrestres est indispensable à l'émergence de nouveaux modes de pensée qui conduiront à une révision fondamentale, à la fois du comportement des hommes, et, par suite, de la structure de la société actuelle dans son ensemble.

C'est de notre temps seulement qu'après avoir commencé à s'interroger sur les interactions entre la croissance démographique et la croissance économique et avoir atteint, en la matière, des niveaux sans précédent, que l'homme est contraint de tenir compte des dimensions finies de la terre et des limites qui s'imposent à son peuplement et à ses activités. Pour la première fois, il est d'une importance vitale de déterminer le coût d'une croissance matérielle sans frein et de rechercher d'autres solutions.

2. Le seuil déjà élevé atteint par la pression démographique et les inégalités de répartition de la population dans le monde constituent à nos yeux une menace tellement sérieuse que l'humanité doit dès maintenant rechercher un état d'équilibre.

Il existe encore des zones de sous-peuplement mais, en considérant le monde comme un tout, nous sommes très près du point critique en matière d'expansion démographique, si toutefois nous ne l'avons pas déjà atteint. Il n'y a naturellement pas, à long terme, de niveau optimal unique pour la population; mais plutôt des états d'équilibre entre les niveaux de population, les niveaux de vie et les valeurs sociales, la liberté individuelle et les divers autres éléments qui font la qualité de la vie. Étant donné le stock limité et décroissant de matières premières non régénérables et le caractère fini de notre planète, on doit admettre, en principe, que l'accroissement de la population se soldera par une baisse du niveau matériel de vie, avec tout le cortège de problèmes que cela implique. En revanche, aucune valeur humaine fondamentale ne se trouve mise en question par un arrêt de la croissance démographique.

3. Nous reconnaissons qu'une amélioration substantielle du sort des nations dites en voie de développement est la condition sine qua non d'un nouvel équilibre mondial, amélioration tant en valeur absolue que relativement aux nations économiquement développées. Nous affirmons que seule une stratégie à l'échelle planétaire peut permettre la réalisation d'un tel programme.

Faute de cette action, les inégalités actuelles ne feront que s'aggraver dangereusement. Nous courons au désastre si les nations continuent à agir en ne tenant compte que de leurs seuls intérêts, ou si les nations industrialisées et pays en voie de développement entrent ouvertement en conflit.

La planète n'est pas assez vaste et ses ressources ne sont pas suffisantes pour tolérer plus longtemps le comportement égocentrique et agressif de ses habitants. Plus nous approchons des limites matérielles de la terre, plus ce problème risque d'être insoluble.

4. Nous affirmons que les voies globales du développement sont étroitement liées à d'autres voies globales qu'une stratégie à l'échelle mondiale doit être mise au point pour attaquer tous les problèmes essentiels, en particulier, ceux des relations entre l'homme et son environnement.

La population du globe doublant en un peu plus de trente ans, le stock de ressources naturelles diminuant, la société aura bien du mal à satisfaire les besoins et les aspirations de tant de monde en si peu de temps. Nous serons probablement conduits à essayer de satisfaire ces exigences par une surexploitation de l'environnement et compromettrons de ce fait la capacité de la terre à entretenir la vie. Aux deux pôles de la relation homme-environnement, la situation ne fera qu'empirer. Nous ne pourrions compter sur aucune solution purement technologique pour briser le cercle vicieux. Développement et environnement doivent absolument être traités comme un seul et même problème.

5. Nous reconnaissons que la problématique mondiale, dans sa complexité, comporte un grand nombre d'éléments qui ne sont pas des grandeurs mesurables. Nous croyons, néanmoins, que la méthode faisant l'objet du présent rapport et dont on a noté le caractère quantitatif dominant, est indispensable à la compréhension du fonctionnement du système. Nous espérons que la connaissance du fonctionnement du système conduira à la maîtrise de ses divers éléments.

Bien qu'il existe un lien fondamental entre tous les grands problèmes, on n'a actuellement découvert aucune méthode qui permette de les attaquer dans leur ensemble. L'approche que nous avons adoptée peut être d'une grande utilité pour réformer notre vision de la situation dans laquelle se trouve l'humanité. Elle nous permet à la

fois de définir les états d'équilibre auxquels doivent parvenir les sociétés entre elles et en relation avec leur environnement, et de percevoir les conséquences que peuvent entraîner des ruptures d'équilibre.

6. Nous sommes unanimement convaincus que la première tâche qui s'impose à l'humanité est le redressement rapide et radical du déséquilibre actuel et de la situation mondiale qui se dégrade dangereusement.

Mais notre situation est si complexe, elle reflète à ce point la multiplicité des activités humaines, qu'aucune combinaison de mesures purement techniques, économiques ou législatives ne peut apporter d'amélioration sensible. Des méthodes entièrement nouvelles sont indispensables pour donner aux sociétés des objectifs qui seraient la recherche d'états d'équilibre successifs au lieu de celle d'une croissance continue. Une telle réorganisation exige un effort intense de compréhension, d'imagination, la définition d'un nouveau comportement politique et d'une nouvelle éthique. Nous croyons que cet effort est réalisable et nous espérons que cette publication suscitera une mobilisation des énergies nécessaires.

7. Cet effort suprême est le défi offert à notre génération. On ne peut pas se contenter de passer le problème à la suivante : il sera trop tard. L'entreprise doit être résolument tentée sans retard et un net virage doit être pris avant la fin de la prochaine décennie.

Bien que cet effort doive tout d'abord se concentrer sur les implications de la croissance, et plus particulièrement sur celles de l'expansion démographique, la problématique mondiale dans sa totalité, et non pas seulement dans certains de ses aspects, devra être abordée sans retard. Nous croyons réellement que le besoin de changements sociaux va se faire rapidement sentir pour faire face aux changements d'ordre technique. Une réforme radicale des institutions et des mœurs politiques à tous les niveaux et à l'échelon le plus élevé, ainsi que la nécessité d'une administration à compétence mondiale, deviendront évidents. Nous sommes persuadés que notre génération acceptera cette gageure, si nous mesurons les tragiques conséquences qu'aurait notre inaction.

8. Pour nous, il est évident que si l'humanité change ainsi de cap, il sera nécessaire de prendre à l'échelle internationale des décisions

mûrement concertées et d'établir une planification à long terme couvrant des domaines dont l'ampleur est sans précédent.

Un tel effort nécessite la collaboration de tous les peuples, quels que soient leur culture, leur système économique ou leur stade de développement. Mais c'est aux nations les plus industrialisées que reviendra la plus grande part de responsabilités, non qu'elles aient davantage de perspectives culturelles ou un meilleur sens des valeurs humaines que d'autres, mais parce qu'ayant propagé le syndrome de la croissance, elles demeurent à la source du progrès qui nourrit celle-ci. Au fur et à mesure que l'on avance dans l'étude de l'écosystème mondial de sa structure et de son fonctionnement, ces nations industrialisées seront amenées à comprendre que, dans un monde qui a un besoin urgent de stabilité, leurs paliers élevés de développement ne peuvent se justifier ou être tolérés que s'ils servent, non pas de tremplin à un développement encore plus rapide, mais à constituer des bases de départ à partir desquelles pourra s'organiser une répartition plus équitable des ressources et des revenus dans le monde entier.

9. Nous faisons nôtre, sans réserve aucune, l'affirmation selon laquelle le frein imposé à l'expansion démographique et à l'expansion économique n'implique aucun blocage, pour les nations du monde entier, au stade actuel de leur développement économique.

Si une telle proposition était faite par les nations riches, elle ne pourrait qu'être considérée comme une ultime tentative de politique néo-colonialiste. La réalisation, à l'échelle mondiale, d'un harmonieux équilibre aux plans écologique, sociologique et économique, doit être une aventure collective fondée sur une foi commune et cela pour le plus grand bien de tous. Comme déjà évoqué, l'initiative sera, dans un premier temps, laissée aux nations riches, lesquelles devront amorcer un processus de redistribution plus équitable des ressources et des revenus entre les différentes nations. La première étape que ces nations auront à franchir sera de ralentir le rythme de croissance de leur production industrielle, tout en aidant les nations en voie de développement à faire progresser le plus rapidement possible leurs économies.

10. Nous déclarons enfin que toute tentative délibérée pour parvenir à un équilibre rationnel et stable grâce à des programmes concertés — plutôt que de laisser au hasard ou aux catastrophes le soin de rétablir

un équilibre compromis — dépendra en dernier ressort d'une révision profonde des valeurs et des objectifs propres aux individus, aux nations et à l'ensemble du monde.

Le changement de mentalité est peut-être déjà dans l'air, quoique encore impalpable. Mais les traditions, l'éducation, les exigences de la vie quotidienne et surtout les intérêts égoïstes rendront la transformation lente et pénible. Seule une véritable prise de conscience de la condition humaine, à ce tournant de l'histoire, peut fournir des motivations suffisantes pour nous faire accepter les sacrifices personnels et les changements de structures politiques et économiques nécessaires pour recouvrer un équilibre.

La question fondamentale demeure naturellement de savoir si la situation mondiale est en fait aussi sérieuse que ce rapport et nos commentaires le prétendent. Nous croyons sincèrement que les avertissements contenus dans cet ouvrage sont amplement justifiés... et que les objectifs de notre civilisation actuelle, de même que les méthodes utilisées pour les atteindre, ne peuvent qu'aggraver les problèmes de demain. Mais nous ne serions que trop heureux si nos hypothèses se révélaient exagérément pessimistes ¹.

Dans tous les cas, si notre situation est grave, elle n'est pas encore désespérée. Le rapport fournit une alternative à une expansion aussi désastreuse qu'incontrôlée et propose quelques réflexions sur les changements de politiques susceptibles de conduire l'humanité vers un état d'équilibre. Le rapport indique qu'il est dans nos possibilités d'envisager des groupes humains d'une importance raisonnable, dotés d'un niveau de vie matériel satisfaisant, et à l'intérieur desquels il existerait des possibilités de développement social et individuel illimitées. Nous sommes dans une très large mesure d'accord avec cette dernière assertion, bien que nous soyons suffisamment réalistes pour ne pas nous laisser emporter par des spéculations d'ordre purement scientifique ou moral.

La notion de société en équilibre stable aux plans économique et sociologique peut sembler facile à cerner : mais la réalité en est tellement éloignée de notre expérience passée qu'une révolution dans nos modes de pensée, comparable à la révolution copernicienne dans le domaine de l'astronomie, s'avère indispensable. En passant

1. N.D.T. : Mais il est alors vital de le démontrer.

de l'idée à la pratique, on s'attaque à une tâche difficile et complexe. On ne pourra amorcer sérieusement les processus de changement que lorsque l'impératif de limitation de l'expansion et son caractère d'extrême urgence seront compris et acceptés par une très large fraction, non seulement de scientifiques et de politiciens, mais encore et surtout des opinions publiques de nombre de pays. De toute manière, la transition sera pénible et exigera des hommes beaucoup d'ingéniosité et de persévérance. Répétons-le, seule la conviction qu'il n'y aura pas d'autre moyen de survie est susceptible de libérer les énergies morales, intellectuelles et créatives requises pour cette entreprise humaine sans précédent.

Cependant, nous préférons souligner l'importance du but plutôt que les difficultés des voies qui mènent à une société en équilibre. Nous croyons qu'un nombre bien plus grand qu'on ne peut l'imaginer d'hommes et de femmes de tous âges et de toutes conditions relèvera le défi et engagera le dialogue, non pas sur l'opportunité de préparer un nouvel avenir, mais sur les moyens d'y parvenir.

Le Club de Rome est en train de se préparer sur bien des plans ce départ à promouvoir. Les recherches de base sur la dynamique de l'écosystème mondial commencées au M.I.T. seront non seulement poursuivies dans cet établissement, mais complétées par des études effectuées en Europe, au Canada, en Amérique latine, en Union Soviétique et au Japon. De plus, les théories restant lettre morte si elles ne suscitent pas une action politique, le Club de Rome encouragera la création d'un vaste forum planétaire où hommes d'État, politiciens et scientifiques pourront évaluer les risques et les chances du système global de l'avenir, sans les contraintes officielles des négociations entre gouvernements.

Nous voudrions enfin, et c'est notre dernier souhait, inviter chaque homme à rentrer en lui-même : il lui faut sonder ses valeurs et ses fins tout autant que ce monde qu'il aspire à changer. A l'une et l'autre tâche, il faut se consacrer entièrement. Mais en fin de compte, l'important n'est pas tant de savoir si l'humanité veut survivre, mais si elle peut le faire dans des conditions où la vie vaille la peine d'être vécue.

Le Comité exécutif du Club de Rome.

Alexander KING	Édouard PESTEL
Saburo OKITA	Hugo THIEMANN
Aurélío PECCEI	Carroll WILSON

Notes bibliographiques

- [1] A. M. Carr-Saunders, *World Population : Past Growth and Present Trends* (Oxford : Clarendon Press, 1936), p. 42.
- [2] US Agency for International Development, *Population Program Assistance* (Washington, DC : Government Printing Office, 1970), p. 172.
- [3] *World Population Data Sheet 1968* (Washington, DC : Population Reference Bureau, 1968).
- [4] Lester R. Brown, *Seeds of Change* (New York : Praeger Publishers, 1970), p. 135.
- [5] President's Science Advisory Panel on the World Food Supply, *The World Food Problem* (Washington, DC : Government Printing Office, 1967) 2 : 5.
- [6] President's Science Advisory Panel on the World Food Supply, *The World Food Problem*, 2 : 423.
- [7] President's Science Advisory Panel on the World Food Supply, *The World Food Problem*, 2 : 460-69.
- [8] UN Food and Agriculture Organization, *Provisional Indicative World Plan for Agricultural Development* (Rome : UN Food and Agriculture Organization, 1970) 1 : 41.
- [9] Data from an Economic Research Service survey, reported by Rodney J. Arkley in « *Urbanization of Agricultural Land in California* », mimeographed (Berkeley, Calif. : University of California, 1970).

- [10] Paul R. Ehrlich and Anne H. Ehrlich, *Population, Ressources, Environnement* (Fayard 1972, coll. *Écologie*).
- [11] *First Annual Report of the Council on Environmental Quality* (Washington, DC : Government Printing Office, 1970), p. 158.
- [12] US Bureau of Mines, *Mineral Facts and Problems, 1970* (Washington, DC : Government Printing Office, 1970), p. 247.
- [13] Mercury data from US Bureau of Mines, *Minerals Yearbook* (Washington, DC : Government Printing Office, 1967) I (2) : 724 and US Bureau of Mines, *Commodity Data Summary* (Washington, DC : Government Printing Office, January 1971) p. 90 Lead data from *Metal Statistics* (Somerset, NJ : American Metal Market Company, 1970), p. 215.
- [14] Chauncey Starr, « Energy and Power », *Scientific American*, September 1971, p. 42.
- [15] UN Department of Economic and Social Affairs, *Statistical Yearbook 1969* (New York : United Nations 1970), p. 40.
- [16] Bert Bolin « The Carbon Cycle », *Scientific American*, September 1970, p. 131.
- [17] *Inadvertent Climate Modification, Report of the Study of Man's Impact on Climate* (Cambridge, Mass. : MIT Press, 1971), p. 234.
- [18] John R. Clark, « Thermal Pollution and Aquatic Life », *Scientific American*, March 1969, p. 18.
- [19] *Inadvertent Climate Modification*, pp. 151-154.
- [20] John P. Holdren, « Global Thermal Pollution », in *Global Ecology*, ed. John P. Holdren and Paul R. Ehrlich (New York : Harcourt Brace Jovanovich, 1971), p. 85.
- [21] Baltimore Gas and Electric Company, « Preliminary Safety Analysis Report », quoted in E. P. Ranford et al. « Statement of Concern », *Environment*, September 1969, p. 22.
- [22] R. A. Wallace, W. Fulkerson, W. D. Shults, and W. S. Lyons *Mercury in the Environment* (Oak Ridge, Tenn : Oak Ridge Laboratory, 1971).
- [23] *Man's Impact on the Global Environment*, p. 131.
- [24] C. C. Patterson and J. D. Salvia, « Lead in the Modern Environment », *Scientist and Citizen*, April 1968, p. 66.
- [25] *Second Annual Report of the Council on Environmental Quality* (Washington, DC : Government Printing Office, 1971), pp. 110-111.
- [26] Edward J. Kormandy, *Concepts of Ecology* (Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1969), pp. 96-97.

- [27] Calculé à partir du P.N.B. tête moyen à l'aide des relations exposées dans : H. B. Chenery and L. Taylor, « Development Patterns : Among Countries and Over Time », *Review of Economics and Statistics* 50 (1969) : 391.
- [28] Calculé à partir de données sur la consommation de métaux et d'énergie dans UN Department of Economic and Social Affairs, *Statistical Yearbook*, 1969.
- [29] J. J. Spengler, « Values and Fertility Analysis », *Demography* 3 (1966) : 109.
- [30] Lester B. Lave and Eugene P. Seskin, « Air Pollution and Human Health », *Science* 169 (1970) : 723.
- [31] Second Annual Report of the Council on Environmental Quality, pp. 105-106.
- [32] Frank W. Notestein, « Zero Population Growth : What is It? », *Family Planning Perspectives* 2 (June 1970) : 20.
- [33] Donald J. Bogue, *Principles of Demography* (New York : John Wiley and Sons, 1969), p. 828.
- [34] R. Buckminster Fuller, *Comprehensive Design Strategy*, World Resources Inventory, Phase II (Carbondale, III : University of Illinois, 1967), p. 48.
- [35] Thomas S. Lovering, « Mineral Resources from the Land », in *Committee on Resources and Man, Resources and Man* (San Francisco, Calif. : W. H. Freeman and Company, 1969), pp. 122-123.
- [36] Second Annual Report of the Council on Environmental Quality, p. 118.
- [37] S. R. Sen, *Modernizing Indian Agriculture* vol. I Expert Committee on Assessment and Evaluation (Nex Delhi : Ministry of Food, Agriculture, Community Development, and Cooperatives, 1969).
- [38] Un excellent résumé est donné par Robert d'A. Shaw, *Jobs and Agricultural Development* (Washington, DC : Overseas Development Council, 1970).
- [39] Richard Critchfield, « It's a Revolution All Right », *Alicia Patterson Fund paper* (New York : Alicia Patterson Fund, 1971).
- [40] Robert d'A. Shax, *Jobs and Agricultural Development*, p. 44.
- [41] Lester R. Brown, *Seeds of Change*, p. 112.
- [42] US Bureau of the Census, *1970 Census of Population and Housing, General Demographic Trends of Metropolitan Arcas, 1960-170* (Washington, DC : Government Printing Office, 1971).
- [43] Garrett Hardin, « The Tragedy of the Commons », *Science* 162 (1968) : 1243.

- [44] UN Food and Agriculture Organization, *The State of Food and Agriculture* (Rome : UN Food and Agriculture Organization, 1970), p. 6.
- [45] John Stuart Mill, *Principles of Political Economy*, in *The Collected Works of John Stuart Mill*, ed. V. W. Bladen and J. M. Robson (Toronto : University of Toronto Press, 1965), p. 754.
- [46] Bertrand Russell, *In Praise of Idleness and Other Essays* (London : Allen and Unwin, 1935), pp. 16-17.
- [47] UN Food and Agriculture Organization, *Provisional Indicative World Plan for Agricultural Development 2* : 490.
- [48] Herman E. Daly, « Toward a Stationary-State Economy, » in *The Patient Earth*, ed. John Harte and Robert Socolow (New York : Holt, Rinehart, and Winston, 1971), pp. 236-237.
- [49] Voir, *par exemple*, « Fellow Americans Keep Out! » *Forbes*, June 15, 1971, p. 22, and *The Ecologist*, January 1972.
- [50] J. Bourgeois-Pichat and Si-Ahmed Taleb, « Un taux d'accroissement nul pour les pays en voie de développement en l'an 2000 : Rêve ou réalité? » *Population* 25 (September-October 1970) : 957.
- [51] Commission on Population Growth and the American Future, *An Interim Report to the President and the Congress* (Washington, DC : Government Printing Office, 1971).
- [52] Bernard Berelson, *The Population Council Annual Report, 1970* (New York : The Population Council, 1970), p. 19.

L'essentiel des travaux sur lesquels s'appuie l'étude « Les limites à la croissance » vont être réunis en un volume : « Toward Global Equilibrium-Collected Papers », par Dennis L. Meadows — Wright Allen Press Inc. — 238 Mainstreet Cambridge, Massachusetts 02142.

Table des graphiques

1. Perspectives humaines	145
2. La capitalisation à intérêts composés : une fonction exponentielle	150
3. Production industrielle mondiale	159
4. Taux de croissance économique	161
5. Ration calorique et protéines	167
6. Production de denrées alimentaires	168
7. Terres arables	169
Tableau 4 A — Ressources non renouvelables	174
Tableau 4 B	175
8. Réserves de chrome	177
9. Disponibilité du chrome	179
10. Disponibilité du chrome : réserves supposées doublées	181
11. Consommation d'énergie et produit national brut par tête	186
12. Chaleur dissipée dans le bassin de Los Angeles (pollution thermique)	187
13. Déchets nucléaires	188
14. Modification des caractéristiques chimiques des eaux du lac Ontario	189
15. Teneur en oxygène des eaux de la Baltique	190
16. Consommation de mercure aux États-Unis	191
17. Teneur en plomb de la glace du Groenland	192

18. Le cycle du DDT	194
Tableau 5 — Teneur en DDT des lipides humaines	195
19. Boucles régissant la croissance de la population et du capital . .	206
20. Boucles régissant la population, le capital, la production agricole et la pollution	207
21. Boucles régissant la population, le capital, les services et les ressources	210
22. Le modèle global	212
23. Nutrition et espérance de vie	214
24. Production industrielle et consommation de ressources natu- relles par tête	216
25. Consommation d'acier et P.N.B. par tête	217
26. Consommation de cuivre et d'acier en fonction du P.N.B. par tête aux États-Unis	218
27. Taux de natalité et P.N.B. par tête	221
28. Relation entre le P.N.B. par tête et le pourcentage de la popu- lation souhaitant des familles de plus de quatre enfants	222
29. Importance de la famille souhaitée	224
30. Influence de la pollution sur la durée de la vie	228
31. Comportement du modèle global	233
32. Comportement du modèle global avec ressources naturelles doublées	234
33. Comportement du modèle global avec ressources naturelles « illimitées »	240
34. Coût de la réduction de la pollution	243
35. Comportement du modèle global avec ressources « illimitées » et contrôle de la pollution	244
36. Comportement du modèle global avec ressources « illimitées », contrôle de la pollution et productivité agricole accrue	246
37. Comportement du modèle global avec ressources « illimitées », contrôle de la pollution et régulation « parfaite » des naissances	247

TABLE DES GRAPHIQUES

309

38. Comportement du modèle global avec ressources « illimitées », contrôle de la pollution, productivité agricole accrue et régulation « parfaite » des naissances	249
39. Comportement du modèle global avec une population stabilisée	265
40. Comportement du modèle global avec capital et population stabilisés	267
41. Modèle global stabilisé n° 1	268
42. Modèle global stabilisé n° 2	272
43. Modèle global avec des mesures de stabilisation prises en 2000	273

Table des matières

II. <i>Les limites à la croissance</i> : un rapport pour le Club de Rome dans le cadre de ses travaux sur les DILEMMES DE L'HUMANITÉ	131
Présentation par le Club de Rome	135
Introduction	143
1. Caractère exponentiel de la croissance	149
2. Les limites à la croissance exponentielle	165
3. Les phénomènes de croissance à l'intérieur du modèle global	199
4. La technologie et les limites de l'expansion	237
5. L'État d'équilibre global	261
Commentaires par le Club de Rome	289

Achevé d'imprimer le 1^{er} juin 1972
sur les presses de l'imprimerie Berger-Levrault à Nancy,
pour le compte de la librairie Arthème Fayard,
75, rue des Saints-Pères, Paris.

Dépôt légal : 2^e trimestre 1972. — N° d'impression : 778432-6-72

N° d'édition : 4659.

H/35-5671-9

APPENDIX: Related Studies

Papers related to the MIT System Dynamics Group—Club of Rome Project on the Predicament of Mankind are listed below. Most of these papers are available in one volume, TOWARD GLOBAL EQUILIBRIUM: COLLECTED PAPERS, Dennis L. Meadows, editor. Published by Wright-Allen Press, Inc., 238 Main Street, Cambridge, Massachusetts 02142.

ANDERSON, ALISON and ANDERSON, JAY M. "System Simulation to Test Environmental Policy III: The Flow of Mercury through the Environment." Mimeographed. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 1971.

ANDERSON, JAY M. "System Simulation to Test Environmental Policy II: The Eutrophication of Lakes." Mimeographed. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 1971.

BEHRENS, WILLIAM W. III. "The Dynamics of Natural Resource Utilization." Paper presented at the 1971 Summer Computer Simulation Conference, July 1971, Boston, Massachusetts, sponsored by the Board of Simulation Conferences, Denver, Colorado.

BEHRENS, WILLIAM W. III and MEADOWS, DENNIS L. "The Determinants of Long-Term Resource Availability." Paper presented at the annual meeting of the American Association for the Advancement of Science, January 1971, Philadelphia, Pennsylvania.

CHOUCRI, NAZLI; LAIRD, MICHAEL; and MEADOWS, DENNIS L. "Resource Scarcity and Foreign Policy: A Simulation Model of International Conflict." Paper presented at the annual meeting of the American Association for the Advancement of Science, January 1971, Philadelphia, Pennsylvania.

FORRESTER, JAY W. "Counterintuitive Nature of Social Systems." *Technology Review* 73 (1971): 53.

FORRESTER, JAY W. *World Dynamics*. Cambridge, Mass.: Wright-Allen Press, 1971.

HARBORDT, STEFFEN C. "Linking Socio-Political Factors to the World Model." Mimeographed. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 1971.

MEADOWS, DONELLA H. "The Dynamics of Population Growth in the Traditional Agricultural Village." Mimeographed. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 1971.

MEADOWS, DONELLA H. "Testimony Before the Education Committee of the Massachusetts Great and General Court on Behalf of the House Bill 3787." Republished as "Reckoning with Recklessness," *Ecology Today*, January 1972, p. 11.

MEADOWS, DENNIS L. *The Dynamics of Commodity Production Cycles*. Cambridge, Mass.: Wright-Allen Press, 1970.

MEADOWS, DENNIS L. "MIT-Club of Rome Project on the Predicament of Mankind." Mimeographed. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 1971.

MEADOWS, DENNIS L. "Some Requirements of a Successful Environmental Program." Hearings of the Subcommittee on Air and Water Pollution of the Senate Committee on Public Works, Part I, May 3, 1971. Washington, DC: Government Printing Office, 1971.

APPENDIX

MILLING, PETER. "A Simple Analysis of Labor Displacement and Absorption in a Two Sector Economy." Mimeographed. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 1971.

NAILL, ROGER F. "The Discovery Life Cycle of a Finite Resource: A Case Study of US Natural Gas." Mimeographed. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 1971.

RANDERS, JØRGEN. "The Dynamics of Solid Waste Generation." Mimeographed. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 1971.

RANDERS, JØRGEN and MEADOWS, DONELLA H. "The Carrying Capacity of our Global Environment: A Look at the Ethical Alternatives." In *Western Man and Environmental Ethics*, ed. Ian Barbour. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1972.

RANDERS, JØRGEN and MEADOWS, DENNIS L. "System Simulation to Test Environmental Policy I: A Sample Study of DDT Movement in the Environment." Mimeographed. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 1971.

SHANTZIS, STEPHEN B. and BEHRENS, WILLIAM W. III. "Population Control Mechanisms in a Primitive Agricultural Society." Mimeographed. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 1971.

"... likely to be one of the most important documents of our age." ANTHONY LEWIS, in the New York Times

The message of this book is urgent and sobering: The earth's interlocking resources—the global system of nature in which we all live—probably cannot support present rates of economic and population growth much beyond the year 2100, if that long, even with advanced technology.

In the summer of 1970, an international team of researchers at the Massachusetts Institute of Technology began a study of the implications of continued worldwide growth. They examined the five basic factors that determine and, in their interactions, ultimately limit growth on this planet—population increase, agricultural production, nonrenewable resource depletion, industrial output, and pollution generation. The MIT team fed data on these five factors into a global computer model and then tested the behavior of the model under several sets of assumptions to determine alternative patterns for mankind's future. **THE LIMITS TO GROWTH** is the nontechnical report of their findings.

The book contains a message of hope, as well: Man can create a society in which he can live indefinitely on earth if he imposes limits on himself and his production of material goods to achieve a state of global equilibrium with population and production in carefully selected balance.

"The most important business on earth, quite literally, is the business of planetary planning. This book is a pioneering effort in that direction. It has something of value to say to anyone who understands the precarious realities of the human habitat."
NORMAN COUSINS, editor and author

"If this book doesn't blow everybody's mind who can read without moving his lips, then the earth is kaput."
ROBERT C. TOWNSEND, author of *Up the Organization* and former president and chief executive officer of Avis Rent A Car Corporation

"This book raises life-and-death questions that confront mankind as it strives for achievement of a prosperous and equitable society."
VERNON E. JORDAN, JR., executive director, National Urban League

"The Meadows and the MIT team have done a great service in constructing a preliminary model of the world in which all the assumptions and parameters are explicit and thus open to criticism and modification. Those who object to the characteristics of the model are challenged to help improve it; those who dislike the characteristics of the system it simulates might consider working for changes in the real world."
PAUL EHRLICH, professor of biology at Stanford University

La croissance en question : voilà la grande affaire de notre temps. Et voici le document de base : *Limites à la Croissance* — le rapport Meadows établi au Massachusetts Institute of Technology par une brillante équipe de chercheurs internationaux, à l'instigation du Club de Rome.

Exploratoire, imparfait, il suffit à bouleverser nos conceptions de l'avenir, qu'elles soient conservatrices, révolutionnaires, voire eschatologiques. Comme le dit sobrement l'un des inspirateurs : « Nous ne faisons pas de la prévision. Nous disons : voilà ce que donnent, à telle ou telle échéance, les tendances actuelles. » Eh bien, sauf renversement, elles donnent la catastrophe.

Ce « renversement de tendance », les hommes du Club de Rome l'ont opéré en eux-mêmes : ils y puisent la sorte d'énergie qui soulève les montagnes. Le rapport Meadows n'est qu'un premier coup de gong : ils se préparent à mettre les dirigeants du monde entier, chiffres en main, face aux risques de mort.

Quel est donc ce collège invisible de 80 membres qui pénètrent, tels des catalyseurs, dans les principaux centres de décision de la terre ? Janine Delaunay est allée jusqu'au bout de l'enquête personnelle, auprès des principaux leaders. Journaliste et femme, elle a participé à la plupart des émissions de prospective du service des Sciences humaines à l'O.R.T.F. Et elle nous fait toucher du doigt ce qui les distingue de la futurologie « en roue libre » : ces hommes, avec toutes les ressources conceptuelles et technologiques de l'intelligence humaine, ont l'acharnement viscéral des sauveteurs.

Pour éclairer le débat sur la croissance, nous publions simultanément l'enquête sur le Club de Rome et le rapport Meadows, sous le titre *Halte à la croissance ?*, et le premier programme de politique écologique à s'en inspirer, sous le titre *Changer ou disparaître*.