

LIMITES À LA CROISSANCE :  
CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES AU SUJET  
DU « MODÈLE DU MONDE » PROPOSÉ PAR FORRESTER \*

1. *Introduction.*

Depuis la parution du livre *The Limits to Growth*, le thème des limites de la croissance a fait l'objet de maints écrits et de maints discours. Ce livre est un rapport que D.L. Meadows et ses collègues ont rédigé à l'intention du « Club de Rome ». Comme le déclarent ses auteurs ([1], p. 23), « Ce livre ne prétend pas donner une description complète et scientifique de toutes les données et de toutes les équations mathématiques qui interviennent dans le modèle du monde ». Mais ce sont précisément ces équations dont nous avons besoin. Le but de la présente étude n'est pas de présenter toutes les opinions qui ont été émises jusqu'à ce jour sur ce sujet en un ragoût réunies. Il ne sera pas question non plus de discuter du caractère optimiste ou pessimiste, conservateur ou révolutionnaire, des conclusions de ce rapport. Nous voulons avant tout comprendre comment on parvient à ces conclusions ; mettre en évidence ce qui a été fait et surtout identifier ce qui a été négligé. Il s'agit de tenter de savoir, par une critique immanente, dans quelle mesure le modèle peut être pris au sérieux. Nous voulons examiner à la loupe les hypothèses, tant explicites qu'implicites, sur lesquelles il est fondé. Ce n'est qu'ainsi que nous pourrons en tirer des enseignements.

Pour cela, cependant, nous aurions besoin des équations mathématiques du modèle. Or, jusqu'à ce jour, ces équations n'étaient accessibles ni par des ouvrages publiés en librairie ni par le truchement de membres du comité exécutif du Club de Rome. Il faut donc se rabattre sur le modèle de J.W. Forrester [2], dont celui de Meadows est une forme perfectionnée. La partie centrale de l'ouvrage de Forrester, son quatrième chapitre, a d'ailleurs pour titre « Limits to Growth ».

Encore une remarque qu'il y a lieu de mettre d'emblée en évidence : nos considérations n'ont pas pour objectif de nous distancer des problèmes à la solution desquels Forrester entend contribuer. Ces problèmes, en effet, sont sérieux, encore plus, peut-être, que ne le pense

\* Traduction d'une conférence donnée le 17 septembre 1973 à Maria Lach BRD.

Forrester. Pour cette raison, justement, on ne doit pas se contenter de la première tentative de compréhension et de solution.

## 2. *Antécédents.*

Pour commencer, nous allons jeter un coup d'œil sur l'histoire de la genèse de ces deux modèles et dire deux mots du Club de Rome. Pour cela, laissons parler son fondateur, A. Peccei ([3], pp. 13-15) :

« Tout a commencé par quelques discussions, en 1967, à Paris, lesquelles aboutirent à la décision de convoquer, en avril de l'année suivante, un groupe d'intellectuels et de scientifiques d'Europe occidentale en vue de discuter, au siège de l' 'Accademia dei Lincei', à Rome, de la problématique mondiale. La réunion fut rendue possible grâce à un soutien financier de la Fondation Agnelli. A la fin de la réunion, quelques participants décidèrent de poursuivre les discussions dans un cercle plus étendu ; ils baptisèrent leur groupe 'Club de Rome', du nom du lieu où tout avait commencé. »

« Actuellement, le Club compte environ quatre-vingts membres, parmi lesquels on trouve des scientifiques, des humanistes, des économistes, des enseignants, des hauts fonctionnaires et des industriels. Bien que le nombre des membres soit limité à cent, la sélection s'est faite d'une manière telle que les cultures et les systèmes de valeurs les plus variés soient représentés. Si aucun des membres n'est amené à participer à la prise des décisions politiques du moment et si le Club en tant que tel n'a aucune attache idéologique, politique ou nationale, chacun d'eux toutefois est en contact avec les responsables qui ont à prendre de telles décisions et a accès à une masse importante d'informations et de savoir. Ces personnalités (du Club de Rome), aux origines les plus variées et aux expériences les plus diverses, ont en commun une conviction, celle que les problèmes auxquels l'humanité doit désormais faire face sont d'une complexité traditionnelle et les institutions actuelles ne sont plus à même de les résoudre. »

« Les objectifs du Club englobent la recherche et l'action, et ils sont réunis au sein d'un vaste projet baptisé, d'après la situation qu'il convient de maîtriser, 'The Predicament of Mankind' (l'impasse de l'humanité). Ce projet vise à :

- acquérir une compréhension plus approfondie de l'état critique dans lequel se trouvent les affaires humaines, et des perspectives, tout à la fois incertaines et de plus en plus rétrécies qu'offre l'avenir, ainsi que diffuser ces connaissances,
- créer un climat d'action, de portée mondiale et touchant un cercle plus large de responsables de décisions,
- découvrir et proposer des méthodes novatrices et de nouveaux types d'organisation aptes à permettre de conditionner, dans l'avenir, d'une manière plus intelligente, les affaires humaines. »

« La nature même du Club et son effectif font que son action ne peut être que catalytique. La recherche sur les 'limites' est sa première manifestation ayant un certain retentissement. »

« Depuis sa fondation, en 1968, le Club s'est efforcé, au cours des deux premières années, d'établir des relations avec des cercles influents d'essence scientifique, industrielle et politique — de Moscou à Washington, de Tokio à Ottawa et Rio, ainsi qu'en Europe. Sa conviction que les problèmes rencontrés par la société moderne croissent en nombre et deviennent toujours plus difficiles à résoudre a été largement partagée. Mais, en général, les personnalités haut placées qui ont été touchées de la sorte se sont trouvées soit pas en situation de, soit pas disposées à entreprendre quelque chose. »... « Le peu d'efficacité de cette méthode d'exhortation était évident. »... « D'autres moyens d'information et de conviction, plus puissants et plus compréhensibles, que ceux qui avaient été utilisés jusqu'alors, s'avéraient nécessaires pour secouer l'opinion publique mondiale et les porteurs du pouvoir de décision. »

A la fin de 1969 et au début de 1970, des discussions intensives eurent lieu à Battelle-Genève, sous la direction de H. Thiemann et avec la collaboration de H. Ozbekhan ; elles portèrent sur la formulation d'un programme de recherches ayant pour but de dévoiler les problèmes mondiaux les plus importants et de montrer avec le plus de précision possible leurs inter-relations. Il devait en ressortir un programme raisonnable pour la solution globale de ces problèmes, par pas successifs. En même temps, la méthodologie d'un tel projet de recherche devait être élaborée et testée.

Ce programme fut discuté le 29 juin 1970 lors d'une réunion du Club, à Berne. « Le professeur Jay W. Forrester, du MIT, qui assista à la réunion de Berne, estima qu'il pourrait élaborer une telle méthode en perfectionnant sa technique de la 'dynamique des systèmes' » ([3], pp. 15-16).

A ce sujet, Forrester déclare ([2], pp. 13-14, XIII) : « Cette méthode avait été décrite dans 'Industrial Dynamics' [4]. L'ouvrage 'Principles of Systems' [5] expose la théorie de la structure des systèmes dynamiques et 'Urban Dynamics' [6] en est une application à la croissance et à la décadence d'une ville. Depuis quelques années déjà, une représentation de systèmes socio-industriels sous la forme de modèles comprenant des boucles de rétro-action était connue sous le nom de 'dynamique industrielle'. Cette désignation, on s'en rend compte maintenant, à l'heure où les applications qui débordent au-delà des entreprises industrielles deviennent importantes, était erronée. Comme la méthode est applicable à des systèmes complexes où qu'ils apparaissent, le terme 'dynamique des systèmes' est une désignation plus adéquate. Elle a été utilisée en politique d'entreprises, en médecine pour l'étude dynamique du diabète, on l'a appliquée à l'étude des forces sociales qui influencent la toxicomanie en matière de drogue au sein d'une communauté, à l'étude des marchés des biens de consommation ([7], [8], [9] et [10]). Cela étant, le comité exécutif du Club de Rome fut invité durant deux

semaines au MIT afin d'y examiner le programme de dynamique des synthèses et de se faire une opinion quant aux possibilités de l'appliquer au projet du Club relatif au développement mondial. L'invitation ayant été acceptée, la conférence s'ouvrit le 20 juillet 1970. (Le symposium fut financé par la Fondation Volkswagen.) « Le 'modèle dynamique des interactions mondiales' de Forrester », qui a été décrit dans [2] et que nous appellerons, en algèbre, W2, fut élaboré au début de juillet à titre de base de discussion pour la conférence... A l'issue de la réunion de juillet, le comité exécutif du Club de Rome décida de conférer au MIT une recherche devant se poursuivre durant une année ». Une 'équipe internationale, placée sous la direction du professeur Dennis L. Meadows' avait pour mission d'aller au-delà du modèle W2 et d'examiner de manière approfondie tant les hypothèses de base ainsi que les sous-systèmes qui constituent le système mondial global. (Ce projet eut également l'appui financier de la Fondation Volkswagen.)

Le modèle W2 fut publié en mars 1971 [2]. Le modèle de Meadows, que nous appellerons modèle W3, parut le 6 mars 1972 [1]. Une description détaillée de W3 a été annoncée sous le titre « Dynamics of Growth in a Finite World » [11], mais elle n'a pas encore paru.

### 3. Description du modèle W2.

Chez Forrester, le modèle W2 comprend 43 éléments. Cinq d'entre eux concernent l'état du modèle. Ce sont les grandeurs d'état de W2.

P (t)	1	PIAF	Population
N (t)	8	NR	Richesses naturelles
C (t)	24	CI	Investissement en capital
L (t)	30	POL	Pollution
A (t)	35	CI AF	Fraction de C qui est investie dans l'agriculture.

Dans les deuxième et troisième colonne du tableau ci-dessus figurent les numéros et abréviations utilisés par Forrester pour désigner les variables, dans la première colonne figurent les symboles correspondants, lesquels sont plus pratiques pour nous : les quatre premières de ces grandeurs d'état X sont intensives (ç.-à-d. additives) et, pour elles, il y a lieu d'introduire des unités [X]. Cela se fait comme suit :

- [P] Personne
- [N] Ressources naturelles consommées en 1970, par personne
- [C] Capital disponible en 1970, par personne
- [L] Pollution en 1970, par personne

La cinquième grandeur d'état, A, n'est pas extensive, mais le capital proprement dit investi dans l'agriculture, AK, le serait, lui. L'unité de temps [t] est une année.

Chaque grandeur d'état X (par X, on désigne indifféremment P, N, C, L ou A) obéit à une équation du mouvement du type

$$(o) X (t + \Delta t) = X (t) + \Delta t. \Phi [P (t), C (t), L (t), A (t)],$$

qui permet de calculer la valeur au temps  $t + \Delta t$  à partir de : (I) la valeur au temps  $t$  et (II) la valeur de la fonction  $\Phi$  du temps  $t$ . Il convient de remarquer que  $\Phi$  ne dépend pas de manière explicite de  $t$ , mais renferme par l'intermédiaire des valeurs atteintes par les grandeurs d'état au temps  $t$ .

La forme (o) des équations du mouvement est avantageuse pour le calcul pas à pas des solutions, calcul qui est appelé simulation chez Forrester (2, pp. 3-5). Nous allons dire brièvement comment on conduit ce calcul. Ce faisant, nous verrons quel genre de grandeurs apparaissent dans le modèle W2 et quel aspect prennent les cinq équations de mouvement. Nous ferons usage des valeurs  $X$  (1970), que nous désignerons par  $X_1$ , censées représenter un état normal (voir le tableau 1), et nous désignerons les grandeurs réduites  $X/X_1$  par  $x$ . Comme pas temporel  $\Delta t$ , nous prendrons 1 année. Voici quels sont les pas du calcul :

- (I) Sont connues les valeurs au temps  $t$  :  $P, N, K, L, A$  et au temps 1970 :  $P_1, N_1, K_1, L_1, A_1$ .
- (II) Calculer les grandeurs auxiliaires  $p, n, l, C/P = I, aC/P = I_a$ .
- (III) Trouver les valeurs correspondantes des fonctions  $\eta(n), f_a(I_a), \Pi_I(I), f_p(P), \beta_p(P), \delta_p(P), f_l(L), \beta_l(L), \delta_l(L), \alpha_1(L)$ , et éventuellement  $q_p(P), q_l(L)$ .
- (IV) Calculer les grandeurs auxiliaires :  $\ln(1-A)/(1-A_1) = m, f_a f_p f_l = f$ .
- (V) Trouver les valeurs correspondantes des fonctions  $\beta_m(m), \delta_m(m), v_m(m), \gamma_m(m), q_m(m), \beta_f(f), \delta_f(f), \lambda(f), q_f(f)$ .
- (VI) Calculer les grandeurs auxiliaires  $q_m/q_f$  et éventuellement  $Q = Q_1 q_p q q_m q_f$ .
- (VII) Trouver la valeur de la fonction  $\mu(q_m/q_f)$ .
- (VIII) Calculer les grandeurs auxiliaires
- |   |   |
|---|---|
| $\beta = \beta^* \beta_p \beta_l \beta_m \beta_f P$       |   |
| $\delta = \delta^* \delta_p \delta_l \delta_m \delta_f P$ |   |
| $v = v^* v_m P$   | taux de consommation des ressources naturelles                    |
| $\gamma = \gamma^* \gamma_m P$                            | taux de formation du capital                                      |
| $\varepsilon = \varepsilon^* C$                           | taux d'utilisation du capital                                     |
| $\pi = \pi^* \pi_I P$                                     | taux d'accroissement de la pollution                              |
|   | taux de réduction de la pollution                                 |
| $\alpha = L/\alpha_1$                                     | taux de réduction de la pollution                                 |
| $\tilde{A} = \lambda \mu$                                 | valeur consigne de l'investissement en capital dans l'agriculture |

(IX) Calculer la valeur des grandeurs d'état au temps  $t + 1$  en utilisant les équations du mouvement

$$(1) P(t + 1) = P(t) + \beta - \delta$$

$$(2) N(t + 1) = N(t) - \nu$$

$$(3) C(t + 1) = C(t) + \gamma - \varepsilon$$

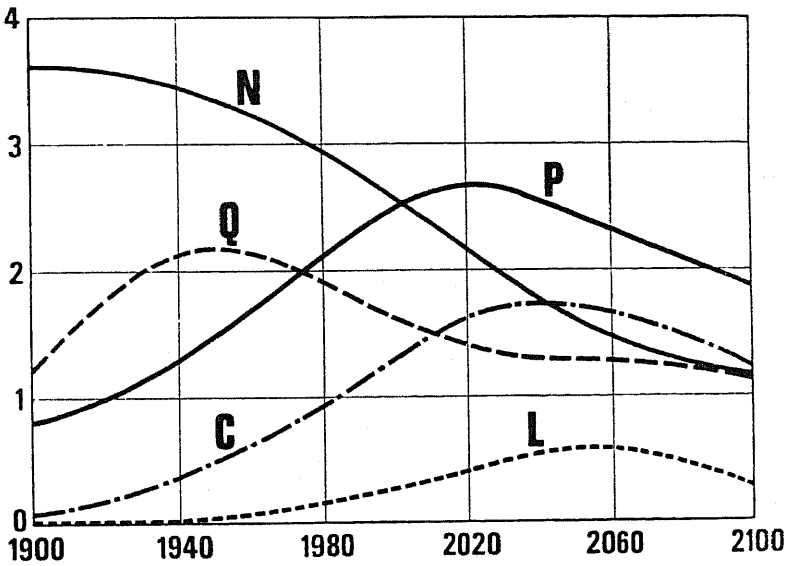
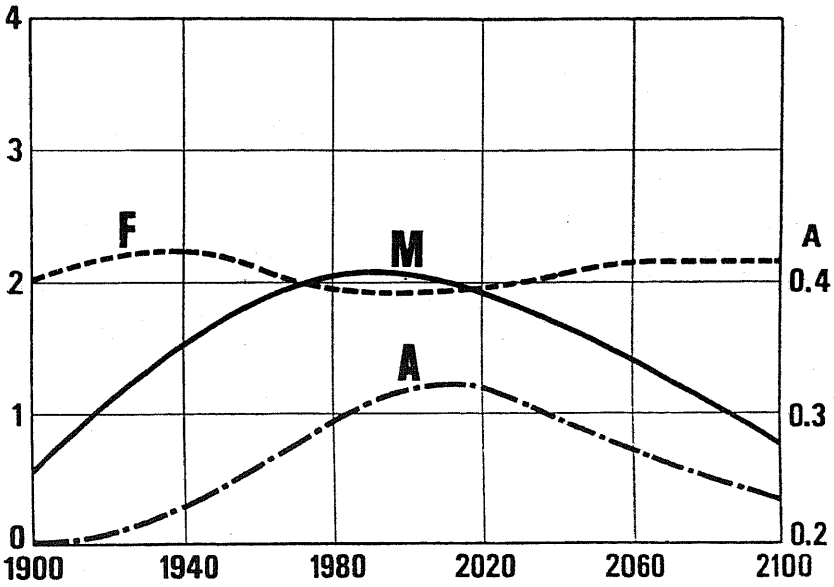
$$(4) L(t + 1) = L(t) + \pi - \alpha$$

$$(5) A(t + 1) = A(t) + \begin{pmatrix} 1 \\ - \\ \tau \end{pmatrix} (\tilde{A} - A)$$

Dans cette description du modèle W2, il apparaît, en plus des cinq grandeurs d'état, 22 fonctions et 17 grandeurs auxiliaires. Les fonctions sont choisies de telle manière qu'elles prennent chacune (à l'exception de  $\lambda$ ) la valeur 1 lorsque leur argument a la valeur de 1970. Parmi les grandeurs auxiliaires, on trouve 7 taux de variation ( $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\nu$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\pi$ ,  $\alpha$ ). Il y a en outre 8 coefficients qui permettent de modifier le modèle W2. Ce sont les valeurs standard  $\beta^*$ ,  $\delta^*$ ,  $\nu^*$ ,  $\gamma^*$ ,  $\varepsilon^*$ ,  $\pi^*$ , pour six taux, le temps d'adaptation  $\tau$  de l'investissement en capital dans l'agriculture, qui apparaît dans l'équation (5), et un coefficient de denrées alimentaires qui apparaît dans la définition de la grandeur auxiliaire  $f$  (voir aussi l'équation (6) ci-dessous).

Forrester commence son calcul en partant des valeurs  $X_0$  que prennent les grandeurs d'état  $X$  pour l'année 1900. Ce sont les valeurs initiales (voir tableau 1). Il choisit les coefficients de telle manière que les valeurs  $X_1$  qu'on obtient pour l'année 1970 soient correctes ([12], p. 18). Affectées de ces valeurs standard comme coefficients, les équations du mouvement constituent le modèle mondial W2 standard, désigné de façon abrégée par W2-0 (voir tableau 2). Les dix-huit modifications de W2 qui sont mentionnées dans [2] ont toutes, à une exception près, été obtenues par une seule et unique variation, en 1970, des coefficients (voir tableau 3).

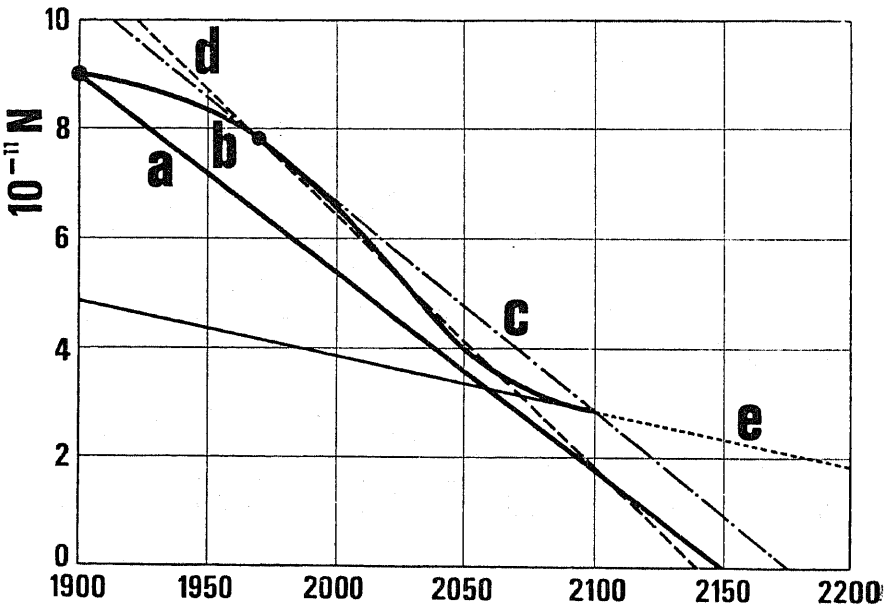
Il est important de remarquer que ni les graphiques, ni le texte ne permettent de savoir avec quelle exactitude le modèle standard W2-0 reproduit l'évolution effective des grandeurs, et pas seulement des grandeurs d'état, entre 1900 et 1970. Il y a des indices qui permettent de penser que cette exactitude n'est pas entièrement satisfaisante (voir p. ex. [13], p. 112). De plus, il est très probable qu'il existe plusieurs combinaisons de coefficients différents qui permettent, à partir de valeurs initiales données, de reproduire les valeurs prises par les grandeurs d'état pour 1970 ainsi que d'approximer de manière satisfaisante l'évolution entre 1900 et 1970. Le fait que les cinq grandeurs d'état sont, en valeur numérique, proches de leurs valeurs réelles pour 1970, ne garantit en aucune manière que le modèle soit approprié. En outre, pour quelques-unes des grandeurs,  $N$  et  $L$  par exemple, on ne voit pas clairement comment on pourrait les mesurer. A ce sujet, citons une anecdote du mathématicien M. Kac : « Avec cinq paramètres, on peut



décrire un chien. Que l'on m'en donne un sixième et je le fais frétiller de la queue ». « Et je puis choisir les paramètres de plusieurs manières différentes », ajouterons-nous.

L'évolution temporelle de quelques-unes des grandeurs du modèle W2-0 est reproduit dans les fig. 1 et 2. Des valeurs numériques sont données dans le tableau 4. En plus des hypothèses contenues dans le tableau 1, il s'agit là de valeurs qui sont estimées à partir des courbes données dans [2] (pp. 70-71).

On voit que l'investissement en capital  $C$  croît de  $0,4 \times 10^9$ , pour l'année 1900, à  $8 \times 10^9$  pour l'année 2040, puis tombe à  $5,6 \times 10^9$  pour l'année 2100. Pour les ressources naturelles en 1900, on a choisi la valeur  $9 \times 10^{11}$ , ce qui correspond à l'hypothèse que les ressources naturelles  $N_0$  disponibles en 1900 seraient complètement épuisées en 250 ans (donc en 2150) si la consommation annuelle restait constante et égale à  $3,6 \times 10^9$  unités (ce qui est par définition la consommation en 1970) (voir fig. 3 a). Dans W2-0 (b), elles tombent à  $7,7 \times 10^{11}$  pour l'année 1970 et finalement à  $2,8 \times 10^{11}$  pour l'année 2100. Les extrapolations e et d, à la figure 3, donnent comme années d'épuisement 2175 et 2140, ce qui correspond en gros aux hypothèses d'origine. L'extrapolation de la diminution annuelle en l'an 2100 (e) conduit à un équipement en 2380. Si nous avons discuté ces courbes d'une manière si détaillée, c'est parce que, dans W2-0, précisément, la croissance est limitée par l'épuisement des ressources naturelles. En outre, l'hypothèse de l'existence de ressources naturelles en quantité limitée,





non renouvelable, est dans W2, la seule qui traduise directement la finitude de la planète. (Le caractère fini des terres émergées a bien été pris en compte, mais il s'élimine très rapidement lors des calculs).

La population mondiale atteint vers 2020 un maximum d'environ  $5,3 \times 10^9$  humains, puis décroît. Vers 2100, elle atteint le chiffre de  $3,6 \times 10^9$ , soit à peu près autant qu'à l'heure actuelle. A cette date, la tendance à la baisse se poursuit ([2], p. 70). Dans le modèle standard W3-0, l'évolution est semblable, quoique plus prononcée. La population atteint, par exemple, un maximum de  $11,6 \times 10^9$  en l'an 2055. Quarante-cinq ans plus tard, déjà, elle est tombée à  $6,3 \times 10^9$ , ce qui correspond à une diminution d'environ 120 millions par an ([14] p. 23). Ces chiffres sont cités uniquement pour aider le lecteur à se faire une meilleure idée de l'allure des courbes : ils ne doivent pas l'inciter à établir des comparaisons avec des prévisions démographiques ou autres.

Le mécanisme qui déclenche cette décroissance est, grosso modo, le suivant. L'investissement en capital croît jusqu'à un niveau élevé qui nécessite d'énormes ressources naturelles, lesquelles sont consommées en quantités toujours plus grandes. Et c'est ce qui amorce la crise. Car pour pouvoir disposer du reste, il faut toujours plus de capital. A bref délai, il n'y a plus assez de capital disponible et l'activité industrielle s'effondre. Il en résulte que l'agriculture s'étiole et n'arrive plus à nourrir la population.

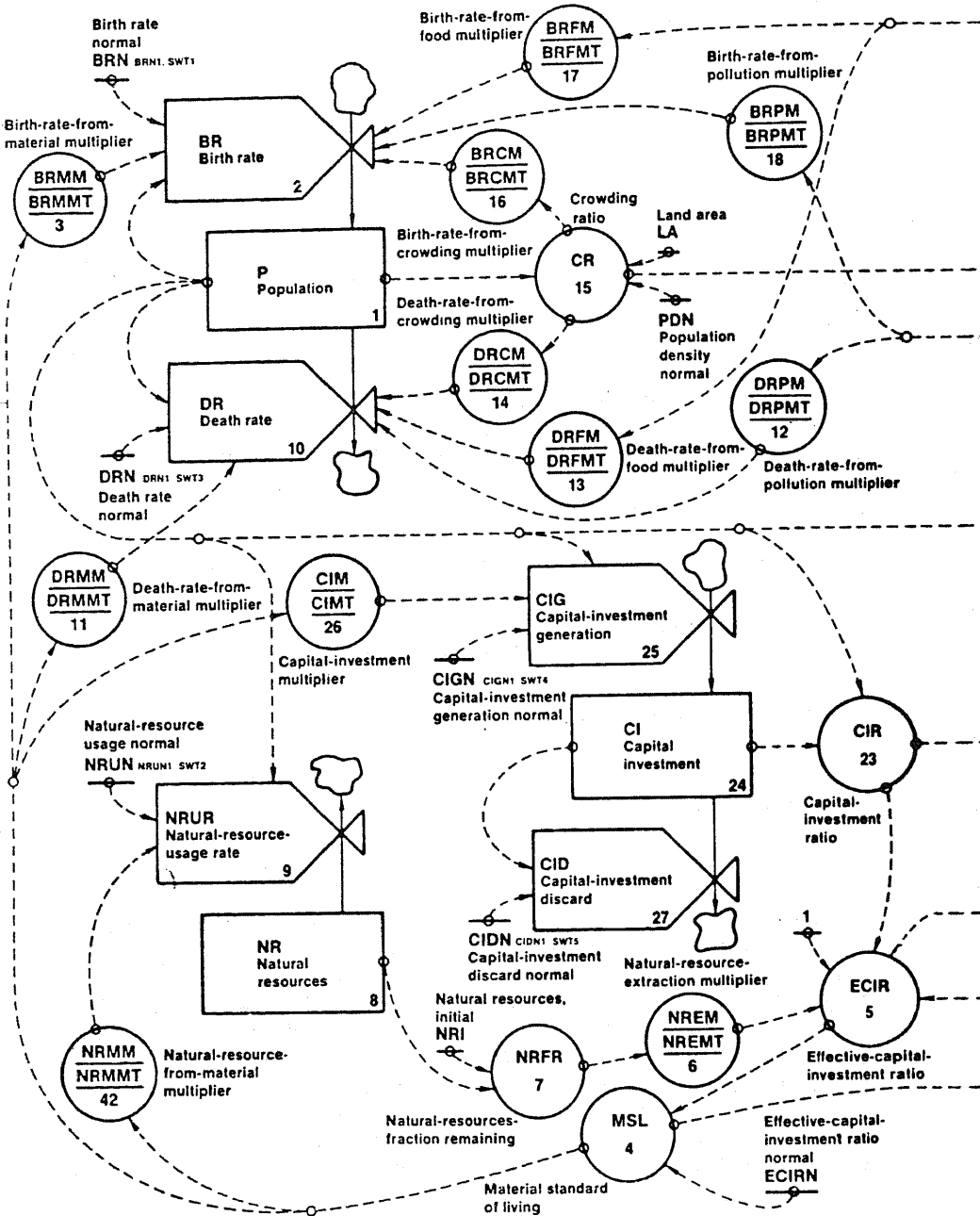
Parmi les grandeurs auxiliaires, il s'en trouve deux pour lesquelles il faut introduire des unités additionnelles. Ce sont :

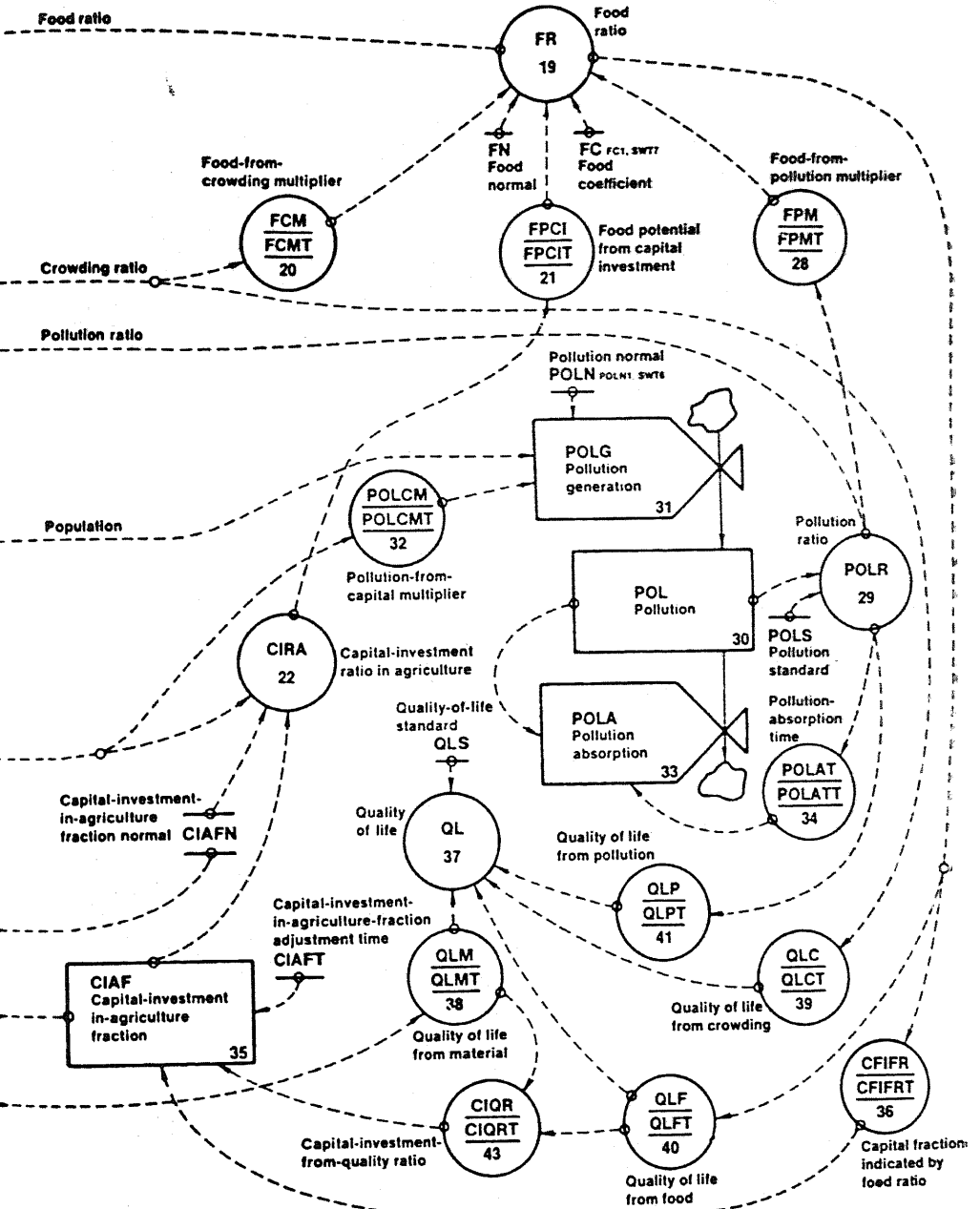
$$(6) \quad F(t) = F_1 \cdot f_a(I_a[t]) \cdot f_p(p[t]) \cdot f_l(l[t]) = F_1 f(t)$$

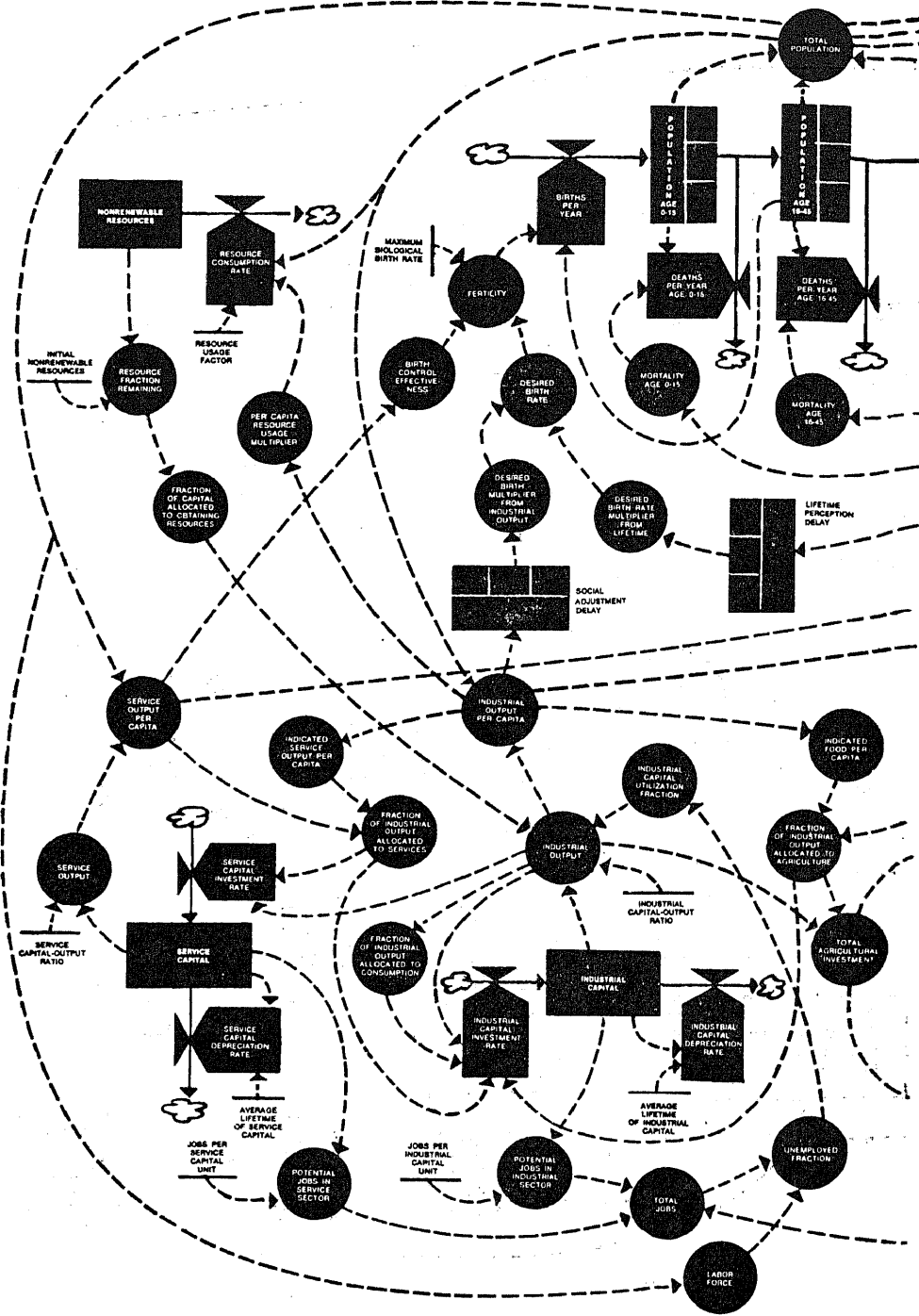
qui représente la quantité de denrées alimentaires dont dispose chaque individu en l'an  $t$ , et

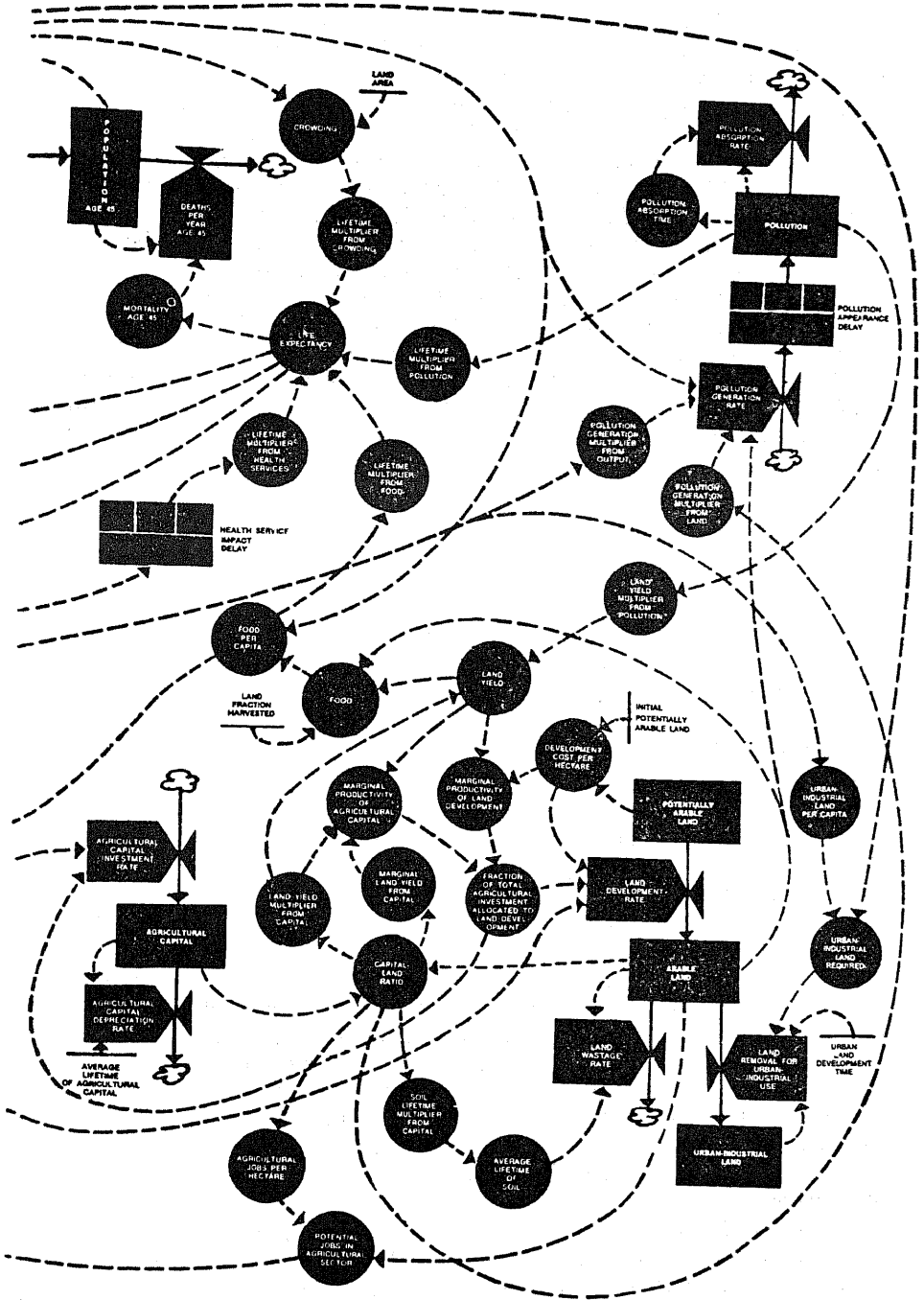
$$(7) \quad Q(t) = Q_1 \cdot q_m(m[t]) \cdot q_p(p[t]) \cdot q_f(f[t]) \cdot q_l(l[t]),$$

qui représente la qualité de vie en l'an  $t$ . L'unité [F], pour  $F$ , est la quantité de denrées alimentaires qui était à disposition de chaque individu en 1970 ; l'unité [Q], pour  $Q$ , est la qualité de vie en 1970. Tant  $F$  que  $Q$  pourraient être des grandeurs d'état d'un modèle mondial. Dans le modèle W2, elles ne le sont pas : leur valeur au temps  $t$  est déterminée, comme c'est le cas des taux, par la valeur qu'atteignent les grandeurs d'état à ce même temps  $t$  ; c'est ce que traduisent les deux « équations aux multiplicateurs » (6) et (7). Ceci contraste avec les grandeurs d'état, lesquelles sont régies par les équations du mouvement. C'est leur valeur au temps  $t + 1$  qui est déterminée par leur valeur au temps  $t$ . D'ailleurs rien, dans W2, ne dépend de la grandeur  $Q$  (ce qui ressort également de la fig. 4). Seul le rapport  $q_m/q_f$  intervient (par l'intermédiaire de  $\mu$ ) dans l'équation du mouvement (5).









La qualité de vie  $Q$  peut être considérée comme un indicateur global du bien-être du monde. Nous verrons plus loin de quoi principalement dépend cet indicateur dans le modèle W2-0.

Dans l'ouvrage [2], les 22 fonctions sont représentées par des graphiques (voir p.ex. les fig. 7 et 10) ; dans l'ordinateur, elles sont stockées sous forme de tableaux et il est procédé à une interpolation linéaire entre les 5 à 11 valeurs que contient un tableau. C'est là une manière commode d'introduire des non-linéarités dans le modèle. Il faut toutefois relever que les non-linéarités essentielles du modèle ne résultent pas de ce que ces fonctions ne sont pas linéaires, mais de ce que dans les équations du mouvement, les arguments ne figurent pas sous forme linéaire. Nous utiliserons plus loin cette remarque lors de la discussion des cinq fonctions  $\Phi$  ci-dessous lesquelles contiennent, sous forme condensée, l'entière des hypothèses sur le modèle et, par conséquent, reflètent sa structure. Mais, à ce stade déjà, la description qui vient d'être donnée de la simulation, permet de voir de quelles grandeurs d'état dépendent les fonctions  $\Phi$ . Cela ressort des équations du mouvement suivantes, dans lesquelles nous avons écrit

$\Delta X$  pour  $X(t + \Delta t) - X(t)$  :

$$(1') \quad \Delta P = \Delta t \cdot \Phi_P(P, N, C, L, A)$$

$$(2') \quad \Delta N = \Delta t \cdot \Phi_N(P, N, C, \text{---}, a)$$

$$(3') \quad \Delta C = \Delta t \cdot \Phi_C(P, N, C, \text{---}, A)$$

$$(4') \quad \Delta L = \Delta t \cdot \Phi_L(P, \text{---}, C, L, \text{---})$$

$$(5') \quad \Delta A = \Delta t \cdot \Phi_A(P, N, C, L, A)$$

En considérant ces équations, on est conduit de leur donner la forme :

$$(8) \quad \dot{X} = \Phi_x \quad [\dot{X} = \Delta X / \Delta t]$$

Les cinq équations du mouvement (1) à (5) apparaissent donc comme des approximations numériques de cinq « vraies » équations du mouvement qui ont la forme (8). Et cette approximation numérique n'est autre que l'approximation polygonale d'Euler-Cauchy, qui est la plus grossière parmi plusieurs.

Il se pose trois questions mathématiques qui ont une grosse importance pour la compréhension du modèle W2, comme d'ailleurs pour celle de tout autre modèle du même genre : (I) que vaut l'approximation des équations différentielles par les cinq équations aux différences finies et comment cette approximation se laisserait-elle améliorer ? (II) quelle est la meilleure façon de représenter la structure des hypothèses qui sont à la base du modèle ? (III) comment peut-on, à l'aide des moyens modernes de la théorie des équations différentielles, étudier la structure des solutions ?

Dans le cadre de cette étude, on ne discutera pas plus à fond la première question. La deuxième fera l'objet, dans le paragraphe suivant, de quelques remarques préliminaires. Quant à la troisième, nous y reviendrons dans le dernier paragraphe.

Mais auparavant, nous allons rapidement parler des conclusions auxquelles Forrester parvient.

Il montre que, dans le modèle W2-0, l'épuisement des ressources naturelles fixe une limite à la croissance. Si l'on restreint (dans W2-1) leur emploi de manière drastique, la pollution croît de façon catastrophique (voir tableau 3 et tableau 5). Si la production de polluants est freinée de manière radicale, la population, selon W2-2, augmente à un point tel que la croissance est paralysée. Si l'on exclut, comme dans W2-3, l'influence stabilisatrice qui a, sur la population, une densité de population élevée, la situation empire : la population continue à croître et c'est la disette qui met fin à la croissance. Dans chacun de ces exemples, la croissance est limitée par la prépondérance que prennent des facteurs inhibiteurs de croissance. Dans les modèles W2-4 à W2-14, on met en jeu d'autres mesures « intuitives », mais fausses.

On peut aussi, par des limitations auto-imposées, rendre moins actives les influences qui poussent à la croissance. Telles sont les possibilités que Forrester étudie à l'aide des modèles W2-15 à W2-18. Avec W2-18, le monde atteint un état stable que Forrester qualifie de supportable. Cela résulte de cinq mesures prises simultanément. L'utilisation des ressources naturelles est réduite, à partir de 1970, à 25 % de sa valeur dans W2-0, la pollution tombe à la moitié et l'investissement en capital n'est que de 60 %. La production de denrées alimentaires n'atteint plus que 80 % et le taux de natalité n'est que de 60 %.

Quelle signification peut-on donner à ces résultats et quel enseignement peut-on en tirer ? Le modèle W2-18 représente-t-il vraiment un mode de fonctionnement possible pour notre monde ? Si oui, comment peut-on réaliser concrètement le passage de W2-0 à W2-18 ? La dynamique des systèmes peut-elle apprendre quelque chose à ce sujet ?

#### 4. *La structure des hypothèses.*

Forrester représente ses modèles à l'aide de schémas qui illustrent graphiquement une partie des hypothèses faites. La fig. 4 reproduit (d'après [12], pp. 16-17) le schéma du modèle W2. (Le diagramme correspondant que donnent [2] et [2a] contient une erreur.) Les cinq grandeurs d'état sont représentées par des rectangles. Considérons, par exemple, le secteur de la pollution, dans le bord de droite. La pollution ( $POL = L$ ) augmente sous l'effet de la création (taux de création  $POLG = \pi$ ) et diminue sous l'effet de l'absorption (taux d'absorption  $POLA = \alpha$ ). Les taux sont figurés par des contours en forme de bouteilles qui symbolisent des vannes. Les vannes règlent des flux matériels qui, respectivement, proviennent de, et s'écoulent vers, de petits nuages, et qui sont indiqués par des flèches en trait plein. Cela nous permet d'établir sans hésitation une équation.

Ce qu'on dit plus haut correspond à l'hypothèse :

$$(9) \quad \Delta L = \pi - \alpha$$

Le schéma contient encore de nombreuses flèches en traits interrompus, qui représentent des flux d'information (influences, dépendances). On voit, par exemple, que le taux de création de pollution  $\pi$  dépend : (I) de la population P, (II) d'une fonction POLCM =  $\pi_I$  (I), laquelle dépend à son tour du capital I par tête, et (III) d'un coefficient  $\pi^*$ . Cette multi-dépendance correspond à l'équation :

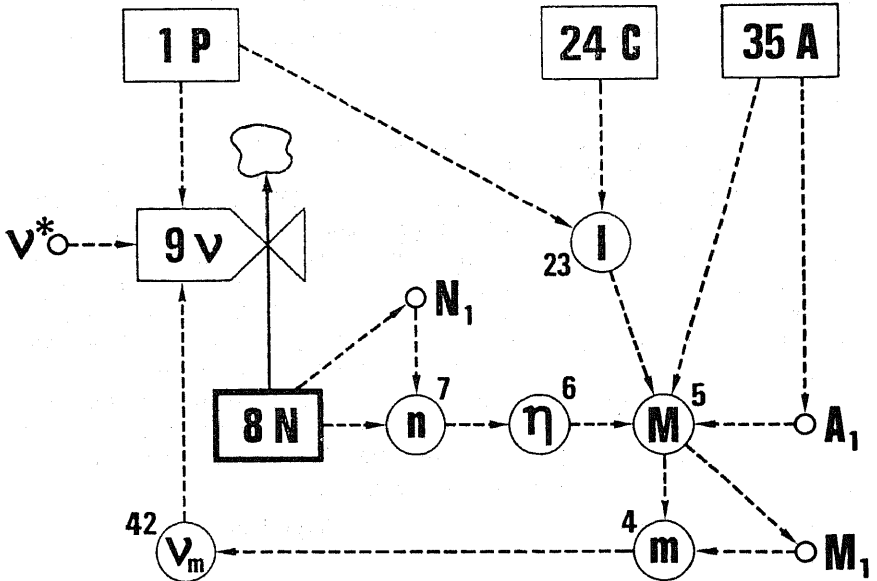
$$(10) \quad \pi = \pi^* \cdot \pi_I \cdot P$$

Le taux d'absorption de pollution  $\alpha$  dépend, lui : (I) de la pollution elle-même, et (II) d'une fonction POLAT =  $\alpha_I$  (I), laquelle dépend à son tour de la pollution réduite l. Toutefois, dans W2, cette dépendance ne s'exprime pas par une formule  $\alpha = \alpha_I$  (I) L analogue à la formule (10), mais par la relation :

$$(11) \quad \alpha = \frac{1}{\alpha_I(I)} L.$$

On le voit, le schéma ne permet pas de connaître les vraies relations de dépendance ; les équations du modèle contiennent plus d'information que n'en donne son schéma.

Par rapport à W2, le modèle W3 se révèle beaucoup plus compliqué. Il repose bien sur les cinq grandeurs d'état, mais, dans la version cor-





respondant au schéma (extrait de [1a]) reproduit à la fig. 5, il contient 99 grandeurs. Dans d'autres versions que j'ai pu examiner, il y a même 121 grandeurs. Une autre différence réside en ce que dans W2, les données numériques et les dépendances sont estimées sur la base de considérations de plausibilité, alors que, dans W3, elles sont souvent établies sur des bases empiriques. Les solutions, cependant, que donnent les deux modèles sont sensiblement les mêmes. Il semble que malgré les différences de structure superficielles que font ressortir les schémas, les deux modèles possèdent une même structure profonde. En d'autres termes, bien que la construction des modèles à partir des hypothèses séparées (hypothèses élémentaires) soit différente, il semble que leur structure globale soit tout à fait semblable. Découvrir des méthodes permettant de déceler et de représenter la structure globale qui se cache derrière une multitude d'hypothèses ayant des inter-relations complexes, est une des tâches importantes de la théorie des systèmes. De ce point de vue, il convient de discuter ici quelques-unes des équations différentielles utilisées dans W2-0.

Considérons le secteur des ressources naturelles (fig. 6). Forrester le représente par les équations ci-après, dont la numérotation est la même que dans [2] et correspond aux schémas des fig. 4 et 6.

- 4     MSL.K     = ECIR.K/(ECIRN)
- 4.1   ECIRN     = 1
- 5     ECIR.K     = (CIR.K) (I-CIAF.K) (NREM.K)/(I-CIAFN)
- 6     NREM.K     = TABLE (NREMT, NRFR.K, 0, 1, .25)
- 6.1   NREMT     = 0/.15/.5/.85/1
- 7     NRFR.K     = NR.K/NRI
- 8     NR.K       = NR.J + (DT) (-NRUR.JK)
- 8.1   NR        = NRI
- 8.2   NRI        = 900E9
- 9     NRUR KL    = (P.K) (CLIP (NRUN, NRUNI, SNT 2, TIME.K))  
                  (NRMM.K)
- 9.1   NRUN      = 1
- 9.2   NRUNI     = 1
- 9.3   SWT2      = 1970
- 23    CIR.K      = CI.K/P.K
- 42    NRMM.K    = TABHL (NRMMT, MSL.K, 0,10,1)
- 42.1  NRMMT     = 0/1/1.8/2.4/2.9/3.3/3.6/3.8/3.9/3.95/4

Ces équations sont écrites dans le langage de programmation Dynamo ; chacune d'elles correspond à une hypothèse élémentaire. « L'esprit humain est de première force lorsqu'il s'agit de mettre au jour les forces élémentaires qui s'exercent au sein d'un système et de comprendre leurs actions... Mais une fois les éléments du système réu-

nis, l'esprit humain est presque sans utilité pour en prévoir le comportement dynamique. Pour cela, l'ordinateur est imbattable ([2], p. 15) ». C'est pourquoi Forrester, trop précipité à ce que nous croyons, renonce à toute étude plus approfondie de ses hypothèses. Nous allons tenter néanmoins, fût-ce de manière très primitive, de représenter d'une manière plus synthétique les seize équations régissant le secteur des ressources naturelles.

Pour commencer, nous allons transcrire les équations dans la forme mathématique habituelle :

$$4 \quad m(t) = \frac{M(t)}{M_1}$$

$$4.1 \quad m_1 = 1$$

$$5 \quad M(t) = I(t) \frac{1 - A(t)}{1 - A_1} \eta(t)$$

$$7 \quad \eta(t) = \frac{N(t)}{N_1}$$

$$8 \quad \Delta N(t) = -v(t)$$

$$8.1-2 \quad N_1 = 9 \times 10^{11}$$

$$9 \quad v(t) = v^* \cdot v_m(t) \cdot P(t)$$

$$9.1-2-3 \quad v^* = 1$$

$$23 \quad I(t) = \frac{C(t)}{P(t)}$$

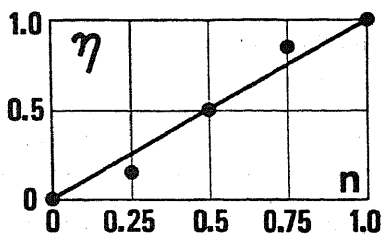
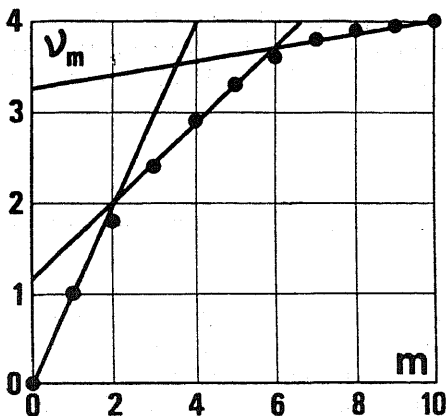
Les chiffres 6 et 42 se réfèrent à des tableaux auxquels correspondent les représentations graphiques reproduites à la fig. 7. Nous approximations  $\eta(t)$  par  $n(t)$ . Dans W2-0,  $m$  est compris entre les valeurs 0,3 (1900) et 1,1 (1990) (voir tableau 4). Cela nous permet d'égaliser  $v_m(t)$  à  $m(t)$ . Ces substitutions faites, les seize équations du secteur N peuvent être remplacées par la seule équation

$$(12) \quad \Delta N = - \frac{1}{1 - A_1} \frac{1}{N_1} C (1 - A) N$$

exprimée en termes des variables réduites, cette équation s'écrit

$$(12') \quad \Delta n = - \frac{C_1}{N_1} \frac{1}{1 - A_1} c (1 - 0.3a) n,$$

où la valeur numérique du coefficient précédant le terme  $c(1-0, 3a)n$ , qu'on retrouve constamment, vaut approximativement  $5,7 \times 10^{-3}$ . Il convient de remarquer que malgré une linéarisation drastique des fonctions  $\eta$  et  $v_m$ , l'équation du mouvement n'est pas linéaire en les grandeurs d'état.



On voit apparaître ici, donc déjà à titre de supposition lors de la mise en équation, l'effet malsain de l'investissement en capital : plus l'industrie (donc pas l'agriculture) dispose d'argent  $C(1-A)$ , plus vite sont épuisées les ressources naturelles. En outre, l'équation (12) montre que ces dernières ne peuvent que diminuer et jamais augmenter. Cette hypothèse apparaît raisonnable à quiconque considère que  $N$  est une grandeur physique donnée (loi de conservation de la masse, Lavoisier, 1785). Mais il faut ici considérer les ressources naturelles comme un concept technico-économique, de sorte que l'on ne peut pas décider une fois pour toutes ce qu'est une ressource naturelle. En 1900, l'uranium n'en était pas une ; le pétrole n'en était pas une en 1800. En outre, la quantité des ressources naturelles dépend de la fraction des ressources naturelles reconnues qui, à un instant donné, est techniquement et économiquement accessible. Il faut encore tenir compte que les détritiques peuvent être réutilisés. L'affirmation selon laquelle les détritiques de l'un sont les richesses naturelles de l'autre, se laisse étayer aujourd'hui déjà par des exemples nombreux. Pour toutes ces raisons, une supposition qui prend aussi en compte une création de ressources naturelles apparaît comme tout à fait légitime.

Pour voir, en principe, comment une telle hypothèse peut être introduite, nous allons partir de la constatation que  $W2-0$  ne prévoit que deux affectations pour le capital : à l'agriculture est attribuée la partie

CA, le reste,  $C(1-A)$ , est utilisé pour l'accroissement de la production industrielle. Que cela soit une condition admise dans W2 ressort aussi de l'équation (12). On pourrait néanmoins admettre qu'il y ait trois affectations, c.a.d. écrire

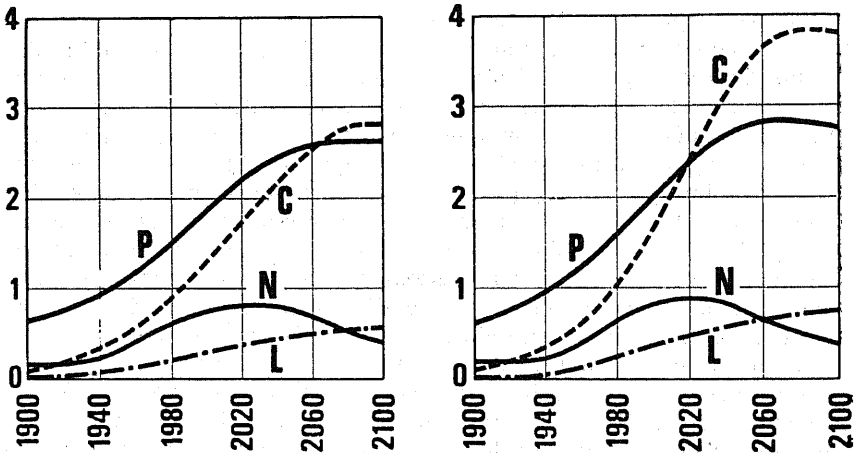
$$C = AC + SC + (1-A-S) C$$

en désignant par SC la fraction de capital qui est investie dans la technologie sans contribuer immédiatement à un accroissement de la production. L'équation du mouvement relative à N serait alors (au lieu de  $\Delta N = -\nu$ )

$$(13) \quad \Delta N = p - \nu$$

où l'on pourrait supposer  $p = p^* p_s(S)$ , avec une fonction  $p_s$  non décroissante.

Or, dans cet esprit, le modèle peut être modifié de différentes manières, tout en restant très simple, bien que moins primitif que ci-dessus. C'est ce qu'ont fait Oerleman, Tellings et de Vries [15], parmi d'autres (voir également [16]). Ils ont ramené d'un coup la valeur de N pour l'année 1900 au vingtième de la valeur admise dans W2, mais ils autorisent une production de matières premières et ils montrent que la crise de ces dernières à laquelle conduit W2-o peut être évitée (fig. 8a).



Le capital engendre des malheurs dans d'autres secteurs de W2 également. Considérons à nouveau le secteur de la pollution (fig. 9).

Les quinze équations de ce secteur peuvent être réunies en une seule équation du mouvement :

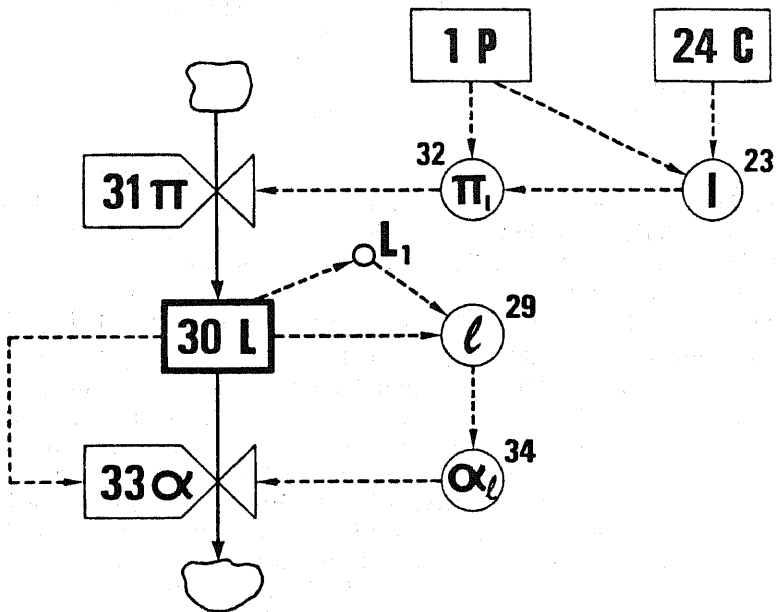
$$(14) \quad \Delta L = \pi_1 (I) P \frac{1}{\alpha_1 (I)}$$

dans laquelle  $I = C/P$  et  $l = L/L_1$ , la fonction  $\pi_1$  et  $\alpha_1$  étant reproduites à la figure 9. Dans W2-0,  $I$  varie entre 0,25 et 1,55, et  $l$  entre 0,4 et 5,5 (tableau 4), ce qui permet d'approximer  $\pi_1$  par  $I$  et  $\alpha_1$  par  $1/3$ . Cela conduit dans W2-0 à l'équation suivante pour la pollution :

$$(15) \quad \Delta L = C - 3L_1$$

ou, en termes de variables réduites :

$$(15') \quad \Delta l = c - 3$$



Ces équations résument l'ensemble des hypothèses relatives au secteur de la pollution. Toutes les hypothèses élémentaires aboutissent donc essentiellement à une hypothèse, à savoir qu'un accroissement de l'investissement en capital conduit à un accroissement accéléré de la

pollution. La simulation ne peut s'empêcher de restituer cette hypothèse en tant que résultat, ce qui confirme, au premier coup d'œil, la fig. 1. Dans le modèle W2-4 (tableau 3), Forrester a étudié les conséquences d'un accroissement de l'investissement en capital, et cela en augmentant, à partir de 1970, de 20 % la valeur standard  $\gamma^*$  (CIGN) du coefficient du taux de formation du capital. D'où il découle que l'investissement en capital est toujours supérieur à 20 % à ce qu'il est dans W2-0. La conséquence, comme on pouvait s'y attendre, est une augmentation catastrophique de la pollution (fig. 11, extraite de [2], p. 96). En fait, l'équation du mouvement pour la pollution peut être approximée, presque comme dans W2-0 par

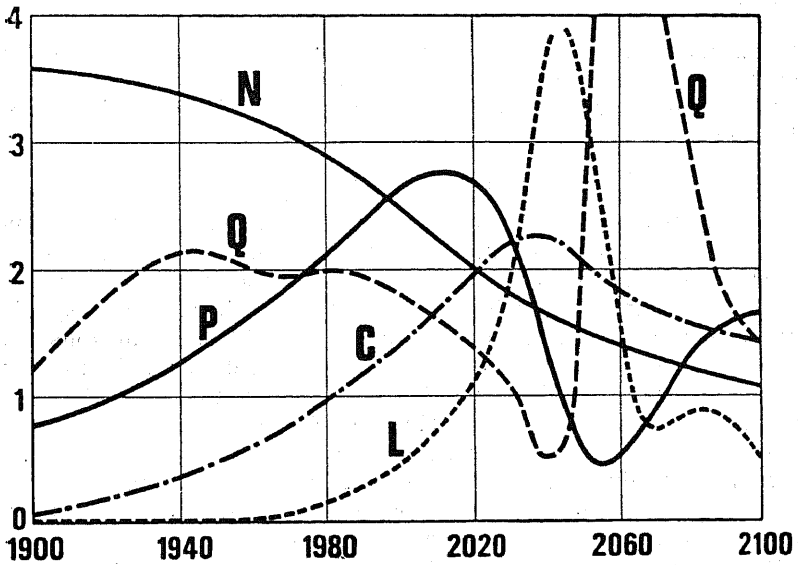
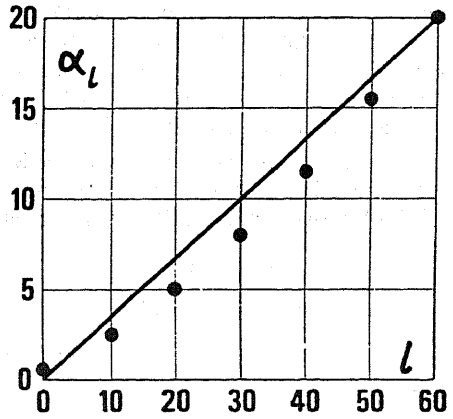
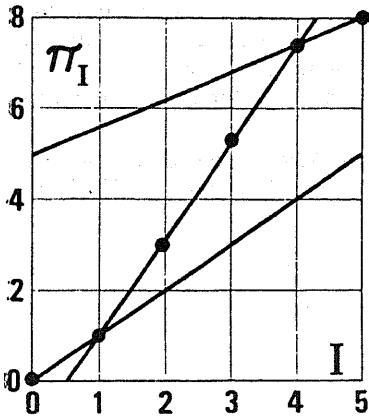
$$(16) \quad \Delta L = \frac{8}{5} C - 3 L_1$$

Forrester déclare : « Ce résultat est important non seulement du fait de la conclusion qu'il exprime, mais parce qu'il montre comment, au sein d'un système social, un changement apparemment bénéfique peut avoir en réalité des conséquences catastrophiques » ([12], p. 21). La fig. 11 « devrait nous rendre prudents à l'égard de programmes précités nés d'impressions humanitaires ne tenant compte que du court terme. L'intuition, l'évidence a priori, la passion oratoire ne sont nullement des guides auxquels on peut se fier lorsqu'il s'agit de porter un jugement sur les conséquences d'une intervention dans un système complexe ». ([2], p. 97). D'une manière très générale, Forrester souligne constamment le comportement anti-intuitif des systèmes sociaux ([12], p. 3). « Les caractéristiques dynamiques des systèmes sociaux induisent souvent l'homme en erreur » ([2], p. 93). « Les solutions intuitivement évidentes apportées à des problèmes sociaux finissent souvent dans un des pièges tendus par le caractère d'un système complexe » ([2], p. 94).

Gardons la tête froide. Qu'y a-t-il ici qui soit véritablement anti-intuitif ? L'hypothèse, bien sûr, quand on la met sous la forme synthétique (15). Lorsqu'il est question de lutte contre la pollution, on entend dire généralement que telle ou telle mesure, en principe, pourrait être prise, mais que cela coûterait trop cher. Selon W2, cependant, plus l'on fait, plus la situation empire. (C'était déjà le cas dans Urban Dynamics [6].) Pourtant, « quand de forts investissements en capital ont pour effet qu'un capital plus important est consacré à maîtriser la pollution, il se pourrait qu'un accroissement de l'investissement en capital ne conduise pas à un accroissement de la pollution », déclare Forrester lui-même ([2], p. 56).

Le modèle de Forrester peut facilement être modifié pour parer à cette critique. Le plus simple consisterait à remplacer (14) par

$$(17) \quad \Delta L = \pi_1 ((1-A-S)C) + \pi_2 (SC) - \frac{L}{\alpha_1 (1)}$$



Comme précédemment, SC représente la fraction du capital qui est investie dans la technologie sans accroître immédiatement la production. La fonction  $\pi_1$  peut être, à la manière de  $\pi_1$ , une fonction à croissance monotone; en revanche,  $\pi_2$  décroît de manière monotone (éventuellement avec une saturation). Oerlemans et al. [15], dans leur modèle évoqué plus haut, ont, comme Forrester, augmenté l'investissement en capital de 20 % à partir de 1970. Mais il n'y a, alors, pas de catastrophe due à la pollution (fig. 8b).

Les trois autres secteurs de W2 peuvent être traités d'une manière analogue. Pour raison de simplicité, nous nous limiterons à W2-0. On obtient alors les équations suivantes :

$$(1-0) \quad 10^2 \Delta p = -5.1 \ c(1-0.3a)n + 0.32p^2 + 0.10lp$$

$$(2-0) \quad 10^8 \Delta n = -5.7 \ c(1-0.3a)n$$

$$(3-0) \quad 10^2 \Delta c = 7.1 \ c(1-0.3a)n - 2.5 \ c$$

$$(4-0) \quad \Delta l = c - 3$$

$$(5-0) \quad 10^2 \Delta a = 4 + 3.7 \frac{1}{p} \ c \ (1-0.3a)n - 7.3a$$

Dans l'équation relative à  $p$  et à  $c$ , on a donné la valeur 1 au rapport des denrées alimentaires :

$$(6-0) \quad f = 1$$

Un coup d'œil sur la fig. 2 ou sur le tableau 4 montre que, dans W2-0,  $f$  varie peu au cours des ans : entre 0,97 et 1,07 seulement. Avec ces hypothèses, on trouve, pour l'indicateur de qualité de vie, l'expression suivante :

$$(7-0) \quad Q = 1.4 \ (1.6 - 0.6p) \ (1.1 - 0.021))$$

Nous allons faire encore une remarque au sujet du secteur population de W2. Ici encore s'applique la règle « plus ça va bien et pire ça devient ». Forrester admet explicitement que la population tend toujours vers le maximum compatible avec les denrées alimentaires disponibles ([2], légende de la fig. 2-6). « La thèse de Malthus fut de tous temps correcte et efficace. Plus est nombreuse la population qu'autorise une production accrue de denrées alimentaires, plus est grand le nombre d'hommes risquant la famine » ([2], pp. 27-28). La règle selon laquelle la limitation de la population ne peut être réalisée que par la famine se trouve donc dissimulée dans l'ordinateur. C'est pourquoi on trouve, dans W2-0 aussi, que malgré les nombreuses catastrophes prédites, la population aura en moyenne autant à manger qu'aujourd'hui.

Dans toutes les hypothèses faites, on trouve l'influence de la maxime selon laquelle seul le péril contraint l'humanité à la raison.

On peut maintenant mieux comprendre l'évolution des grandeurs dans les diverses variantes du modèle W2. Dans la variante W2-18, qui conduit à un équilibre global acceptable, les deux exigences que For-



rester tient pour essentielles nous étonnent, à savoir que pour pouvoir mieux vivre et mieux manger, il faut réduire de 40 % l'industrialisation et de 20 % la production de denrées alimentaires. Mais nous avons vu que dans le modèle W2 se dissimulait l'hypothèse qu'un accroissement de l'investissement en capital ne pouvait que mener à un accroissement de la pollution et à une réduction accélérée des ressources naturelles, et qu'une augmentation de la production de denrées alimentaires s'accompagnait nécessairement, comme Malthus l'avait déjà affirmé, d'une augmentation de la population et jamais d'une meilleure alimentation. Ce sont là, certes, des hypothèses, lesquelles peuvent être justes ou fausses, ce que le modèle W2 ne saurait décider. Comme nous l'avons déjà signalé, divers chercheurs ont fait d'autres hypothèses ; p. ex. que les ressources naturelles peuvent diminuer plus lentement, voire même augmenter, à la suite d'une injection de capital dans la technologie ; ou que l'effectif de la population soit régi aussi par des influences sociales. Ce sont là également des hypothèses, mais qui ne sont pas arbitraires : on peut les étayer par l'histoire. Le modèle de Forrester peut aussi être modifié dans ce sens. Une solution stable, et supportable, pourra ainsi être obtenue sans recourir aux mesures drastiques et en partie paradoxales préconisées par Forrester.

Que l'on ne nous fasse pas dire que ces modèles modifiés seraient justes alors que W2 ou W3 seraient faux. Les uns comme les autres reposent sur des hypothèses qui se traduisent par des équations et des chiffres. Les conséquences de ces hypothèses peuvent être étudiées à l'aide de la dynamique des systèmes de Forrester ou d'une autre manière. Ni les travaux de Forrester, ni ceux de Meadows ne nous permettent de juger la pertinence de ces hypothèses. Et ce n'est pas leur traduction en langage de programmation Dynamo qui peut nous apporter une aide quelconque à cet égard.

##### 5. *L'iceberg.*

Les objectifs visés à l'aide des modèles W2 et W3 ainsi que les enseignements qu'ils ont effectivement fournis ont fait l'objet de tout un spectre de déclarations de la part des initiateurs du travail, des auteurs des modèles et de leurs disciples, déclarations qui vont de la plus modeste à la plus tapageuse. La fierté, légitime à notre avis, qui est ressentie quant à la puissance des modèles se mue souvent en une surestimation de la portée et de la solidité des conclusions qu'on en tire. A cet égard, Forrester doit être protégé contre lui-même et contre ses disciples. La surestimation est due à une idée naïve que se font certains du concept de modèle et, avant tout, des relations existant entre « un modèle conceptuel » et « un modèle informatique ». Aussi allons-nous rappeler tout d'abord ce qu'est, à proprement parler, un modèle.

Dans un modèle, des agents A représentent une expérience donnée ou une situation déterminée S, en vue d'une action exercée sur S par des agents B. Dans une telle représentation, l'expérience de départ ne saurait être reproduite exactement ; elle ne le peut d'ailleurs pas, car

alors le modèle serait superflu. Lors du passage du « représenté » au « représentant », il nous faut (I) négliger et (II) renoncer à des différences. A cela correspondent les opérations mathématiques « sous » et « quotient » (p.ex. sous-ensemble et ensemble quotient). Connaître signifie toujours choisir et identifier. L'une et l'autre de ces activités sont les constituants essentiels de ce qu'on nomme couramment abstraction. Sous cet angle, un modèle est une expérience abstraite. Mais selon quels critères procédons-nous au choix et à l'identification ? Cela se passe bel et bien en vue d'une action anticipée qui détermine l'intérêt spécifique que nous portons à l'expérience de départ. C'est de cet intérêt que dépend le processus d'abstraction qui conduit à la constitution de la représentation. Et de même qu'en physique moderne, on a été conduit à introduire le concept de grandeurs complémentaires (que l'on ne peut mesurer simultanément avec une précision arbitraire), on doit compter ici avec l'existence d'intérêts complémentaires qui ne peuvent être satisfaits simultanément de manière complète. Si l'on se trouve devant un problème, on est obligé de recourir à des modèles complémentaires et de renoncer à l'espoir de bâtir un super modèle englobant tous les modèles complémentaires ainsi que les particularités qui leur sont propres. Pour cette raison aussi, il n'existe pas de « modèle du monde ». Il y a d'ailleurs encore d'autres raisons à cela, que nous ne pouvons aborder ici.

Juger un modèle consiste d'une part à établir si la représentation choisie pour une expérience est adaptée ou non à l'intérêt, que cet intérêt soit explicitement déclaré ou qu'il reste implicite. D'autre part, il faut examiner critiquement les intérêts eux-mêmes en jugeant des moyens nécessaires à leur satisfaction qu'a révélés le modèle. C'est ce qu'exprime si bien le dicton « les moyens condamnent la fin ».

Qui va construire le modèle et qui va s'en servir sont des questions importantes, pour des raisons avant tout pratiques et non pas idéologiques. Mais là-dessus aussi nous devons passer.

Munis de ces notions fondamentales, revenons au modèle W2. L'expérience de départ, c'est le système du monde. « Par système du monde, nous entendons l'homme, son système de société, sa technologie et le monde naturel qui l'entoure » ([2], p. 1). C'est pour ce système du monde qu'il faut bâtir un modèle. « Seuls seront discutés ici les traits les plus généraux du système du monde » ([2], p. IX). Quel est l'intérêt spécifique qui régit le choix des traits généraux qu'il convient d'introduire dans le modèle ? Les éléments du système du monde, comme nous l'avons vu plus haut, réagissent les uns sur les autres. « L'interaction de ces éléments engendre croissance, changement et contrainte. La contrainte au sein du système du monde se traduit par un excédent de population, un excès de pollution et une inégalité de niveau de vie » ([2], 1). « L'objectif que vise le projet est de comprendre quelles sont les mesures dont dispose l'humanité pour lui permettre d'opérer le mieux possible le passage de la croissance à l'équilibre » ([2], VIII). C'est là en fait la formulation par Forrester du projet du Club de

Rome « l'impasse de l'humanité », mais le modèle W2 a été mis sur pied précisément en vue de montrer que la dynamique des systèmes était la méthode appropriée pour atteindre l'objectif défini plus haut. Et cela en les termes suivants : « Cet ouvrage décrit un modèle dynamique conçu à l'échelle du monde, qui met en relation la population, l'investissement en capital, l'espace géographique, les ressources naturelles, la pollution et la production de denrées alimentaires. C'est à eux que semble due la dynamique de l'évolution du système du monde » ([2], 1-2).

L'abstraction conduit à représenter le système du monde au moyen de cinq grandeurs d'état (P, N, C, L, A) et d'une série d'hypothèses relative aux relations de ces grandeurs les unes avec les autres. (Ces hypothèses ne contiennent, à part les cinq grandeurs d'état, que des coefficients). L'ordinateur permet, une fois qu'on lui a donné des valeurs initiales pour les cinq grandeurs d'état, de calculer (de simuler) leur évolution en fonction du temps. Le modèle W2 du système du monde, cependant, ne consiste pas seulement en les quarante-trois équations que l'on trouve dans [2] (ou leur condensation en cinq équations de mouvement) ; les hypothèses qui relient les grandeurs apparaissant dans les équations à l'expérience de départ « système du monde » constituent une partie essentielle du modèle. Ce n'est pas seulement le résultat de l'abstraction, mais également le processus d'abstraction lui-même qui constituent le modèle. Les formules mathématiques ne sont que la partie visible de l'iceberg.

Lorsque l'expérience de départ n'a rien de mathématique, le processus d'abstraction prend naissance inmanquablement dans la pensée, dans le verbal. Un modèle mathématique présuppose toujours l'existence d'un modèle mental : il ne s'appuie donc pas directement sur une expérience, mais bien sur un modèle mental. Un modèle verbal mesquin, inadéquat peut, certes, conduire à des formules mathématiques exemptes d'ambiguïtés et vérifiables, mais cette absence d'ambiguïtés des formules ne garantit nullement l'adéquation du modèle, voire son exactitude. Inversement, le meilleur modèle verbal peut être ruiné par une formulation inadéquate. (A propos de ce passage, consulter aussi [17].)

« Le modèle n'est pas meilleur que la théorie qui lui est sous-jacente. Un bon modèle informatique se distingue d'un mauvais en ce qu'il englobe plus d'éléments essentiels d'un système social qu'il prétend représenter. Lorsque nous bâtissons un modèle mathématique, nous sommes obligés d'énoncer clairement les hypothèses sur lesquelles se fonde notre modèle mental » ([2], 15). La concordance avec ce qu'on vient de dire ci-dessus n'est que superficielle. Chez Forrester, l'énoncé des hypothèses se réduit au seul contenu des formules. Mais les hypothèses essentielles sont dissimulées dans la réduction du système du monde à cinq grandeurs d'état. Or « une population croissante, une pollution grandissante, un bien-être économique inégalement réparti sont-ils des causes ou des symptômes ? » ([1], 1). Une partie des critiques émises à l'égard des modèles W2 et W3 concerne précisément cette réduction.

Nous ne voulons pas, dans ce travail, décider si celle-ci est fondée ou non ; nous nous contentons de remarquer que les hypothèses conduisant à cette abstraction ne sont énoncées explicitement, voire discutées, ni dans [2] ni dans [3]. On se contente de déclarer : « Plusieurs grandeurs importantes ont été négligées. L'agrégation va si loin que la différence entre pays développés et pays sous-développés n'apparaît plus de manière explicite. La plupart des concepts mis en jeu dans le modèle du monde reflètent les attitudes et les motivations du passé immédiat et du présent. Par conséquent, les changements qui, du fait de la prise de conscience de la situation critique menaçant l'humanité, pourraient se faire jour dans les aspirations des hommes et dans les valeurs auxquelles ils s'attachent ne sont pas prises en considération dans ce livre » ([2], IX).

Partons maintenant du fait que W2 ne doit être rien de plus que « l'établissement de relations entre la population P, l'investissement en capital C, les ressources naturelles N, la pollution L et les denrées alimentaires » (respectivement l'investissement en capital dans l'agriculture A) ([27], 1). Peut-on encore dire, dans ces conditions : « ... j'ai une plus grande confiance dans ce modèle du système du monde que dans d'autres qui sont à ma disposition. Par conséquent, c'est là le modèle que j'utiliserais pour recommander des mesures » ([1], IX) ? « Nombreux sont ceux qui attaquent violemment le modèle parce que celui-ci prétend servir de base à un changement de notre manière de faire... Cela est vrai ; le modèle du MIT W3 ne peut en aucun cas, dans l'état provisoire qu'il a actuellement, constituer un fondement solide pour un changement de politique » ([18], 5).

Renonçons donc à préconiser des mesures et contentons-nous de considérer « les effets et les interactions de quelques grandeurs importantes et quantifiables du système du monde » ([18], 5), en l'occurrence les grandeurs d'état P, N, C, L et A. Remarquons tout d'abord qu'il n'est pas clair du tout comment les grandeurs N et surtout L peuvent être mesurées et quantifiées pratiquement. Et il faut encore souligner que, dans ce modèle, il est supposé non seulement que les cinq grandeurs choisies sont les plus importantes qui puissent être quantifiées, mais encore qu'elles ne peuvent dépendre de rien d'autre que de combinaisons d'elles-mêmes, c.a.d., en termes mathématiques, qu'elles sont régies, en fin de compte, par cinq équations différentielles autonomes. Le système décrit par ces cinq grandeurs est considéré comme un système clos. « Nous nous intéressons à des systèmes en tant que causes d'un comportement dynamique. L'intérêt porte sur les interactions à l'intérieur du système... Tout comportement déterminé doit être provoqué par une combinaison de composantes en interaction. Ces composantes existent à l'intérieur d'une frontière qui définit le système et l'entoure » ([15], 4-1).

Acceptons tout cela. La route est maintenant libre pour une discussion de ce que Forrester appelle le modèle W2, à savoir de quarante-trois équations écrites de manière précise. Il faut, cependant, supposer

et postuler beaucoup avant de parvenir aux équations. Et très peu de ceci est énoncé. Dans quelle mesure peut-on se fier aux équations ? Que peut-on encore en attendre ?

#### 6. *Ce qu'apporte le modèle W2.*

Quelle position minimale est-on en droit d'adopter à l'égard de W2 ? On peut dire qu'il s'agit là de mettre en évidence les comportements généraux types que peut prendre le système dans l'hypothèse que les interactions existant actuellement se maintiennent. Il ne s'agit donc pas de faire « une prévision exacte des valeurs que prendront les variables en une année déterminée quelconque de l'avenir » ([1], 93). « La recherche du MIT ne devrait pas s'embarquer dans des prévisions, elle ne devrait pas constituer elle-même un morceau de futurologie ni chercher à décrire des scénarios probables pour le monde ou l'une quelconque de ses parties à un moment quelconque de l'avenir » ([3], 17). « Nous nous intéressons ici à des modes de comportement généraux. Les graphiques obtenus ne sont que des indications sur les tendances de comportement d'un système » ([1], 93). « Le but visé était essentiellement de montrer, d'un point de vue global et conceptuel, quels avènements pourraient résulter du présent, compte tenu des modes de comportement actuels, des constantes de temps correspondantes, de la manière d'appréhender les problèmes et des remèdes 'classiques' » ([3], 17). « Tant l'équipe de recherche que le Club ont déclaré clairement que l'étude devrait être considérée comme une analyse et une projection des tendances actuelles et de leurs interactions, en vue de montrer les conséquences d'un maintien des positions et des mesures prises actuellement » ([18], 5). « En d'autres termes, si une série de développements actuels se poursuit sans changement dans l'avenir et si nous admettons que leurs relations mutuelles sont celles dont le modèle tient compte, alors l'avenir aura tel ou tel aspect » ([19], 8). « L'étude... ne veut, par ses calculs, que révéler ce qui pourrait arriver si l'on extrapole vers l'avenir les tendances de croissance qui existent présentement » ([20], 212). Les opinions exprimées dans ces citations se rapportent, en fait, toutes à W3, mais elles sont certainement valables a fortiori pour W2.

L'usage des mots varie de pays en pays et de métier. D'une manière générale, cependant, on désigne par le mot prévision une expression de la forme : « Si l'hypothèse H est vérifiée, alors la conséquence C en résultera ». Le passage de H à C est établi sur la base de lois ou de régularités.

D'après cela, les modèles W2 et W3 fournissent des prévisions. Certes, ce ne sont pas des prévisions de l'évolution temporelle exacte des cinq grandeurs d'état, ce ne sont que des prévisions qui dépendent de certaines hypothèses. Mais, néanmoins, ce sont des prévisions. Bien sûr, on peut distinguer différentes sortes de prévisions d'après la nature des hypothèses. Si, par exemple, on est d'avis que les hypothèses sont vérifiées avec la plus grande probabilité, voire avec certitude, on parle

de pronostic, de prophétie, et on laisse souvent les hypothèses dans l'ombre. Très certainement, les modèles W2 et W3 ne conduisent pas à des prévisions de ce genre. Lorsque les hypothèses peuvent être exprimées sous la forme « si tout continue de la sorte », on peut parler de projection ou d'extrapolation. Les prévisions de W2 et W3 sont manifestement de cette catégorie.

Le point délicat, dans des prévisions de ce genre, est de préciser ce que l'expression 'de la sorte' signifie dans le contexte de 'si tout continue de la sorte'. En d'autres termes, le problème, pour une projection, c'est de trouver une base adéquate. On peut procéder de diverses manières pour mettre au jour « les tendances et les interactions actuelles ». Rappelons-nous comment cela est fait pour W2. On énonce quarante-trois hypothèses élémentaires au sujet des interactions entre les cinq grandeurs d'état. Cela permet par un calcul pas à pas, de déterminer l'évolution de ces grandeurs en fonction du temps. Les coefficients impliqués dans les hypothèses élémentaires sont choisis de manière que l'on obtienne, à partir des valeurs des cinq grandeurs pour 1900, leurs valeurs réelles pour l'année 1970. C'est là le modèle standard W2-0. Il est censé représenter les « tendances et interactions actuelles ».

Un coup d'œil sur le tableau 1 montre, toutefois, qu'il s'agit d'une adaptation à des valeurs empiriques pour une grandeur seulement, à savoir la population P. Cependant, même cinq courbes passant par deux points empiriques (1900 et 1970), même si elles traduisent fidèlement l'évolution complète entre ces deux années, ne sauraient garantir que les tendances et interactions actuelles ont été correctement prises en compte. Ces courbes pourraient être engendrées par des interactions ayant peu de chose en commun avec celles qui sont véritablement à l'œuvre. On se trouverait déjà en meilleure posture si l'on connaissait aussi la précision avec laquelle sont reproduites les évolutions d'autres grandeurs mesurables prises en compte dans le modèle. Il semble cependant que ce n'est pas le cas, même dans le secteur de la population. La variation du taux de mortalité au début du siècle n'est pas conforme aux données connues ([12], 18). Il n'y a pas d'indication, non plus, si on a évalué cette précision ni de la manière dont on devrait procéder.

On doit encore faire la remarque suivante : des changements dans le comportement du monde (changements de politique) ne peuvent être opérés, dans W2, que par des variations exogènes de constantes. De telles variations ne peuvent donc pas être mises au compte d'interactions entre des parties du système, si bien qu'elles ne peuvent pas être représentées par W2. Certes, les variantes W2-0 à W2-18, etc. de W2 peuvent reproduire chacune un mode de comportement du monde parmi plusieurs différents, quoique pas fondamentalement différents, mais elles ne peuvent pas reproduire le changement d'un mode à l'autre.

Par conséquent, comme le but des modèles du monde W2 et W3 consistait à projeter dans l'avenir l'évolution 1900-1970, il a été admis,

donc projeté dans l'avenir également, que les équations du mouvement du monde n'avaient pas changé pendant cette période. Or il y a tout de même eu la Révolution d'Octobre, la mutation keynesienne, le début de l'émancipation du Tiers Monde. L'objection selon laquelle tous ces changements, du fait qu'ils ne se traduisent pas par des modifications appréciables dans l'allure des courbes, n'ont que peu d'importance et, par conséquent, sont négligeables, est premièrement, pas étayée du tout, et, deuxièmement, si même elle est étayée, elle ne serait pas convaincante. Elle montrerait tout au plus que les grandeurs d'état choisies ne suffisent pas pour autoriser une extrapolation raisonnable.

Nous devons donc conclure que rien ne prouve que le modèle W2-0 corresponde aux tendances et interactions actuelles. La position minimale selon laquelle W2 représente une projection des interdépendances fonctionnelles actuelles doit être écartée. C'est moins encore qu'on doit attendre de W2.

Que reste-t-il donc maintenant ? Trois conséquences. Premièrement, le retentissement considérable qu'a eu le modèle W2 et ses dérivés. En fait, et c'est bien là ce qu'escomptait le Club de Rome, il a créé, à l'échelle mondiale et auprès d'un cercle étendu de détenteurs du pouvoir de décision, un climat propice à l'action. Par la critique du modèle de Forrester, notre réflexion sur maintes questions concernant notre avenir a progressé. Plusieurs recherches importantes sont en cours et l'on peut en attendre, d'ici peu, de nouveaux résultats intéressants. Ce que Forrester dit est, pour le moins, suffisamment explicite pour provoquer la critique et inciter à poursuivre la réflexion. D'autres travaux, précurseurs, dont le contenu empirique et conceptuel n'était certes pas inférieur à celui de W2 (p. ex., dans l'aire germanophone, l'ouvrage 'Mut zur Utopie' [21]) n'ont pas connu de répercussion aussi spectaculaire. C'est là, à coup sûr, une conséquence du prestige de l'ordinateur. Il est, en fait, troublant de voir que nombre de personnes acceptent sans autre examen maints résultats comme vrais, uniquement parce qu'ils sortent d'un ordinateur ; il convient, cependant, de ne pas oublier que l'effet de ces modèles a des causes tangibles autres que de seulement figurer au palmarès de l'ordinateur. Puis — deuxièmement — Forrester et Meadows ont, avec W2 et W3, fait la démonstration de l'aptitude d'un instrument extraordinairement utile, à la fois souple et simple, pour l'étude de processus non linéaires à interdépendances multiples. Un instrument qui permet de tirer les conséquences d'un grand nombre de relations élémentaires postulées et en étroites relations les unes avec les autres. On ne saurait exiger d'un instrument qu'il fasse la distinction entre les hypothèses qui sont raisonnables et celles qui ne le sont pas, les malthusiennes et les non-malthusiennes, les optimistes et les pessimistes. Nous avons vu que l'instrument traite les hypothèses de Forrester tout aussi bien que celles de ses contradicteurs, et que, par conséquent, il peut fournir les prévisions les plus diverses, selon les hypothèses faites. La plupart du temps, il n'a probablement pas été fait de différence entre l'instrument et l'emploi qu'en ont fait

Forrester et Meadows. Le retentissement de ces travaux est certainement dû, pour une bonne part, au sentiment que la 'dynamique des systèmes' constitue un nouvel outil de grande importance.

Enfin — et troisièmement — Forrester a eu le courage de mettre sur pied un modèle mathématique tendant à prendre en compte des interdépendances globales, et cela sans attendre que les lois décrivant les phénomènes fondamentaux aient été établies avec certitude. A partir d'hypothèses plausibles pour le système, il cherche des conclusions valables pour des parties de celui-ci. Les équations mathématiques, pour lui, ne doivent pas reproduire des grandeurs mesurées ni même mesurables, mais représenter des hypothèses globales relatives à des interactions au sein du système. L'histoire des sciences, en particulier celle de la physique, a montré que le progrès de la connaissance pouvait être arrêté si l'on se contentait de prédire les valeurs de mesures possibles. Le modèle de Ptolémée pour le système solaire, tout comme celui de Tycho Brahé permettaient de prédire, avec une précision suffisante pour les besoins de l'époque, les trajectoires des planètes. Mais ce n'est pas à partir d'eux qu'on aurait pu déduire les lois de Newton. Par son courage, Forrester a attiré sur lui les critiques les plus acerbes des économistes et des sociologues 'mesureurs'. Je tiens à saluer ce courage même si je ne me laisse pas aveugler par lui.

Les deux acquisitions de Forrester, on le voit aisément, sont exposées à deux dangers, à savoir : (1) le danger que l'acceptation des modèles par les détenteurs du pouvoir de décision soit considérée comme critère de leur utilité, voire de leur adéquation ; et (2) le danger que la facilité avec laquelle on écrit des équations ne dégénère en une légèreté insouciante de toute connaissance (voir p. ex. [22]).

### 7. *La dynamique qualitative.*

Nous avons décortiqué pas à pas les prétentions de Forrester, et de ses disciples, en ce qui concerne les résultats de son travail. Il en est resté finalement très peu de choses. Mais ce peu reste néanmoins considérable : le travail de Forrester pourrait s'avérer révolutionnaire. Les travaux révolutionnaires, toutefois, n'éclatent pas comme un coup de tonnerre dans un ciel sans nuage. En maints endroits, on avait déjà pris conscience antérieurement des grandes tâches que devait accomplir l'humanité, et l'on avait acquis la conviction que la plupart de ces tâches étaient étroitement entrelacées les unes dans les autres. A ce titre, l'ouvrage 'Mut zur Utopie' [21], et en particulier sa quatrième partie 'Alimentation de la planète, Contrôle des naissances et Démographie dirigée' peut servir d'exemple. Quant à Forrester, il a développé sa dynamique des systèmes depuis 1956 déjà.

Mais l'idée de système a été introduite, dans les sciences naturelles modernes, en 1928 déjà par L.V. Bertalanffy dans 'Kritische Theorie der Formbildung' [23]. Pour le développement futur de la théorie des systèmes, la dynamique qualitative jouera certainement le rôle d'un



outil important. Elle a été traitée récemment par le mathématicien R. Thom dans un livre qui, vraisemblablement, fera date : 'Stabilité structurelle et morphogenèse' [24]. Curieusement, la pensée qualitative manque dans la dynamique des systèmes de Forrester. A cela se rattache le fait que ses intentions rationalistes menacent de se commuer en l'inverse.

Le point de départ de Forrester est rationaliste. Dans son modèle pour ordinateur, toutes les hypothèses doivent être explicites, donc vérifiables. Au moins pour ce qui concerne les équations élémentaires, cela est nécessairement le cas. Selon Forrester, l'esprit de l'homme peut arriver jusque là, après quoi, c'est l'ordinateur qui reprend les rênes : les hypothèses et les relations sont si nombreuses que leurs conséquences ne peuvent plus être dominées que par l'ordinateur. C'est pourquoi les hypothèses et les relations sont d'emblée formulées en langage machine. C'est aussi pour cela que, parfois, les arbres cachent la forêt. De nombreuses informations ne signifient pas ipso facto beaucoup d'information. A cet égard, l'esprit humain a abandonné trop tôt. En prenant les équations de mouvement comme exemple, nous avons tenté de montrer avec les moyens les plus simples qu'il n'est pas impossible de se rendre compte de la structure globale des hypothèses, que l'on ne doit pas se contenter d'une énumération d'hypothèses élémentaires. On se trouve donc confronté à la tâche de représenter de manière claire des systèmes complexes (ici des systèmes complexes d'hypothèses) ; à cet égard, la théorie des systèmes a encore de grands progrès à faire.

Pour ce qui est de porter un jugement sur les conséquences dynamiques du modèle, on peut également aller plus loin que ne l'a fait Forrester. Dans 'Principles of Systems' [5], Forrester veut illustrer, en prenant pour exemple le classique problème des trois corps, la nécessité de recourir à l'ordinateur. Même pour ce problème relativement simple, dit-il, les moyens de la mathématique actuelle ne permettent pas de trouver une solution analytique. Par un sûr instinct, l'attention s'est portée sur un point important. Mais il ne voit pas l'enseignement que l'on doit en tirer. En fait, la croyance en l'existence d'une solution fermée pour le problème des trois corps s'était déjà effondrée en 1887 et 1889. En 1887, Bruns avait montré qu'un développement en série était la seule méthode quantitative pour parvenir à la solution du problème des  $n$  corps, et Poincaré a pu démontrer en 1889 que les développements en série divergeaient. Par bonheur, il n'y avait pas d'ordinateur à cette époque. Dès 1880, Poincaré avait commencé à développer de nouvelles méthodes pour le traitement des systèmes dynamiques [25], précisément la 'dynamique qualitative'. A partir de ce germe, de vastes domaines de la mathématique se sont développés au cours des ans. Une des contributions les plus importantes au développement à venir de la dynamique qualitative, porte d'ailleurs le nom évocateur de 'Systèmes grossiers' [26]. Cette théorie a atteint pour le moment un de ses sommets dans l'ouvrage de Thom cité plus haut.

Dans la dynamique qualitative, on est prêt à renoncer à des solutions explicites pour les équations du modèle. En lieu et place, on s'efforce d'obtenir une vue d'ensemble, géométrique la plupart du temps, de la totalité des solutions. On peut alors décrire qualitativement le comportement de l'une quelconque des solutions. Les questions que l'on se pose sont : quel genre de solutions y a-t-il, où se situent les limites entre ces genres, quelle est la stabilité de ces solutions vis-à-vis de petites perturbations, etc. Forrester, au contraire, ne recherche jamais que le *substitut par l'ordinateur des solutions analytiques*, c'est-à-dire la solution individuelle calculée pas à pas. Pour obtenir de la sorte une vue d'ensemble du système, il est obligé de calculer diverses solutions particulières résultant d'hypothèses modifiées. Toutefois, le choix des hypothèses reste nécessairement assez arbitraire. Et même lorsque l'ordinateur livre à très bref délai et à peu de frais des solutions, on ne peut obtenir en tâtonnant ainsi qu'une vue insuffisante sur ce qui se cache dans les hypothèses, c'est-à-dire dans le système. C'est de là que provient essentiellement le comportement qu'il nomme contre-intuitif. L'esprit humain a capitulé trop tôt. Le rationalisme s'est mué en son contraire. On abuse de l'ordinateur en lui faisant jouer le rôle d'un oracle. On ne sait pas exactement comment il parvient à ses énoncés ni quelle signification il convient de leur attribuer.

« La prochaine grande porte qui va s'ouvrir à l'intellect humain pourrait donner sur une méthode permettant de comprendre le comportement *qualitatif* d'équations » ([27], 41-12).

Ainsi une position erronée dans le travail de Forrester a attiré l'attention sur un point important : les applications aux modèles à données complexes des méthodes de la dynamique qualitative moderne. Je ne veux en aucun cas donner ici l'impression qu'il ne s'agit pas là d'une entreprise extrêmement difficile ; c'est au contraire une tâche qui exige la collaboration des meilleurs mathématiciens. Par ailleurs, dans ce contexte, l'ordinateur pourrait se voir confier des tâches nouvelles, non triviales.

Nous avons besoin de tels modèles qualitatifs. Ils pourraient nous permettre de mieux décrire et de mieux comprendre les processus qui régissent les sociétés.

*Advanced Studies Center  
Battelle Institute  
1227 Carouge*

TABLEAU 1 :

Valeurs des grandeurs d'état pour les années 1900 ( $X_0$ ) et 1970 ( $X_1$ ).

$P_0 = 1.6 \times 10^9$	$P_1 = 3.6 \times 10^9$
$N_0 = 250 P_1 = 9 \times 10^{11}$	$N_1 = 7.8 \times 10^{11}$ (*)
$C_0 = 0.25 P_0 = 0.4 \times 10^9$	$C_1 = 1 P_1 = 3.6 \times 10^9$
$L_0 = 0.125 P_0 = 0.2 \times 10^9$	$L_1 = 1 P_1 = 3.6 \times 10^9$
$A_0 = 0.2$	$A_1 = 0.3$

(\*) Estimation à partir de la Fig. 1.

TABLEAU 2 :

Valeurs standard des coefficients.

$\beta^* = 0.040$	$P_1 = P_0 (1 + 6^* - \delta^*)^{70}$
$\delta^* = 0.028$	$1/\delta^* = 36$ Durée de vie moyenne.
$v^* = 1$	
$\gamma^* = 0.05$	
$\varepsilon^* = 0.025$	$1/\varepsilon^* = 40$ Durée de vie moyenne pour le capital industriel.
$\pi^* = 1$	
$\tau = 15$	Temps d'adaptation que met l'investissement en capital dans l'agriculture, A, pour s'adapter à la valeur de consigne A.

TABLEAU 3 :  
Variantes de W2.

W2	$\nu^*$	$\pi^*$	$\gamma^*$	$\beta^*$	$\Phi$
0	1	1	0.05	0.040	1
1	0.25	1	0.05	0.040	1
2	0	0.1	0.05	0.040	1
3	0	0.1	0.05	0.040	1 <sup>1</sup>
4	1	1	0.06	0.040	1
5	1	1	0.05	0.028	1 <sup>2</sup>
6	0.25	1	0.05	0.028	1 <sup>2</sup>
7	0	0.1	0.05	0.028	1 <sup>2</sup>
8	0	0.1	0.05	0.020	1
9	0.25	0.7	0.05	0.040	1
10	1	1	0.05	0.040	1.25
11	0.25	0.7	0.05	0.040	1.25
12	0.25	0.7	0.06	0.040	1.25
13	0.25	0.4	0.06	0.040	1.25 <sup>2</sup>
14	0.25	0.7	0.06	0.028	1.25 <sup>2</sup>
15	0.25	0.5	0.05	0.040	1
16	0.25	0.5	0.03	0.040	1
17	0.25	0.5	0.03	0.040	0.8
18	0.25	0.5	0.03	0.028	0.8 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> En outre :  $\beta_p = \delta_p = \text{const} = 1$ .

<sup>2</sup>  $\beta^* = \delta^*$

TABLEAU 4 :  
Evolution dans le temps de quelques grandeurs de W2-0 \*.

	1900	1970	2020	2040	2100
10 <sup>-9</sup> P	1.6	3.6	5.3	4.9	3.6
10 <sup>-11</sup> N	9.0	7.8	5.5	4.5	2.8
10 <sup>-9</sup> C	0.4	3.6	7.6	8.0	5.6
10 <sup>-9</sup> L	0.2	3.6	13.3	19.8	9.4
A	0.20	0.27	0.32	0.30	0.23 <sup>1</sup>
I	0.25	1.00	1.44	1.64	1.56
m	0.28	1.00	1.00	0.85	0.40 <sup>2</sup>
10 <sup>-2</sup> N/P	5.6	2.2	1.0	0.9	0.8
p	0.225	1.0	1.5	1.4	1.0
	1.2	1.0	0.7	0.6	0.4
c	0.1	1.0	2.1	2.2	1.6
l	0.4	1.0	3.7	5.5	2.6
a	0.7	1.0	1.2	1.1	0.8 <sup>1</sup>
f	1.0	0.97	0.98	1.0	1.07 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Maximum 0.32 en 2010.

<sup>2</sup> En contradiction avec le texte, on trouve  $f_0 = 1$ ,  $f_1 \neq 1$ .

\* Estimations d'après Fig. 4-1 et Fig. 4-2 dans [2].

TABLEAU 5 :

Mesures à prendre erronées et mesures à prendre correctes.

	W2-0	W2-1	W2-2	W2-3	W2-18
10 <sup>-11</sup> Nmin	2.2	6.0	7.9	7.9	6.7
lmax	5.5	>>40	2	1	1
10 <sup>-9</sup> Pmax	5.3	5.8	9.7	10.8	4.3
10 <sup>-9</sup> Pmin		0.8			
fmin	0.97	0.63	0.97	0.80	0.97

## LEGENDES POUR LES FIGURES

*Fig. 1 :* Modèle standard W2-0

Echelle : P (Population)  $1 = 2.10^9$ , N (Richesses naturelles)  $1 = 2,5.10^{11}$ ,  
C (Investissement)  $1 = 5.10^9$ , L (Pollution)  $1 = 10$ , Q (Qualité de vie)  
 $1 = 0,5$ .

*Fig. 2 :* Modèle standard W2-0

A (Fraction du capital affectée à l'Agriculture)

M (Standard de vie matérielle)  $1 = 0,5$

F (Quotient alimentaire)  $1 = 0,5$

*Fig. 3 :* Ressources naturelles

a = Hypothèse, b = Evolution selon W2-0 (comme à Fig. 1),

c, d, e = Extrapolation, qui pour l'essentiel, reproduisent a.

*Fig. 4 :* Schéma fonctionnel de W2.

*Fig. 5 :* Schéma fonctionnel de W3.

*Fig. 6 :* Secteur des Ressources naturelles (N) dans W2.

Extrait de la Fig. 4 délimité par le fait que, en partant de N, on s'arrête aussitôt que l'on parvient à une autre grandeur d'état.

*Fig. 7 :* Les fonctions  $v_m(m)$  et  $\eta(n)$ .

Approximations  $\eta = n$  et (our W2-0)  $v_m = m$ .

*Fig. 8 :* Alternatives, pour ce qui est des hypothèses, en vue d'un modèle du monde conforme à la dynamique des systèmes, selon [15].

A gauche : des ressources naturelles peuvent aussi être créées. A droite : des investissements accrus ne doivent pas conduire à la catastrophe par pollution. Echelle (P) :  $1 = 2.5.10^9$ , (N) :  $1 = 2,5.10^{11}$ , (C) :  $1 = 5.10^9$ , (L) :  $1 = 10$ .

*Fig. 9 :* Secteur de la pollution (L) dans W2-0.

Extrait de la Fig. 4 délimité par le fait que, en partant de L, on s'arrête aussitôt que l'on parvient à une autre grandeur d'état.

*Fig. 10 :* Les fonctions  $\pi_1(l)$  et  $\alpha_1(l)$ .

Approximation (pour W2-0)  $\pi_1 = 1$  et  $\alpha_1 = 1/3$ .

*Fig. 11 :* Modèle du monde W2-4.

L'accroissement de l'investissement en capital conduit à la catastrophe par pollution.

## REFERENCES

- [1] D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens III : *The Limits to Growth*. Universe Books, New York, 1972.
- [2] J.W. Forrester : *World Dynamics*. Wright-Allen Press, Cambridge, Ma., 1971.
- [3] A. Peccei, M. Siebker : 'The Limits to Growth' in Perspective. A paper submitted at the request of the Economic Committee of the Parliamentary Assembly of The Council of Europe.
- [4] J.W. Forrester : *Industrial Dynamics*. The M.I.T. Press, Cambridge, Ma., 1961.
- [5] J.W. Forrester : *Principles of Systems* (Second Preliminary Edition). Wright-Allen Press, Cambridge, Ma., 1968.
- [6] J.W. Forrester : *Urban Dynamics*. The M.I.T. Press, Cambridge, Ma., 1969.
- [7] J.W. Forrester : *Market Growth as Influenced by Capital Investment*. *Industrial Management Review* 9 (1968) 83.
- [8] R.O. Foster : *The Dynamics of Blood Sugar Regulation*, Dissertation, Department of Electrical Engineering, M.I.T., juillet 1960.
- [9] D.L. Meadows : *Dynamics of Commodity Production Cycles*. Wright-Allen Press, Cambridge, Ma., 1970.
- [10] E.B. Roberts : *The Dynamics of Research and Development*. Harper & Row, New York, 1964.
- [11] D.L. Meadows et al. : *The Dynamics of Growth in a Finite World*. Wright-Allen Press, Cambridge, Ma., 1974.
- [12] D.L. Meadows, D.H. Meadows (ed.) : *Towards global equilibrium*. *Collected Papers*. Wright-Allen Press, Cambridge, Ma., 1973.
- [13] H.S.D. Cole, R.C. Curnow : *An Evaluation of the World Models*. *Futures* 5 (1973) 108.
- [14] H.S.D. Cole : *The Structure of the World Model*. *Futures* 5 (1973) 14.
- [15] T.W. Oerlemans, M.M.J. Tellings, H. de Vries : *World Dynamics : Social Feedback may give Hope for the Future*. *Nature* 238 (1972) 251.
- [16] R. Boyd : *World Dynamics : A Note*. *Science* 177 (1972) 516.
- [17] E. Ascher : *Modèles mathématiques et problèmes contemporains*. *Revue européenne des sciences sociales* 11 (1973) 28.
- [18] Executive Committee of the Club of Rome : *The Club of Rome. The New Threshold*, Rome, février 1973.
- [19] Working group of the « Stichting Maatschappij en Onderneming » : *Work for the Future*, The Hague 1973.

- [20] G. Picht : Die Bedingungen des Ueberlebens. Merkur 27 (1973) 212.
- [21] G. Picht : Mut zur Utopie. Piper, München, 1969.
- [22] M. Shubik : Compte rendu dans : Science 174 (1971) 1014, Répliques et duplique, *ibid.* 176 (1972) 109.
- [23] L. v. Bertalanffy : Kritische Theorie der Fombildung. Borntraeger, Berlin, 1928.
- [24] R. Thom : Stabilité structurelle et morphogénèse. Benjamin, Reading, Ma., 1972.
- [25] H. Poincaré : Sur les courbes définies par une équation différentielle, Comptes Rendus Académie des Sciences, 22.3.1880.
- [26] A. Andronov, P. Pontriagin : Systèmes grossiers. Dokl. Akad. Nauk, SSSR, 14 (1937) 247.
- [27] R.P. Feynman, R.B. Leighbon et M. Sands : The Feynman Lectures on Physics, Vol. II, Addison-Wesley, Reading, Ma., 1964.