



L'ANTHROPOCENE COMME RUPTURE DE L'HISTOIRE DE L'ECONOMIE

Alain ALCOUFFE, Sylvie FERRARI, Arnaud DIEMER, Cécile BATISSE, Félix GARNIER

Revue Francophone du Développement Durable

2023 - n°21 - Mars

Pages 12 - 42

ISSN 2269-1464

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://erasme.uca.fr/version-francaise/publications/revue-francophone-du-developpement-durable>

Pour citer cet article

Alcouffe A., Ferrari S., Diemer A., Batisse C., Garnier F. (2023), L'anthropocène comme rupture de l'histoire de l'économie, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°21, Mars p. 12 - 42.

L'Anthropocène comme rupture de l'histoire de l'économie

Alain ALCOUFFE^(a), Sylvie FERRARI^(b), Arnaud DIEMER^(c), Cécile BATISSE^(c), Félix GARNIER^(b)

(a) Université de Toulouse ; (b) Université de Bordeaux, BSE, OPCD ; (c) Université Clermont Auvergne, CERDI, OPCD

Résumé : Si le passage à l'Anthropocène révèle la capacité de l'homme à transformer l'ensemble du système terrestre, les théories économiques ont de tout temps, minimisé ce changement d'époque géologique, préférant focaliser leur attention sur la dynamique du système capitaliste ou la sacro-sainte croissance économique. Si des limites à la croissance sont bien mentionnées, elles restent cantonnées à des contraintes socio-techniques (pénurie de main d'œuvre, coût élevé du capital, prix des matières premières, faiblesse des investissements, absence de prise de risques des entrepreneurs...). Tout laisse à penser que les sociétés, par essence économiques, se seraient libérées des limites biophysiques. L'Anthropocène montre au contraire que ces limites imposent un réencastrement de l'économie dans l'environnement et dans le social. La question du temps, souvent réduite au court terme et à des questions de statique ou de dynamique dans la théorie économique, impose de penser l'avenir, sans pour autant reposer sur une extrapolation du passé. Dès lors, les théories économiques doivent proposer un corpus d'hypothèses et de concepts susceptibles de forger de nouveaux paradigmes, plus à même de se représenter les futurs possibles.

Mots clés : Anthropocène, Capitalisme, Croissance, Décroissance, Dynamique des systèmes, Limites, Futurs

Si la question du futur n'apparaît pas explicitement dans les théories économiques et/ou chez les principaux auteurs de la pensée économique, l'étude de la dynamique du capitalisme, du système économique et de la croissance fait partie des thèmes de prédilection des économistes. Dès 1762, Adam Smith nous présente un futur radieux, via le passage à "The Age of Commerce"¹. Près de 14 ans plus tard, *la Richesse des Nations* (1776) nous propose une vision optimiste de la société, sous les traits de la division du travail et de la main invisible. Il faudra attendre les travaux de Malthus (1796) pour que ce futur soit entaché des principaux maux susceptibles de ternir l'héritage du siècle des lumières. Dans son *Essai sur le principe de population* (1796), Thomas Malthus avance l'idée que la croissance est limitée en raison de la démographie galopante. Il attribue ainsi la misère en Angleterre au décalage entre deux lois : la loi de progression arithmétique des subsistances et la loi de progression

¹ Le 24 décembre 1762, Adam Smith précisait à ses étudiants que "there are four distinct stages which mankind passes through: firstly, the Age of Hunters, secondly, the Age of Shepherds, thirdly, the Age of Agriculture and Fourthly, the Age of Commerce" (LJA, 14).

géométrique de la population. La sortie de cet état passerait par la mortalité, la baisse de la natalité et le célibat. La société économique, telle que Rousseau et Hume l'ont définie, n'est donc pas un long fleuve tranquille et elle se heurterait même à des limites, à la fois naturelles, environnementales et sociales.

L'article que nous proposons entend revenir sur cette image d'un futur qui s'assombrit et sur l'entrée dans une nouvelle ère géologique, l'Anthropocène (Crutzen & Stoermer, 2002 ; Crutzen, 2000 ; Magny, 2019), à partir d'une mise en parallèle des travaux de Karl Marx, Nicholas Georgescu-Roegen et des auteurs du rapport *Limits to Growth*. L'Anthropocène, dont la révolution industrielle du XIX^{ème} siècle serait le principal déclencheur, est marquée par la capacité de l'homme à transformer l'ensemble du système terrestre. Ainsi, pour la première fois, "l'histoire de la Terre entre en collision avec celle des hommes et des femmes qui l'habitent" (Gemene, Denis, 2019). En 2009, les travaux de Rockström (2009) au sein du Stockholm Resilience Center ont identifié l'existence de neuf limites planétaires (Planetary Boundaries) pour lesquelles les activités humaines seraient susceptibles de provoquer des changements environnementaux non soutenables. Plusieurs d'entre elles sont aujourd'hui dépassées, à savoir : l'érosion de la biodiversité, le changement climatique, le cycle de l'azote et le cycle du phosphore, la pollution par le plastique, le cycle de l'eau douce.

Ce nouveau défi auquel l'espèce humaine est confrontée, pose la question de l'avenir de nos sociétés (l'humain n'étant qu'un habitant de la terre) et donc des visions du futur qui s'offrent à nous. Nous avons fait le choix de nous focaliser sur les apports de Karl Marx, Nicholas Georgescu-Roegen et des auteurs du rapport *Limits to Growth*, car ces derniers proposent une analyse critique de l'économie qui éclaire différentes représentations du futur. D'un côté, Karl Marx propose une critique du capitalisme dont il voit à la fois l'effondrement et sa capacité à détruire la Nature. D'un autre côté, Nicholas Georgescu Roegen fustige les principes de l'analyse économique (notamment la conception du temps en économie) tout en rappelant que le système économique est encadré dans un système biophysique (dont la thermodynamique et la biologie en constituent les principales lois). Cette perspective l'invite à orienter les choix économiques de manière à maîtriser l'évolution entropique à l'échelle de la biosphère et, ce faisant, à dessiner une trajectoire de décroissance. Enfin, pour les auteurs du rapport *Limits to Growth*, il y a une remise en cause de la croissance économique du fait des pressions qu'elle exerce sur l'environnement (surexploitation des ressources naturelles et impacts en termes de pollution). Ici, penser le futur revient à faire des simulations à l'aide d'un modèle en dynamique des systèmes et à imaginer le pire, l'effondrement des sociétés humaines (précisons que cet effondrement n'a pas besoin d'être absolu, il peut être relatif et se traduire par une baisse de notre bien être, de notre espérance de vie...).

Karl Marx, l'Anthropocène et l'écocialisme

Le XIX^{ème} siècle voit le capitalisme industriel se développer rapidement et dominer peu à peu toutes les structures économiques et sociales. Toutefois, dans le même temps, la condition ouvrière se détériore, les salaires sont très bas, les conditions de travail précaires et la dépendance économique accrue (Diemer, 2009). Les excès de ce capitalisme font naître à la fois un mouvement de contestation syndical (*le socialisme*) et une réflexion d'ensemble sur les rouages et l'avenir du capitalisme (*le marxisme*). La théorie économique marxiste est donc avant tout une étude historique du développement et de l'essor du capitalisme. Dans le livre premier du *Capital* (1867) intitulé "*Le développement de la production capitaliste*", Marx étudie la société anglaise, première nation industrielle, afin d'en tirer des lois. Nous distinguerons ici, trois temps forts dans cette démonstration : (1) la définition de la dynamique du capitalisme, cette dernière gravitant autour de la recherche de la plus-value ; (2) la fin annoncée du capitalisme ; (3) un capitalisme qui détruit la nature, et un seul échappatoire, l'écocialisme.

Du mode de production capitaliste à la recherche de la plus-value

Le courant marxiste s'oppose à la théorie libérale en démontrant que l'organisation capitaliste de la société aboutit à l'exploitation de la plus grande partie de la population par les détenteurs des moyens de production. La société se divise donc en deux grandes classes qui s'affrontent : le prolétariat (qui détient la force de travail) et la bourgeoisie (qui détient le capital). L'affrontement de ces classes s'effectue dans le cadre du processus de production, et plus précisément autour de la marchandise : "*La richesse des sociétés dans lesquelles règne le mode de production capitaliste s'annonce comme une immense accumulation de marchandises. L'analyse de la marchandise, forme élémentaire de cette richesse, sera par conséquent le point de départ de nos recherches*" (1867, [1978, p. 51]). Marx distingue deux sphères importantes :

(i) celle de l'échange de marchandises et du cycle MAM (marchandises, argent, marchandises). La circulation commence par la vente et finit par l'achat. L'argent est converti en marchandises qui sert de valeur d'usage, il est donc définitivement dépensé. La répétition de la vente de marchandises pour l'achat d'autres marchandises rencontre - en dehors de toute circulation - une seule limite, la consommation, c'est-à-dire la satisfaction de besoins déterminés.

(ii) celle de la production et du cycle AMA' (capital avancé, marchandise, produit obtenu). A' est égal à la somme primitivement avancée, plus un excédent : "*Cet excédent ou ce surcroît, je l'appelle plus-value*" (1867, [1978, p. 155]). Dès lors, la valeur avancée continue d'exister dans la circulation des marchandises, mais elle y change également de grandeur, elle y ajoute un plus, et c'est ce mouvement qui la transforme

en capital (*"A-M-A' est donc réellement la formule générale du capital, tel qu'il se montre dans la circulation"* (1867, [1978, p. 159]).

De la comparaison de ces deux sphères, Marx en tire une conclusion en matière de création de valeur. L'utilisation de machines et de matières premières, le capital constant C, ne procure aucun surplus au capitaliste. C'est l'avance en salaires de la main d'œuvre (ici V) qui est la seule source de valeur créée et directement proportionnelle au temps de travail. Ainsi, l'équation $A = C + V$ résume à elle-seule les propos de Marx. la force de travail² (seule source de valeur) n'est pas payée par le capitaliste au prorata de la valeur qu'elle a permis de créer, mais marchandise comme les autres, à sa valeur d'échange (qui suite à la théorie du minimum vital, correspond au temps de travail exigé pour produire les biens nécessaires à sa reproduction). Le capitaliste récupère à son profit la différence qui constitue la *plus-value* (ou encore surtravail). Ce qui donne : $A' = C + V + pl$ pour que $A < A'$: *"Le capitaliste en transformant l'argent en marchandises qui servent d'éléments matériels d'un nouveau produit, en leur incorporant ensuite la force de travail vivant, transforme la valeur - du travail passé, mort, devenu chose - en capital, en valeur grosse de valeur, monstre animé qui se met à travailler comme s'il avait le diable au corps. La production de plus-value n'est donc autre chose que la production de valeur prolongée au-delà d'un certain point"* (1867, [1978, p. 195]).

La crise et l'effondrement du capitalisme

Cette dynamique du capitalisme bute cependant sur un ensemble de limites, susceptibles d'engendrer son effondrement :

Les décisions des agents économiques ne sont pas coordonnées. D'une part, la production et la consommation sont des opérations disjointes. Les biens sont produits pour être vendus en échange de monnaie, et non pour satisfaire la demande, ce qui entraîne des désajustements entre production et consommation. D'autre part, l'investissement est réalisé par les entreprises capitalistes dans les branches susceptibles de procurer des taux de profit élevés sans pour autant qu'une demande effective soit assurée. Si l'économie est décomposée en deux sections productives : l'une de biens de production (section I), l'autre de biens de consommation (section II), l'absence de coordination de l'investissement empêche la réalisation permanente des conditions d'équilibre d'une telle économie.

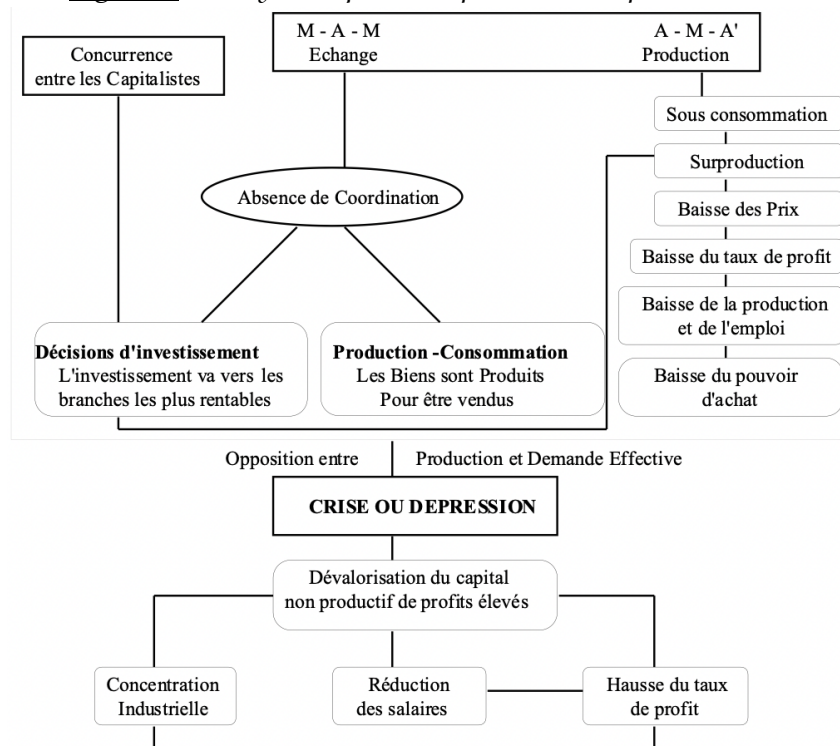
L'économie capitaliste fait apparaître *un problème de sous-consommation ouvrière.* L'entrepreneur individuel, en cherchant à maximiser ses profits, va faire pression sur

² Il convient de rappeler que le travailleur libre se trouve dans sphère de circulation, uniquement pour des raisons économiques : *" Dans tous les cas, il y a une chose bien claire : la nature ne produit pas d'un côté des possesseurs d'argent ou de marchandises et de l'autre des possesseurs de leurs propres forces de travail purement et simplement. Un tel rapport n'a aucun fondement naturel, et ce n'est pas non plus un rapport social commun à toutes les périodes de l'histoire. Il est évidemment le résultat d'un développement historique préliminaire, le produit d'un grand nombre de révolutions économiques, issu de la destruction de toute une série de vieilles formes de production sociale"* (1867, [1978, p. 172]).

les salaires qui représentent un coût. Or ces salaires sont un élément de la demande effective (cette situation devrait s'accroître avec la croissance du salariat). Ceci caractérise une situation de surproduction par rapport à la demande effective. Le marché va sanctionner cette surproduction en entraînant une baisse des prix qui va elle-même provoquer une baisse du taux de profit. Cette baisse du taux de profit va inciter les capitalistes à investir dans d'autres activités. Le taux de profit joue ainsi le rôle de régulateur des désajustements. La chute des prix et du taux de profit provoque une baisse de la production, de l'emploi, et du pouvoir d'achat. C'est la dépression.

Enfin, la recherche d'une plus-value toujours plus importante (notamment grâce à des salaires bas, que Marx appelle, *Minimum de Subsistance*) et la concurrence entre capitalistes devraient provoquer une *paupérisation des ouvriers et un blocage dans le développement du système capitaliste*. Cette contradiction doit entraîner la destruction du capitalisme et l'avènement du socialisme (l'un des fondements de l'idéologie socialiste repose sur l'abolition des moyens privés de production, source d'exploitation du prolétariat, il faut lui substituer des moyens collectifs de production). Dans sa vision des futurs possibles, Karl Marx " *is projecting a drama of self-destructive capitalism laying the basis for the constructive tasks of socialism*" (Heilbroner 1995, p. 5).

Figure 1 : La dynamique du capitalisme vu par K. Marx



Source : Diemer (2009)

Cette crise du capitalisme est avant tout structurelle. Il existe en effet une cause *profonde* (à rechercher dans les contradictions du système capitaliste) et une cause *immédiate* (concurrence permanente entre capitalistes, développement économique, accumulation du capital qui créent les conditions d'une surcapacité de production par

rapport à la demande effective). Dans le même temps, elle est cyclique et régulatrice. Marx considère que de la crise va naître la reprise. La dépression entraîne une dévalorisation de la partie du capital productif qui n'est plus en mesure de produire suffisamment de profit. Ce processus a trois conséquences : (i) la concentration industrielle ; (ii) la réduction du taux de salaire permettant la hausse du surplus pour les entreprises restantes ; (iii) la hausse du taux de profit (qui est le rapport entre la valeur du surplus [qui augmente] et la valeur du capital engagée [qui diminue]).

Une relecture de Marx à l'heure de l'Anthropocène

Si Karl Marx est souvent associée à une vision prométhéenne et productiviste (Honneth, 2015, Dannequin, Diemer, 1998) de la relation homme-nature, il n'en fait pas moins la critique du capitalisme, voué à épuiser toutes les ressources. James O'Connor (1998), Paul Burkett (1999), John Bellamy Foster (2000), Joel Koel (2007, 2002), Michael Löwy (2011) ou encore Kohei Saito (2023, 2021, 2017) vont même jusqu'à considérer que l'approche marxiste pourrait être mobilisée afin de proposer une analyse critique de la dégradation de l'environnement et une vision de la société durable qui nous projetterait au-delà du capitalisme (Saito, 2021).

Dans *Grundrisse der Kritik der Politischen Ökonomie* (Introduction générale à la critique de l'économie politique) paru en 1859, Karl Marx introduit la question écologique à partir d'une vision de la nature qui accompagne le développement du matérialisme et de la science. Ainsi toute production est une appropriation de la nature par l'individu dans le cadre et par l'intermédiaire d'une forme de société déterminée : *“C'est une tautologie de dire que la propriété (appropriation) est une condition de la production. Mais il est ridicule de partir de là pour passer d'un saut à une forme déterminée de la propriété, par exemple à la propriété privée... L'histoire nous montre bien que plutôt dans la propriété commune (par exemple chez les Indiens, le Slavess, les anciens Grecs, etc.) la forme primitive, forme qui, sous l'aspect de propriété communale, jouera longtemps encore un rôle important”* (1859, [1972, p. 6]). Ainsi, dans l'histoire du capitalisme, le passage de la rente foncière au capital remet en cause notre rapport avec la nature. Dans toutes les formes de société où domine la propriété foncière, l'industrie dépend complètement de l'agriculture. Le rapport avec la nature est prépondérant. Dans toutes les formes de société où domine le capital (force économique de la bourgeoisie), l'agriculture devient une simple branche de l'industrie. Le rapport social qui se crée au cours de l'histoire devient essentiel.

Dans *le Capital*, Marx s'appuie sur le *Traité de Chimie Organique* de Justus Von Liebig (1840), dont l'un des mérites est d'avoir souligné très tôt les dimensions négatives de l'agriculture moderne et les dégâts de la chimie industrielle³. Marx n'hésite pas à rappeler que le développement de la production capitaliste ruine les sources vives de

³ « Il m'a fallu bûcher à fond la nouvelle chimie agricole allemande, tout particulièrement Liebig et Schönbein qui sont plus importants pour cette question que tous les économistes réunis », Lettre à Engels, le 13 février 1866.

toute richesse, la terre et le travailleur : “ Et tout progrès de l’agriculture capitaliste est non seulement un progrès dans l’art de piller le travailleur, mais aussi dans l’art de piller le sol; tout progrès dans l’accroissement de sa fertilité pour un laps de temps donné est en même temps un progrès de la ruine des sources durables de cette fertilité” (1978, p. 485). Marx ira jusqu’à reprocher aux économistes qui ont écrit sur la rente différentielle, d’avoir ignoré les causes naturelles de l’épuisement du sol : “Au lieu de chercher les véritables causes naturelles de l’épuisement du sol (d’ailleurs tous les économistes qui ont écrit sur la rente différentielle les ont ignorées, les connaissances en chimie agricole étant à l’époque insuffisantes), on a eu recours à la théorie superficielle qu’il était impossible d’investir n’importe quelle masse de capital sur une surface délimitée” (1867, [1978, p. 709]).

Encadré 1 : Marx et le capital industriel

- Vision prométhéenne et productiviste
- Absence de limites à la croissance du système économique
- Un driver majeur : la lutte des classes (déterminisme)
- Limites : logique d’exploitation de l’homme et de la nature, accumulation (loi de baisse tendancielle du taux de profit)
- Temps long : une théorie de l’évolution à long terme des sociétés portée par une philosophie, le matérialisme historique
- Futurs : (i) évolution irréversible du capitalisme vers un état final caractérisé par une société communiste sans Etat, (ii) Etat final, un effondrement du capitalisme (crises/cycles), (iii) une société communiste, sans classes, sans état.
- Préoccupations environnementales : (i) Le travail est source de toute richesse conjointement avec la nature qui lui fournit la matière qu’il transforme en richesse (pas de spécificité accordée aux matières premières), (ii) Dimension négative de l’agriculture capitaliste, (iii) Approche globale des relations entre nature et agriculture.
- Capitalisme et Nature : (i) L’économique et les phénomènes naturels ne sont pas dissociés, la production capitaliste ruine les sources de toute richesse - terre et travailleur; (ii) “La production capitaliste perturbe le courant de la circulation de la matière entre l’homme et le sol, en conséquence, elle fait violence au conditionnement nécessaire à une durable fertilité des sols” (Marx et Engels, Lettres sur les Sciences de la nature, 1866); (iii) Un système capitaliste qui épuise les sols car il ne respecte pas leur rythme de reconstitution. Il détruit et dégrade les éléments nutritifs (pertes de matières organiques, érosion, destruction d’humus...); (iv) influence des travaux de Von Liebig (Traité de chimie organique); (v) Approche globale des relations entre nature et agriculture capitaliste.

En dénonçant le côté négatif d’une agriculture intensive via une opposition entre la petite propriété foncière et la grande propriété foncière, Marx n’hésitera pas à emprunter à Liebig, une métaphore visant à souligner la remise en cause du métabolisme entre l’espèce humaine et la nature : “ La grande propriété foncière réduit la population agricole à un minimum, à un chiffre qui baisse constamment en face d’une population industrielle, concentrée dans les grandes villes, et qui s’accroît sans cesse; elle crée ainsi des conditions qui provoquent un hiatus irrémédiable dans l’équilibre complexe du métabolisme social composé par les lois naturelles de la vie; il s’ensuit un gaspillage des forces du sol, gaspillage que le commerce transfère bien au-delà des frontières du pays considéré (Liebig)” (1867, [1978, p. 735]).

Au fil du temps, ce constat s'est renforcé avec la crise écologique et climatique mondiale (GIEC, 2022, 1995). De ce fait, le réchauffement climatique pourrait bien être le résultat d'une guerre sans fin du capitalisme contre la planète, et il n'y a qu'un pas à faire pour considérer que l'éco-socialisme de Marx serait à la fois une alternative au système économique irrationnel et une clé d'entrée à l'heure de l'anthropocène (Pirgmaier, 2018, Saito, 2017).

Nicholas Georgescu-Roegen, la décroissance comme futur possible

Si on trouve chez Marx, les prémisses d'une prise en considération de l'écologie (Husson, 2018) ou tout du moins une mise en perspective des préoccupations environnementales (notamment agricoles), son analyse laisse peu de place aux défis posés par l'Anthropocène dont on était encore assez peu conscients à la fin du XIX^{ème} siècle. Il faut dès lors se tourner vers un économiste du 20^e siècle, Nicholas Georgescu-Roegen (1966, 1971, 1976) dont les travaux stigmatisent à la fois, les fondements de la théorie économique et le passage de l'organisation agricole à l'organisation industrielle, pour que le futur soit incarné par une nouvelle idylle, celle de la décroissance. Bien que très fortement influencé par les thèses de son maître, Joseph Schumpeter⁴, Nicholas Georgescu-Roegen est peut-être l'un des trois économistes qui envisage très clairement le futur et l'avenir des sociétés humaines *via* l'existence de limites physiques (principes de la thermodynamique) et biologiques des processus de développement économique. Imaginer des scénarios de maîtrise de l'évolution entropique du processus économique s'appuie à la fois sur une remise en cause de la théorie économique (l'omniprésence de la technologie, le mode d'organisation linéaire de la production et la réversibilité du temps) et la mise en place d'un programme bioéconomique. Sa vision de l'évolution sur un temps long peut s'inscrire dans l'Anthropocène et ses bouleversements irréversibles auxquels les sociétés ne peuvent

⁴ NGR n'a jamais caché son admiration pour son maître à penser. Dans son ouvrage, *Capitalisme, Socialisme et démocratie* (1942), Schumpeter n'hésitait pas à faire du progrès industriel, la clé du changement : « *L'impulsion fondamentale qui met et maintient en mouvement la machine capitaliste est imprimée par les nouveaux objets de la consommation, les nouvelles méthodes de production et de transport, les nouveaux marchés, les nouveaux types d'organisation industrielle – tous éléments créés par l'initiative capitaliste* ». En d'autres termes, le progrès industriel est porté par des innovateurs qui cherchent à emporter le gros lot (Schumpeter compare le jeu des affaires au poker). L'analyse schumpétérienne de la dynamique capitaliste est intéressante car elle ne repose pas seulement sur le progrès technique, sur l'évolution des connaissances ou les grandes inventions (avec le cycle des révolutions industrielles successives). Schumpeter y ajoute un héros – le chef d'entreprise (Boutillier, 2003) qui prend le risque de lancer un nouveau produit ou une nouvelle façon de produire, et une structure, la concurrence monopolistique, qui assure à celui qui a réussi son pari d'en percevoir une rétribution financière. Mais attention ! Il n'y aura que peu d'élus pour beaucoup d'appelés. La destruction – créatrice laissera certains derrière elle. Dans son analyse, le capitalisme est un système qui se poursuit sans contrainte à l'égard des ressources de la nature et sa dynamique repose sur le rôle majeur d'un progrès technique endogène. La vision schumpétérienne du capitalisme accorde à la nature un rôle très limité dans les processus de production (Alcouffe, Ferrari, 2008).

échapper (Ferrari, 2022). Dans ce contexte, l'état stationnaire est un mythe et d'ajouter : *"Undoubtedly, the current growth must cease, may be reversed. But anyone who believes that he can draw a blueprint for the ecological salvation of the human species does not understand the nature of evolution, or even of history, which is that of permanent struggle in continuously novel forms, not that of a predictable, controllable physico-chemical process, such as boiling an egg or launching a rocket to the moon"* (1976, p. 25).

La décroissance constitue un futur possible avec des limites biophysiques à l'expansion matérielle et énergétique de la sphère économique au sein de la biosphère. Elle s'inscrit dans le processus biophysique de l'évolution qui nous relie irrémédiablement à la nature et à ses lois. Ce que Nicholas Georgescu-Roegen aura coutume d'appeler paradigme bioéconomique⁵ se situe au carrefour de la vision thermodynamique du monde, présentée par Sadi Carnot (1796-1832) et des travaux du biologiste Alfred Lotka (1880-1949) : *«La thermodynamique et la biologie sont les flambeaux indispensables pour éclairer le processus économique et découvrir ainsi ses propres articulations, la thermodynamique parce qu'elle nous démontre que les ressources naturelles s'épuisent irrévocablement, la biologie parce qu'elle nous révèle la vraie nature du processus économique »* (1978, p. 353). Nicholas Georgescu-Roegen participe ainsi au retour de l'évolutionnisme mais d'une façon originale : (1) à partir d'une conception du temps issue des enseignements de la thermodynamique, il développe (2) une analyse particulière des techniques à partir de la biologie et propose (3) de s'orienter vers la décroissance en maîtrisant l'évolution entropique à l'échelle de la biosphère.

La thermodynamique, fondement d'un temps irréversible

Nicholas Georgescu-Roegen va développer une critique virulente à l'encontre du dogme mécaniste mobilisé par la science économique (NGR, 1966). Il s'opposera ainsi non seulement aux néo-classiques mais aussi à Marx, déjà visé pour sa conception erronée des lois régissant l'agriculture (Dannequin, Diemer, 1998). Il est intéressant de noter que Marshall sera préservé de l'ire de Nicholas Georgescu-Roegen, ce dernier ne le classant pas parmi les auteurs néo-classiques à l'instar de Walras, Pareto ou Jevons. En effet, la biologie inspire le fondateur de l'Ecole de Cambridge et de l'économie industrielle. Dès lors, Marshall est qualifié de ...Marshallien : *"I wish to explain that those who call Marshall the head of the neo-classical school are doing him an injustice. Marshall was Marshallian, not neo-classical as Jevons, Walras, and Pareto were"* (1978, note 2, p. 10). Jevons n'est pourtant pas insensible à la disparition des matières premières comme son ouvrage sur la question du charbon⁶ le montre. La trop rapide utilisation du charbon

⁵ « Ce terme pour décrire ma vision de la nature du processus économique m'a été suggéré par J. Zeman... Ultérieurement j'ai appris, par un article de H. Scott Gordon... que le biologiste russe T.I Baranoff avait employé « Bioéconomie » déjà en 1925 (et probablement pour la première fois). Mais Baranoff entendait par ce terme une analyse économique de certains phénomènes biologiques et non la conception du processus économique comme une extension de l'évolution biologique » (1978, note 1 p 23)

⁶ Jevons W. S. (1865) *"The coal question : an inquiry concerning the progress of the Nation, and the probable exhaustion of our coal-mines"*, Macmillan, Londres.

constitue ainsi une menace pour la puissance anglaise. : "*Supposer que même la Grande-Bretagne puisse faire progresser son industrie en dépit de la nature /.../ serait de l'arrogance et de la folie*" (1865, p. 251, cité par Vivien, 1994, p. 36). L'irréversibilité est ainsi présente dans cet ouvrage à l'instar des préoccupations de Nicholas Georgescu-Roegen (NGR, 1978, p. 2). Jevons contribuera cependant à la constitution du paradigme néoclassique sur la base d'une épistémologie mécaniste et à la mathématisation de l'économie. "*One result of economics becoming the sister-science of mechanics has been its mathematisation, which began really with Jevons*" (1978, p. 3).

Dans son analyse du processus de production, Georgescu-Roegen appréhende les flux physiques qui sont contraints. "*The economic process is solidly anchored to a material base which is subject to definite constraints. It is because of these constraints that the economic process has a unidirectional irrevocable evolution*" (1976, p. 56). Il souhaite donc appréhender l'évolution sociétale, donc le changement qualitatif, la nouveauté qui caractérise selon lui, le processus économique. "*The most important aspect of the economic process is precisely the continuous emergence of novelty. Now novelty is unpredictable, but in a sense quite different from the way in which the result of a coin toss is unpredictable*" (1979, p. 321). La technique est un phénomène culturel et discontinu, qui ne fait pas partie du quantifiable mais du qualitatif, à l'instar de l'évolution économique⁷. Georgescu-Roegen s'inscrit dans une approche résolument évolutionniste à l'instar de son maître Schumpeter. "*We must take account that evolution does not consist of a linear repetition, even though over short intervals it may fool us into the contrary belief*" (1976, p. 19).

Le temps s'écoule dans un sens unique, notamment parce que la forme du développement économique influence l'environnement et dépend de lui : "*The patent fact that between the economic process and the material environment there exists a continuous mutual influence which is history-making carries no weight with the standard economist*" (NGR, 1976, P. 53). Les ressources naturelles, leur disponibilité et leur accessibilité constituent une contrainte majeure : "*Natural resources are the central element of mankind's evolution*" (NGR 1978, p. 9). L'Histoire même de l'humanité trouvant là un élément explicatif majeur : guerre, explorations, migrations apparaissent souvent liées à la richesse de la dotation des différents peuples en ressources naturelles. "*Man's continuous tapping of natural resources is not an activity that makes no history. On the contrary, it is the most important long-run element of mankind's fate*" (NGR, 1976, p. 56)

On pourrait ainsi s'interroger sur la possible substitution de la lutte des classes par la loi de l'entropie et l'exploitation des matières premières comme moteurs de l'Histoire... Nicholas Georgescu-Roegen s'appuie donc sur la thermodynamique dans

⁷ Georgescu-Roegen-Roegen se réjouit d'ailleurs de ce fait qui est garant d'une certaine liberté : "*Because of this fact, there is an entropic indeterminateness in the real world which allows not only fo life to acquire an endless spectrum of forms but also for most actions of a living organism to enjoy a certain amount of freedom. Without this freedom, we would not be able to choose between eating beans or meat, between eating now or later*" (NGR, 1976, p. 9).

son entreprise de reconstruction de l'économie. C'est la loi de l'entropie⁸ qui sera son outil pour pourfendre le dogme néo-classique : "*irreducible opposition between mechanics and thermodynamics stems from the Second Law, the Entropy Law*" (NGR, 1976, p. 7). Le deuxième principe de la thermodynamique, principe dit de Carnot-Clausius, encore appelé loi d'entropie, stipule que toute transformation d'énergie thermique (chaleur) en énergie mécanique (travail) s'accompagne d'une dégradation de l'énergie au sein d'un système isolé (qui n'échange ni énergie ni matière avec son environnement). Cette dégradation fait directement référence au changement qualitatif de l'énergie au sein du système : l'énergie s'est dissipée sous forme de chaleur, et ce changement est irréversible (il n'est plus possible de produire du travail à partir de la chaleur). La loi d'entropie introduit l'irréversibilité en physique et marque ainsi une rupture avec la mécanique classique pour laquelle la réversibilité était la règle (Ferrari, 2023). L'introduction de la loi d'entropie dans l'étude des phénomènes économiques se traduit par une nouvelle lecture du fonctionnement de la sphère des activités économiques : si la quantité d'énergie est conservée dans le processus de production (conformément au premier principe de la thermodynamique), sa qualité ne l'est pas et a changé lorsque le processus de production a fonctionné : l'énergie est passée d'un état où elle était utilisable (énergie libre, état de basse entropie) à un état où elle ne l'est plus (énergie liée ou énergie inutilisable - déchets, état de haute entropie). N'importe quel processus économique est par nature entropique.

L'entropie est donc une loi à laquelle on ne peut échapper, d'où l'insistance de N. Georgescu-Roegen sur le caractère irrévocable de cette évolution. « *La loi de l'entropie occupe une place unique dans les sciences de la nature* », insiste-t-il, car « *c'est la seule loi physique qui reconnaisse que l'univers matériel lui-même est soumis à un changement qualitatif irréversible, à un processus évolutif* » (1995, p. 83). Cela met clairement en lumière le problème de la confrontation entre les êtres vivants et l'entropie, une question très présente chez N. Georgescu-Roegen. La vie génère de l'entropie mais d'une façon différente selon ses formes physiques et sociales. Il proposera de généraliser cette loi en l'appliquant à la matière : "*Matter matters too*". L'irréversibilité des transformations au sein des processus de production porte non seulement sur l'énergie mais aussi sur la matière.

Le temps irréversible prend sa source dans la nature de l'énergie qui est transformée par les activités économiques. L'homme néanmoins cherche à travers l'innovation à mieux maîtriser l'énergie afin de lui permettre de faire croître sa puissance productive⁹. Jacques Grinevald qualifie ainsi, dans une perspective en filiation directe avec Georgescu-Roegen, la Révolution industrielle de "*thermo-industrielle*" (Grinevald,

⁸ L'entropie peut être appréhendée comme "*un indice de la quantité d'énergie inutilisable contenue dans un système thermodynamique donné à un moment donné de son évolution*" (NGR, 1978).

⁹ Georgescu-Roegen distingue 3 types d'innovations : les innovations économiques qui économisent les sources de basse entropie ; les innovations substitutions qui remplacent l'énergie humaine ; les innovations de gamme qui constituent en de nouveaux biens de consommation (NGR, 1976, p. 18).

1993, p. 13). Ce dernier qualifiant les différentes phases de maîtrise de l'énergie Prométhée I et Prométhée II, respectivement âge du feu et âge de la machine à vapeur. Cependant, le destin de l'homme s'il est inéluctable n'est pas susceptible de prévision exacte : l'incertitude est radicale : *"The prediction, which sounds like the famous scare that the world would come to an end in A. D. 1000, is at odds with everything we know about biological evolution. The human species, of all species, is not likely to go suddenly into a short coma. Its end is not even in distant sight ; and when it comes it will be after a very long series of surreptitious, protracted crises"* (NGR, 1976, p. 22).

Dès lors, la conduite de la société sur des préceptes inspirés de l'analyse néoclassique¹⁰ s'avère néfaste à long terme, c'est-à-dire dans la perspective d'une maximisation de la durée de vie de l'espèce humaine¹¹. En effet, le temps logique utilisé par les néoclassiques n'est d'aucune utilité pour éclairer le processus économique. Leur temps est circulaire : la réversibilité est totale. *"The crucial point is that the economic process is not an isolated, self-sustaining process. This process cannot go on without a continuous exchange which alters the environment in a cumulative way and without being, in its turn, influenced by these alterations"* (NGR, 1976, p. 4).

Par ailleurs, la poursuite d'une activité économique fondée sur cette conception du temps conduit à une réduction de la durée de vie de l'espèce humaine¹². L'économie en tant que science concernée par l'administration des ressources rares ne prend en compte qu'une seule génération. Or, les ressources naturelles et l'énergie issue de ces dernières constituent une dot (à l'encontre de l'énergie solaire¹³) pour l'humanité présente et à venir. La conséquence du "mécanisme" du marché est un gaspillage : les générations consomment plus que nécessaire : *"the market mechanism by itself results in resources being consumed in higher amounts by the earlier generations, that is, faster than they should be"* (NGR, 1976, p. 31). Dans l'hypothèse où toutes les générations, passées et futures, pourraient participer dans le cadre du marché au partage des ressources comme le charbon, la société aboutirait à une impasse : *"Should all the generations bid from the outset for the total deposit of coal, the price of coal in situ will be driven up to infinity, a situation which would lead nowhere and only explode the entropic predicament of mankind"* (NGR, 1976, p. 31).

¹⁰ Or la maximisation du taux de croissance peut engendrer une hausse de la pollution et constituer in fine un obstacle à sa poursuite selon Georgescu-Roegen : *"Since the Entropy Law allows no way to cool a continuously heated planet, thermal pollution could prove to be a more crucial obstacle to growth than the finiteness of accessible resources"* (NGR, 1976, p. 14).

¹¹ L'analyse avantage coût est perturbé par la prise en compte des conséquences de l'entropie : Ainsi, dans cette optique *"In entropy terms, the cost of any biological or economic enterprise is always greater than the product. In entropy terms, any such activity necessarily results in a deficit"* (NGR, 1976, p. 55).

¹² Le programme bioéconomique minimale insiste sur la nécessaire modification des valeurs humaines sous la forme d'une prise en compte des générations futures. Georgescu-Roegen fait d'ailleurs montre d'un certain pessimisme ou tout du moins d'un doute. Cf conclusion.

¹³ L'énergie solaire est un flux dont la durée de vie est incommensurable vis-à-vis des ressources terrestres. Néanmoins ces dernières, permettent d'obtenir une puissance productive beaucoup plus importante.

La volonté de protéger les générations futures conduit Georgescu-Roegen à envisager la nécessité de changer nos valeurs, notamment en exprimant plus de sympathie et d'attention à l'égard des générations futures. Mais le doute transparaît dans ses écrits. En effet, l'incertitude étant radicale, est-il utile de se rationner pour une humanité potentielle ? *"And indeed, it would certainly be poor economics to sacrifice anything for a nonexistent beneficiary"* (NGR, 1976, p. 32).

Biologie et technologie

Comme toutes les espèces naturelles, l'homme a toujours utilisé ses organes biologiques afin de puiser de la basse entropie dans l'environnement. *"The truth is that every living organism strive only to maintain its own entropy constant. To the extent to which it achieves this, it does so by sucking low entropy from the environment to compensate for the entropy to which, like every material structure, the organism is continuously subject. But the entropy of the entire system -consisting of the organism and its environment- must increase. Actually, the entropy of a system must increase faster if life is present than if it is absent"* (NGR, 1976, p. 55).

De tels organes propres à chaque espèce vivante, sont selon la terminologie d'Alfred Lotka, les organes endosomatiques. Mais progressivement, les êtres humains se sont distingués de la plupart des animaux en faisant appel à d'autres instruments qualifiés d'exosomatiques. Avec ces organes détachables, principalement des outils et des équipements techniques, l'espèce humaine est parvenue à accomplir de nombreuses réalisations. Henri Bergson (1911) souligne que *« man is not only a tool-maker ; man is the only animal that makes tools to make tools »*. Les organes exosomatiques sont même devenus aussi vitaux que les organes endosomatiques : les hommes en sont largement dépendants. Dans ces conditions, le processus économique apparaît selon N. Georgescu-Roegen comme une extension de l'évolution endosomatique, en d'autres termes, comme la continuation de l'évolution biologique : *« The institutions of the market, money, credit and enterprises of all sorts emerged in response of the progressive evolution of the exosomatic nature of homo sapiens. Mankind's mode of existence is dominated neither by biology nor by economics. It is instead a complex bioeconomic web, and in this web the crucial factor is production - the mushrooming production of exosomatic instruments »* (NGR, 1986, p. 249). Ce point est fondamental car il est à l'origine de l'approche bioéconomique du processus économique : *« the term is intended to make us bear in mind continuously the biological origin of the economic process and thus spotlights the problem of mankind existence with a limited store of accessible resources, unevenly located and unequally appropriated »* (NGR, 1977b, p. 361). Ce changement a toutefois entraîné une série de conséquences plus ou moins fâcheuses et irrémédiables pour l'humanité.

La première souligne l'état de dépendance de l'espèce humaine vis à vis du confort offert par les organes exosomatiques, mais également vis à vis du plaisir relatif à la consommation de masse *« the pleasure derived from extravagant gadgetry and mammoth*

contraptions" (NGR, 1977b, p. 363). Cette évolution exosomatique de l'espèce humaine se révèle particulièrement dangereuse étant donné qu'elle s'accompagne d'une production croissante de technologies à partir de quantités d'énergie et de matières premières puisées dans les entrailles de la terre. Ainsi, en vertu des principes de la thermodynamique et du fait que les quantités d'énergie et de matières accessibles sont nécessairement finies¹⁴, on peut avancer à la manière de Nicholas Georgescu-Roegen que les activités industrielles ont participé à la raréfaction absolue des dotations terrestres de basse entropie : « *Man thus became a geological agent, an activity which nowadays is most strikingly illustrated by the monstrous gash of open-pit-mines. And because the Earth is undoubtedly finite, the third predicament of man's exosomatic nature is the scarcity of natural resources* » (NGR, 1986, p. 252) . Un jour ou l'autre, nous rappelle Nicholas Georgescu-Roegen (1995), la croissance (la grande obsession de l'économie standard et du marxisme) touchera à sa fin. En effet, pour produire les organes exosomatiques, les hommes doivent employer des ressources en énergie et en minerais, il y a une concurrence qui s'établit entre les "choses mortes" et les êtres vivants. "*Chaque fois que nous produisons une voiture, nous détruisons irrévocablement une quantité de basse entropie qui, autrement, pourrait être utilisée pour fabriquer une charrue ou une bêche. Autrement dit, chaque fois que nous produisons une voiture, nous le faisons au prix d'une baisse du nombre de vies humaines à venir*" (NGR, 1995, p. 67).

La deuxième conséquence souligne, que comme toute évolution organique, l'évolution exosomatique a divisé l'humanité en espèces exosomatiques aussi différentes que les espèces biologiques. Cependant, contrairement aux espèces biologiques qui peuvent fusionner sans le moindre obstacle, le cas des espèces exosomatiques est plus problématique. La distinction entre l'Homo Indicus et l'Homo Americanus, nous explique Nicholas Georgescu-Roegen est beaucoup plus profonde que celle qui sépare les espèces biologiques. Si l'Europe et le Japon ont connu un redressement aussi spectaculaire après la seconde guerre mondiale, c'est qu'ils appartenaient à la même espèce exosomatique que les Etats Unis, leur principal fournisseur d'équipements. La plupart des pays sous-développés appartenaient quant à eux à des espèces exosomatiques différentes. En d'autres termes, notre compréhension étroite du processus économique aurait quelque peu biaisé l'amélioration des instruments exosomatiques déjà en usage dans ces pays : « *Un Homo Indicus criait à l'aide après que son âne soit tombé dans un fossé et se soit cassé une patte. Suivant, le conseil de ses autorités économiques, l'Homo américain se précipita avec un pneu à carcasse radiale pour réparer la panne du véhicule* " (NGR, 1978, p. 343).

Ce qui ne signifie pas que toutes les innovations soient une réussite ou arrive à point nommé. De Gleria nous explique que selon Georgescu-Roegen, "*Economic change is a biological and evolutionary phenomenon based on innovations which are deeply rooted in man's Veblenian instincts of workmanship and idle curiosity*" (NGR, 1971, p. 368). *They are*

¹⁴ L'énergie libre se rencontre sous deux formes : un stock de matières (charbon, pétrole...) et un flux, l'énergie solaire qui à l'échelle humaine apparaît comme le moins "épuisable".

not predictable and, furthermore, every economic innovation is successful only if social community culturally adapts to it" (De Gleria, 1995, p. 26). Notons d'ailleurs qu'aucune innovation ne pourra indéfiniment réussir à garantir l'accessibilité des ressources (Georgescu-Roegen, 1976).

Enfin, cette évolution exosomatique a engendré des conflits sociaux dans les sociétés humaines. Un oiseau souligne Nicholas Georgescu-Roegen vole de ses propres ailes, attrape des insectes avec son propre bec..., c'est-à-dire avec ses organes endosomatiques. Comme ces derniers sont la propriété privée de chaque individu, ils ne peuvent faire l'objet d'un véritable conflit. L'espèce humaine échappe cependant à ce principe. L'homme a en effet utilisé les organes endosomatiques de ses congénères (esclavage, servage...) ainsi que domestiqué certains animaux (boeufs, chevaux...) afin de se libérer des contraintes de la nature. Ces actes, rappelle Nicholas Georgescu-Roegen, ont débouché sur des conflits, mais pas nécessairement des conflits sociaux. Ces derniers apparurent d'une part, à partir du moment où les moyens de production furent séparés du corps de l'homme (existence d'organes exosomatiques), et d'autre part, lorsque leur production et leur utilisation ne furent plus confinées au cercle de la famille ou d'un clan familial¹⁵. A ce moment-là note Georgescu-Roegen « *les instincts de l'homme, d'habileté professionnelle ou de curiosité gratuite, ont peu à peu mis au point des instruments exosomatiques capables de produire davantage que ce dont le clan familial avait besoin. En outre, ces nouveaux instruments, par exemple un grand bateau de pêche ou un moulin, demandaient aussi bien pour leur construction que pour leur fonctionnement, plus de bras qu'un seul clan familial ne pouvait en fournir. C'est à cette époque que la production prit la forme d'une activité sociale plutôt qu'une activité de clan* » (NGR, 1969, p. 101). Dans le même temps, la division du travail, nécessaire pour organiser la production ne fût réalisée, ni en fonction d'un quelconque rôle déterminé dès la naissance pour chacun de ses membres, comme c'est le cas dans la ruche ou la fourmilière, ni en fonction des divers talents de chacun, mais en accord avec les rôles requis par l'organisation sociale : « *Production thus became a social enterprise, which has to be well planned, set in motion at the opportune moment, and directed and closely supervised thereafter. These new tasks created a division not of labour in the sense of Adam Smith¹⁶ (which certainly was already at work), but a role in the production process and the social organization*" (Georgescu-Roegen, 1986, 250). Cette division sociale reposerait sur la distinction entre deux catégories de membres de la société : les gouvernés et les gouvernants, encore appelés « *élite privilégiée*". La première catégorie fournit des services ayant une mesure objective (les maçons peuvent en effet compter combien de briques ont été posées). La seconde

¹⁵ Nicholas Georgescu-Roegen aborde ce problème dans le cadre de l'économie paysanne et des travaux de Tchayanov. (Dannequin et Diemer 1998).

¹⁶ Bien que Nicholas Georgescu-Roegen fasse référence à la division du travail d'Adam Smith (distinction entre travail productif et improductif), il ne partage pas la conception que Smith a de l'origine de la division du travail. En effet, alors que pour Adam Smith, la division du travail a pour origine "un certain penchant naturel à tous les hommes", pour Nicholas Georgescu-Roegen, elle a pour fondement « *Les instincts de l'homme, d'habileté professionnelle ou de curiosité gratuite* » (NGR, 1969, p. 101),

catégorie regroupe des services sans mesure objective (on ne peut en effet mesurer le travail physique des juristes, des avocats...). Dans ce contexte, souligne Nicholas Georgescu-Roegen, il est toujours possible pour les gouvernants d'exagérer l'importance de leur travail et de s'en servir pour affirmer leur supériorité et leur domination sur les autres membres de la société.

On voit ainsi que le conflit social, lui-même issu de la division du travail, dans les sociétés humaines n'existe que parce que l'espèce humaine en est arrivée à vivre en société portée par une évolution exosomatique : « *Nothing in the soma of a newborn human determines his future role. Later, he may become a ricksha man just as well as a mandarin. And the rub is that, in contrast with the ant doorkeeper, a ricksha man would like to be a mandarin and, as a part of his ordinary efforts, would struggle to exchange roles*"¹⁷ (NGR, 1977b, 366). Un conflit social qui fera malheureusement partie du lot de l'humanité aussi longtemps que le mode de vie des sociétés humaines (capitalistes) dépendra de la production à grande échelle d'instruments exosomatiques.

Repenser l'économie dans le long terme, sortir de la croissance pour initier la décroissance

La faible audience des propos de Georgescu-Roegen réside dans son objet d'analyse du développement des sociétés, à savoir l'attention portée au long terme. "Issues such as those discussed in this lecture pertain to long-run forces. Because these forces act extremely slowly we are apt to ignore their existence or, if we recognize them, to belittle their importance" (NGR, 1976, 59). Pourtant, l'évolution des sciences de la nature depuis Carnot et Darwin, c'est-à-dire depuis la thermodynamique et l'évolutionnisme, ne permet plus de séparer le vivant de l'environnement terrestre. Il s'agit d'une coévolution. L'évolution biologique est en interaction réciproque avec les changements de l'environnement planétaire. La complexité est inhérente à l'analyse de l'espèce humaine et notamment dans son activité économique. La bioéconomie de Georgescu-Roegen, sans être exempte de critiques, prend acte de ce constat. La construction d'une nouvelle discipline bioéconomique conduirait alors à l'intégration de l'économie dans l'écologie : "economics will have to merge into ecology, if the merger ever occurs" (NGR, 1976, p. 30). Les lois de la thermodynamique constituent chez Georgescu-Roegen des "méta-lois" auxquels n'échappent pas l'homme : "A true evolutionary law can be found, instead, in thermodynamics : it is the Entropy Law" (De Gleria, 1995, p. 11). Elles s'avèrent alors déterminantes mais pas déterministes. En effet, l'évolution exosomatique n'emprunte pas une voie unique mais des aspects différents, l'homo Indianus n'est pas assimilable à l'homo Americanus : « *Economic phenomena certainly are not independent of the chemico-*

¹⁷ Cette remarque mérite d'être traduite afin de comprendre l'origine du conflit social et l'apparition des classes sociales : « *Rien dans le soma d'un nouveau-né humain ne détermine son rôle futur. Plus tard, il peut devenir un pousse-pousse tout comme un mandarin. Et le problème vient de ce que, contrairement à la fourmi gardienne, le pousse-pousse voudrait bien être mandarin et, pour une partie de ses efforts ordinaires, luttera pour échanger les rôles* » (NGR, 1978, p. 346).

physical laws that govern our external and internal environment, but they are not determined by these laws. It is because the economic has its proper laws that one dollar spent on caviar does not buy the same free energy as when spent on potatoes » (NGR, 1986, p. 272). Nicholas Georgescu-Roegen s'éloigne ainsi de son maître à penser, Joseph Schumpeter, qui voyait la fin du capitalisme ancrée dans des motifs endogènes (concentration et bureaucratisation de la R&D). Il relie la forme de l'évolution exosomatique et la loi de l'entropie dans une vision sombre de fin de l'humanité capitaliste ou adepte du socialisme "réel", toutes deux se rejoignant dans un processus d'industrialisation de l'ensemble de la production : « *l'humanité voudra-t-elle prêter attention à un quelconque programme impliquant des entraves à son attachement au confort exosomatique ? Peut-être le destin de l'homme est-il d'avoir une vie brève mais fiévreuse, excitante et extravagante, plutôt qu'une existence longue végétative et monotone. Dans ce cas, que d'autres espèces dépourvues d'ambition spirituelle - les amibes par exemple - héritent d'une Terre qui baignera longtemps encore dans une plénitude de lumière solaire !* » (NGR, 1995, 134-135). Dès lors, la décroissance prenant notamment la forme d'une baisse radicale de la consommation, constitue le seul moyen d'échapper aux conséquences néfastes d'une croissance débridée, dictée par la seule motivation du profit.

Si N. Georgescu-Roegen peut être considéré comme l'un des principaux objecteurs de croissance, ses travaux ne visent pas pour autant à élaborer un modèle prospectif qui intégrerait les limites biophysiques à la croissance économique. Cette perspective sera portée, à la demande du Club de Rome (Août 1970), par les travaux issus du rapport Meadows. À l'aide d'une méthode, la dynamique des systèmes, et d'un modèle de simulation, un Groupe d'étude de dynamique des systèmes du MIT a proposé d'imaginer des scénarios prospectifs à l'horizon 2100.

Le rapport *Limits to Growth*, l'Anthropocène avant l'heure ?

Lors du 50e anniversaire du Rapport *Limits to Growth* (LtG), organisé par le Club de Rome en 2022, Jeffrey Sachs n'hésitait pas à rappeler que ce rapport avait changé « *the way we think about the economy and the world, by treating nature and the economy as an interacting dynamic system that we now call the Anthropocene* ». Profondément inspiré par les travaux de J.J Forrester (1971, 1969, 1968), le rapport LtG livrait en mars 1972 ses premiers résultats concernant les limites matérielles qui s'opposent à la multiplication des hommes ainsi que les contraintes occasionnées par leurs activités sur la planète : « *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 par nos sociétés, inflation et autres dérèglements monétaires et économiques... 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 » (Halte à la croissance, 1972, p. 139).

Le rapport LtG montre ainsi les dangers d'une croissance économique illimitée dans un cadre que nous qualifions aujourd'hui de limites planétaires : *“Les recherches que nous avons menées pour le Club de Rome visaient à comprendre les causes et les conséquences de la croissance physique dans un monde fini”* (Préface de Dennis Meadows à l'édition des 50 ans, 2022, p. 6). A ce titre, il constitue la pierre angulaire d'un paradigme de post-croissance, dans lequel la durabilité s'apparente à un objectif global, une manière d'améliorer notre compréhension du monde et de la notion de bien-être.

Au-delà des résultats et des débats suscités par le rapport lui-même, nous souhaitons insister sur les trois apports suivants : (1) la mise en perspective du caractère exponentiel de la croissance via une méthode, la dynamique des systèmes, (2) l'idée que cette croissance exponentielle ne peut être étudiée qu'à l'intérieur d'un équilibre global, (3) que le futur renvoie à des simulations informatiques, lesquelles accordent une certaine crédibilité au scénario d'effondrement (un tel scénario est quasi-inexistant dans la littérature économique, qui lui préfère les notions de récession, crise et reprise).

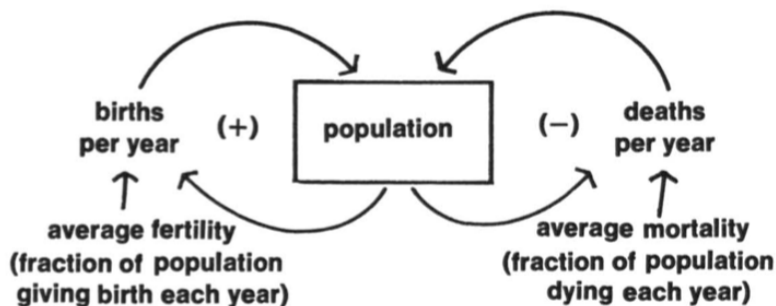
Le caractère exponentiel de la croissance et la dynamique des systèmes

Pour les auteurs du MIT, dès que l'on aborde les problèmes relatifs aux activités humaines, on se trouve en présence de phénomènes de nature exponentielle. Les cinq drivers de l'étude - 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 à cette loi. La croissance exponentielle est un phénomène dynamique qui met en jeu des éléments qui changent en fonction du temps. Mais, quand plusieurs quantités différentes en nature croissent simultanément au sein d'un même système, et quand ces quantités ont entre elles des relations complexes, l'analyse des causes de la croissance et du comportement ultérieur du système deviennent très difficiles.

La méthode de la dynamique des systèmes, développée par Forrester (1971, 1969, 1968) *« met en évidence les nombreuses relations entre éléments, formant des boucles avec couplage, et pour certaines à effets décalés dans le temps »* (1972, p. 153). Ainsi, une boucle positive (ou boucle d'amplification) apparaît à chaque fois que l'on rencontre une quantité variant exponentiellement. Cette boucle positive est en quelque sorte un cercle vicieux (exemple bien connu de la boucle prix-salaires). Une boucle négative a un rôle régulateur (Diemer, 2019). Elle vise à maintenir à un niveau constant une fonction qui tend à croître ou à décroître. Elle agit donc en sens inverse de la variation de la fonction. On peut proposer ici deux exemples.

Le premier exemple relatif à la croissance de la population humaine obéit à une loi exponentielle (suite géométrique selon Malthus). La structure du système qui traduit la dynamique de la croissance de la population est schématisée ci-dessous.

Figure 2 : boucle régissant la population



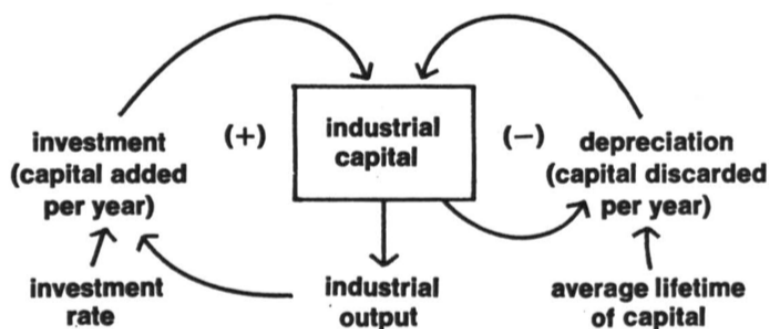
Source : Meadows & al. (1972, p. 34)

Ce système a deux boucles. Celle de gauche est positive. Elle représente ce que l'on peut déduire de la courbe de croissance exponentielle observée : étant donnée une population à taux de natalité constant, plus cette population est élevée, plus le nombre de naissances annuelles sera élevé. Celle de droite est négative. L'évolution d'une population est fonction du taux moyen de mortalité qui 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 l'année précédente.

Selon les auteurs du rapport Meadows (1972), l'espérance moyenne de vie, à l'échelle planétaire, était de 53 ans, et devait 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 second exemple concerne la production industrielle. Elle a connu une évolution encore plus rapide que la population. En prenant pour base l'indice 100 en 1963, on serait passé 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). La structure du système qui traduit l'évolution du capital industriel (biens d'équipement, usines, véhicules, machines, outils...) se décompose de la manière suivante :

Figure 3 : boucle régissant le capital



Source : Meadows & al. (1972, p. 39)

L'évolution de ce capital industriel est également régie par deux boucles. Avec un capital industriel donné, il est possible de produire chaque année une certaine quantité de produits manufacturés. Une bonne partie des biens produits chaque année sont des biens de consommation (textiles, voitures...) qui sortent du circuit (consommation finale). 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). Cette dernière partie de la production constitue les investissements. Ces investissements caractérisent une boucle positive : « 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 » (1972, p. 159). 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 long : c'est une des caractéristiques des investissements à moyen et long terme.

La boucle négative souligne que le capital industriel n'est pas éternel. Il se déprécie et meurt. Dans ce cas, il est perdu en tant qu'outil de production : « 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 » (1972, p. 159)

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. Selon les auteurs du rapport, 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 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 » (1972, p. 160).

Les limites de la croissance exponentielle au sein du système global

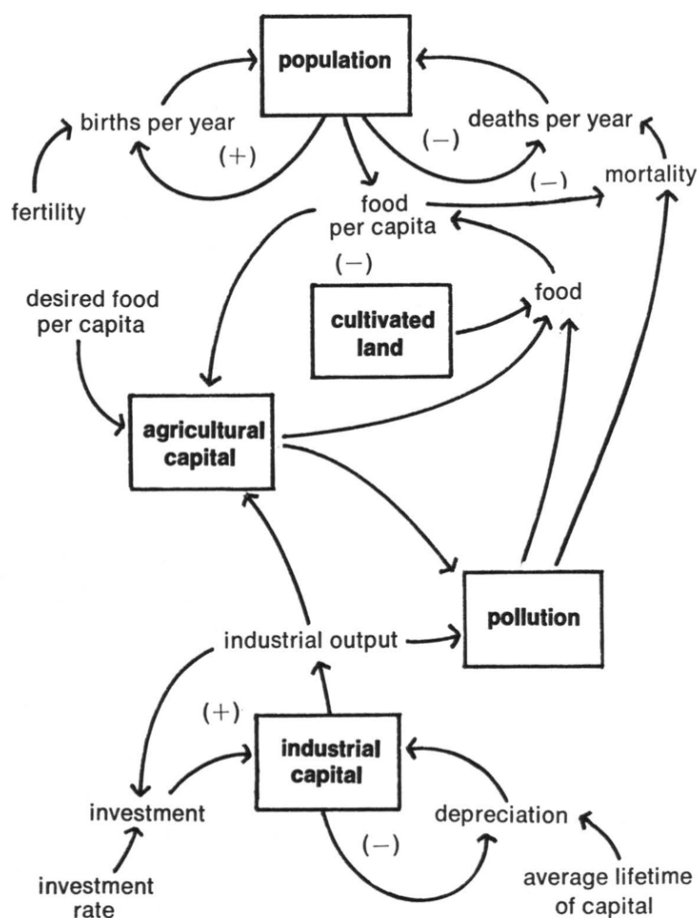
La liste des moyens permettant de maintenir la croissance économique et la croissance de la population jusqu'en 2000 et au-delà, peut être divisée en deux grandes catégories.

D'un côté, il y a 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. D'un autre côté, il existe des 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, la stabilité sociale, l'éducation, l'emploi et l'évolution contrôlée du progrès technique. Selon les auteurs du rapport Meadows, ces facteurs « *sont plus délicats à évaluer que les facteurs matériels. Ni le rapport, ni même le modèle global en son état actuel ne peuvent traiter explicitement de ces données sociologiques* » (1972, p. 165). Mais ce qui intéresse surtout nos auteurs, ce sont les interactions qui existent entre les 5 grandeurs fondamentales (population, investissements, nourriture, ressources naturelles et non renouvelables, pollution) du système global. Ces variables sont liées les unes aux autres par un réseau de relations et de boucles. 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 ressources naturelles engendre des déchets polluants et la pollution interfère à la fois avec l'expansion démographique et la production alimentaire. Les auteurs du rapport se sont intéressés aux modes généraux de comportement du système population-investissements. Par modes de comportement, ils entendent « *les tendances aux variations des niveaux (population, pollution...) en fonction du temps. Une fonction peut croître, décroître, demeurer constante, osciller ou présenter successivement plusieurs de ces divers caractéristiques* » (1972, p. 201). L'objectif est alors de déterminer lequel des modes de comportement est le plus caractéristique du système global lorsque l'on se rapproche des limites ultimes de la croissance.

- Ainsi, de nombreuses interactions se produisent entre la population et les investissements. 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... 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 cause de pollution (dans l'agriculture, il s'agit des polluants tels que les résidus de pesticides, DDT, engrais, 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 agricole. La figure suivante insiste sur plusieurs boucles importantes. Selon l'hypothèse *Ceteris Paribus*, 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 (boucle négative). Selon les auteurs du rapport, une autre boucle négative tend à contrebalancer les effets de la première : « Si la ration individuelle tombe en deçà de la valeur souhaitée par la population, on aura tendance à accroître la fraction des investissements consacrés à l'agriculture, de sorte que la production agricole et par la suite la ration alimentaire individuelle pourront croître ». (1972, p 208).

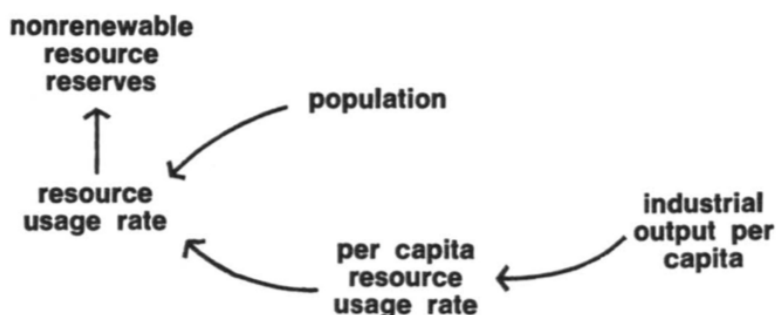
Figure 4 : Boucles régissant la population, le capital, la production agricole et la pollution



Source : Meadows (1972, p. 97)

- De la même manière, les auteurs du rapport LtG ont cherché à évaluer les conséquences des variations de la population et des capacités de production sur différentes variables, en l'occurrence la consommation par tête de ressources naturelles. Il est possible de calculer 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.

Figure 5 : Les ressources naturelles



La relation entre la richesse (production industrielle par tête) et la demande de matières premières (consommation par individu) serait exprimée par une courbe non linéaire. L'historique de la consommation de l'acier et du cuivre aux Etats Unis semble confirmer le sens de cette relation. Au 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 lentement. Le palier final vers lequel tend la courbe signifierait que l'américain moyen aurait atteint le seuil de saturation de biens matériels. Les augmentations ultérieures de revenus seront toutefois 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.

Parmi les futurs possibles, l'idée d'un effondrement fait son chemin

Dans le rapport LtG, ce sont près de 13 scénarios qui voient le jour, certains montrent une progression de la croissance, puis une chute, d'autres sont plus stables. La conclusion du rapport était cependant sans équivoque. Le système global tendait inéluctablement vers une surchauffe suivie d'un effondrement. La cause de cet effondrement reposait principalement sur la disparition de matières premières. A partir du moment où les investissements nécessaires pour maintenir un certain niveau de production ne peuvent plus compenser la dépréciation du capital, la production industrielle s'effondre et entraîne l'effondrement des activités agricoles et des services qui lui sont associées. 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 peut 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 : « Cela nous permet d'affirmer avec une quasi-certitude que, au cas où aucun changement n'interviendrait dans notre système actuel, l'expansion démographique et l'expansion économique s'arrêteraient au plus tard au cours du siècle prochain (avant l'an 2100, précisera le rapport) » (1972, p. 232). Le système s'effondre par suite d'une pénurie de matières premières. Qu'advierait-il si le stock des matières premières avait été sous-évalué ? Les auteurs du rapport sont formels : c'est le niveau de la

pollution qui serait 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'épuisent 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 ? Si nous nous contentons de l'hypothèse selon laquelle rien ne sera changé par rapport à la politique actuelle, cela deviendra une certitude* » (1972, p. 234).

Au-delà des polémiques suscitées par le rapport LtG (Cole, Freeman, Jahoda, Pavill, 1973) et de ses réactualisations successives (1992, 2002, 2022¹⁸), il convient de signaler que les travaux du groupe du MIT ont modifié nos perceptions du futur et plus généralement notre capacité à nous projeter dans le long terme (et ce, à une période où la théorie keynésienne prônait un retour au court terme). La force du rapport LtG réside dans le fait qu'il inscrit le futur dans une démarche à la fois *prospectiviste* (méthode des scénarios), *systemique* (les systèmes intègrent des délais de retard et des boucles de rétroaction) et *intégrée* (World 3 a initié une famille de modèles appelés les Integrated Assessment Models).

En effet, le rapport LtG a introduit dans la littérature, la notion de scénarios à partir de modèles de simulation. Il s'agit ici de penser le futur, non pas à partir de prévisions ou d'extrapolation du passé, mais à partir de boucles causales décrivant des tendances de long terme (une autre approche - la prospective - verra le jour en France avec la création du Commissariat au Plan). Cette approche par la simulation a été largement décrite par Barney, Kreutzer et Garrett (1991) dans un ouvrage intitulé *Managing a Nation : The Microcomputer Software Catalog*. Les principaux travaux restitués s'appuient sur la simulation informatique afin de permettre aux équipes dirigeantes de projeter leurs décisions politiques dans l'ère du 21^e siècle et de cerner les résultats de plusieurs modèles (Barney, Wilkins 1986). L'ouvrage recense différents modèles sectoriels. On peut citer le modèle DSBMT (Dynamic synthesis of Basic Macroeconomic Theory) qui fournit, à l'aide d'un simple modèle dynamique, une synthèse des plus importants modèles macroéconomiques utilisés par les économistes. On y retrouve le principe du multiplicateur-accélérateur de Samuelson (1939), le modèle IS-LM de Hicks (1937) ou encore un modèle d'offre et de demande agrégées de Dornbush et Fisher (1978). Il y a également le modèle SDNM (System Dynamics National Model) qui est un modèle de simulation informatique des changements sociaux et économiques aux Etats-Unis (Forrester, Mass, Ryan, 1976). Ce modèle a été conçu pour l'analyse des politiques publiques et contient une structure politique

¹⁸ En 2022, Dennis Meadows a réitéré le message alarmiste de 1972 : « *aujourd'hui, selon de nombreuses études indépendantes, le monde suit un chemin très semblable à celui que nous avons tracé dans notre scénario de référence. Globalement, je pense que nous sommes entrés dans une période où il est très difficile, voire impossible de créer une nouvelle vraie richesse* » (Meadows, 2022, p. 76).

profonde allant de la politique gouvernementale, fiscale et monétaire jusqu'à la comptabilité des entreprises, la fixation des prix et l'ordonnement des facteurs de production. Le modèle aborde des questions interdépendantes que sont l'inflation, le chômage, la récession, la balance des paiements, l'énergie et l'environnement.

Les modèles nationaux multi-secteurs et globaux ont également leur place. Les modèles mondiaux donnent une vue d'ensemble des interactions entre les nations. Ces modèles prennent de plus en plus d'importance, non seulement en raison du développement du commerce international, mais aussi en raison des impacts environnementaux transnationaux et des migrations internationales. On peut citer ici le modèle STRATEGEM (1), créé à l'Institut International pour l'Analyse des Systèmes Appliqués (IIASA) par Dennis Meadows au cours de la période 1983-1984. STRATEGEM (1) a été conçu à la suite du modèle World 3 (Meadows & al., 1972). Plus simple que son prédécesseur, STRATEGEM (1) comportait cinq secteurs, représentant les interconnexions entre la population, la production et l'utilisation de l'énergie, la production agricole et la protection de l'environnement, la production de biens et de services, et le commerce international et la dette extérieure (Meadows, 2001). Les joueurs interagissent avec le modèle à travers dix cycles de prise de décision ; chaque cycle représentant cinq années dans le développement de la région de leur jeu. STRATEGEM (1) avait ainsi pour objet de simuler la gestion d'une nation en y intégrant les effets des décisions politiques relatives à la population, l'énergie, la nutrition, la dette, la consommation matérielle et l'environnement (Meadows, 2007). Par la suite, une version STRATEGEM (2) intégrant la question des cycles longs Kondratieff verra le jour sous la plume de Dennis Meadows et John Sterman (1985).

Ainsi, dès les années 70, les théoriciens et notamment les économistes disposaient d'outils (les modèles de simulation) pour penser le futur et questionner les formes abstraites de leurs représentations du monde (Passet, 2010). La prospective faisait ses grands débuts dans un cadre de planification indicative. Malgré ces avancées, le choix d'internaliser les coûts externes en matière environnementale et de donner la préséance aux mécanismes de régulation du marché ont continué de nous proposer une vision anthropocentrée de la place de l'homme vis à vis de la nature. Une telle approche ne permettait pas de penser l'Anthropocène et d'accepter l'idée que l'homme était en train de mettre en danger sa propre espèce et par la même occasion, la planète toute entière.

Conclusion

Au fil du temps, les théories économiques se sont forgées un cadre conceptuel "hors sol" dans lequel l'abstraction des concepts allait de pair avec une externalisation de la nature et de la morale. Seules, l'économie pure et l'économie appliquée méritaient l'attention des théoriciens. Or, même si les sociétés sont par essence économiques, l'économie ne peut s'extraire des limites sociales et biophysiques. Cela reviendrait à

considérer que l'économie peut croître indéfiniment et que le système capitaliste nous proposerait un avenir radieux, dont nos illusions seraient bercées par le productivisme, le consumérisme et l'accumulation du capital. L'ère de l'Anthropocène nous a rattrapé et semble ternir ce paysage idyllique façonné par les théories économiques. Les transformations irréversibles au sein de la biosphère (changement climatique, érosion de la biodiversité...) nous rappellent que les êtres humains ne sont qu'une espèce parmi d'autres et que l'effondrement des sociétés humaines, évoqué dans les années 70 par les Doom-Writers, ne sont pas uniquement tirées des romans de Science-Fiction ou des lubies de certains journalistes. Certains points de non-retour - évoqués par Karl Marx, Nicholas Georgescu-Roegen ou encore le rapport *Limits to Growth* - illustrent ce que l'on a coutume d'appeler aujourd'hui les *Planetary Boundaries* (Rockstrom, 2009). Le concept d'*Overshoot* (dépassement en français) semble même reconfigurer la matrice économique en proposant une réduction de la consommation et de la production pour limiter notre empreinte écologique.

Bibliographie

ALCOUFFE A., FERRARI S. (2008) *Growth versus development from Schumpeter to Georgescu-Roegen*, 12th Annual Conference of the European Society for the History of Economic Thought, Prague, 15-17 May 2008.

BARNEY G.O, KREUTZER W.B, GARRETT M.J (1991). *Managing a Nation : The Microcomputer Software Catalog*. *Institute for 21st Century Studies and Westview Press*.

BARNEY G.O, WILKINS S. (1986), *Managing a Nation : The Software Sourcebook*. Arlington. Global Studies Center.

BERGSON H. (1911) « *Creative Evolution* » Henry Holt, New York

BOUTILLIER S. (2003), *Les économistes et l'écologie, enseignements historiques*. *Innovations*, n°18, 139 - 165.

BURKETT P. (1999), *Marx and Nature, A Red and Green Perspective*. Palgrave MacMillan.

CARNOT S. (1824) « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* » Paris, Bachelier. Réédition en 1872, 1878, 1913, 1953.

COLE S.D, FREEMAN C., JAHODA M., PAVITT K.L.R (1973), *Models of Doom, A Critique of the Limits to Growth*. Universe Books.

COT A. L. (1999) " *Evolutionnisme et théorie économique : les leçons de l'histoire*" ; *Economie et sociétés*, HS, n°35, 1, 1999.

CRUTZEN P.J, STOERMER E. (2000), *The Anthropocene, Global Change*, Newsletter n°41, p. 17-18.

CRUTZEN P.J (2002), *Geology of Mankind*. *Nature*. 3 janvier. Traduction dans *Ecologie et Politique*, vol 34, p. 143 - 145.

DANNEQUIN F., DIEMER A., PETIT R., VIVIEN F.D (2000), « La nature comme modèle ? Ecologie industrielle et développement durable ». *Cahiers du CERAS*, n°38, mai, p. 62- 75.

DANNEQUIN F., DIEMER A. (1999), *La place de la biologie et de la thermodynamique dans la théorie contemporaine : l'œuvre scientifique de Nicholas Georgescu-Roegen*, Colloque de l'Association Charles Gide, 26 et 27 septembre, Paris, p. 1 - 8.

DANNEQUIN F., DIEMER A., VIVIEN F.D (1998) « *Thermodynamique, biologie et économie chez Georgescu-Roegen* » Colloque de Reims, journée Hermès du 7 décembre (p. 1 - 8).

DANNEQUIN F., DIEMER A. (1998), « Nicholas Georgescu-Roegen, penseur de la production, penseur de la révolution industrielle », Colloque international *L'œuvre scientifique de Nicholas Georgescu-Roegen*, Strasbourg, novembre, p. 1-32.

DE GLERIA S. (1995) "*Nicholas Georgescu-Roegen-Roegen : a mind that thought above his time*" ; *Economia Internazionale*, vol XLVIII, 3, Agosto, 1995.

DIEMER A., SOURGOU H., CHAN D., PEDERCINI M. (2022), Le Modèle iSDG, quand la dynamique des systèmes se met au service de la planification des politiques de développement durable dans les pays du Sud. *Revue Francophone du Développement Durable*, n°19, mars, p. 145 – 176.

DIEMER A. (2019), Business Cycle to 2008's Crisis : How System Dynamics Can Help the Economists to Understand Financial Crisis, in Alcouffe A., Baslé M., Poettinger M. (ed.), *Macroeconomy Theory and the Eurozone Crisis*, Routledge, p. 19 – 58.

DIEMER A. (2009), *Economie Générale*, Oeconomia Editions.

DI RUZZA R. (1999) "*Évolutionnisme et Histoire*", *Economies et Société*, HS, n°35, 1.

FERRARI S. (2023), *Nicholas Georgescu-Roegen et la bioéconomie*. Editions Le passager clandestin.

FERRARI S. (2021) Éthique et bioéconomie chez Nicholas Georgescu-Roegen. *Cahiers d'Économie Politique*, n°79, p. 213-242.

FORRESTER J.W, MASS N.J, RYAN C.J (1976), "The system Dynamics National Model : Understanding Socio-Economic Behavior and Policy Alternatives", *Technological Forecasting and Social Change*, vol 9, p. 51 – 68.

FORRESTER J.W. (1971a), *World Dynamics*, Waltham, MA, Pegasus Communications

FORRESTER J.W. (1971b), "Counterintuitive Behavior of Social Systems", *Technology Review*, vol 73, n 3, January, pp. 52-68.

FORRESTER J.W. (1969), *Urban Dynamics*, Waltham, MA, Pegasus Communications.

FORRESTER J.W. (1968a), *Principles of Systems*, Waltham, MA, Pegasus Communications.

- FORRESTER J.W. (1968b), "Industrial Dynamics : After the First Decade", *Management Science*, vol 14, n 7, March, pp. 398-415.
- FOSTER John Bellamy, (2000). *Marx's Ecology: Materialism and Nature*, New York Monthly Review Press.
- GEMENNE F., DENIS M. (2019), Qu'est-ce que l'Anthropocène ? <https://www.vie-publique.fr/parole-dexpert/271086-terre-climat-quest-ce-que-lanthropocene-ere-geologique>
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1995) « *Demain, la décroissance : entropologie-écologie-économie* » Editions Sang de la Terre.
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1987) « *Entropy* » in J. Eatwell, M. Milgate, P.K Newman, *The New Palgrave, A Dictionary of Economics*, vol I, London, Mc Millan Press, (p 153 - 156)
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1986) " Man and production", in Baranzani M. et Scazzieri R. (eds) "Foundations of economics", Basil Blackwell.
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1979) " *Methods in economic science*", *Journal of economic issues*, vol XIII, n°2, june.
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1978) « *De la Science Economique à la Bioéconomie* » *Revue d'Economie Politique*, t LXXXVIII, n° 3 Mai-Juin, p. 337 - 382.
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1978) " *Mechanistic dogma and economics*", *British review of economic issues*, 2.
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1977 a) « *What Thermodynamics and Biology Can Teach Economists* » *Bio-Science* vol XXVII avril (p 266 - 270).
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1977 b) « *Inequality, Limits and Growth from a Bioeconomics Viewpoint* » *Review of Social Economy* vol XXXV décembre (p 361 - 375).
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1976) « *Energy and Economic Myths* » New York Pergamon Press.
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1975) « *Bio-Economic Aspects of Entropy* » dans «*Entropy and Information in Science and Philosophy* » J. Zeman, Amsterdam Elsevier.
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1971) « *The Entropy Law and the Economic Process* » Cambridge, Harvard University Press.(4ème édition 1981).
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1966), *Analytical Economic-Issues and Problems*. Cambridge Harvard University Press.
- GRINEVALD J. (1996) « *Nicholas Georgescu-Roegen : La Ley de la Entropia y el Proceso Economico* » Madrid, Fundacion Argentaria/ Visor 1, (p 1 - 37).

GIEC (2022), *Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change*. Working Group III, Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change.

GIEC (1995), *Climate Change 1995 – Economic and Social Dimensions of Climate Change*, Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

GRINEVALD J. (1993) "*Georgescu-Roegen-Roegen : bioéconomie et biosphère*" ; Silence n°164, avril.

GRINEVALD J. (1973), « *La notion d'entropie dans la pensée contemporaine, fragments pour une recherche holistique sur le temps, le désordre et la mort* ». Mémoire de maîtrise, Faculté de philosophie, Université de Besançon.

HUSSON M. (2018), *Marx Précurseur de l'écologie, Alternatives Économiques*, Dossier Marx, Avril.

HEILBRONER R. (1995), *Visions of the Future*. Oxford University Press.

JEVONS W. S. (1865) "*The coal question : an inquiry concerning the progress of the Nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*", Macmillan, Londres.

KOVEL J. (2002), *The Enemy of Nature, The End of Capitalism or the End of the World ?* Zed Books, London, Fernwood Publishing.

LIEBIG J. (1840), *Traité de Chimie Organique*. Paris. Fortin Masson et Cie.

LOTKA A. (1956) « *Elements of Mathematical Biology* » New York Dover.

LOTKA A. (1945) « *The Law of Evolution as a Maximal Principle* » *Human Biology* vol 17 Mai (p 67 - 194).

LOWY M. (2011), *Ecosocialism, A Radical Alternative to Capitalist Catastrophe*. Haymarket Books. Chicago, Illinois.

MAGNY, Michel (2019), *Aux racines de l'anthropocène. Une crise écologique reflet d'une crise de l'homme*, Le Bord de l'eau.

MALTHUS R. (1798) *An Essay on the Principle of Population*. J. Johnson Publisher. London. Réimpression, Cambridge Press, 1992.

MARSHALL A. (1898), « *Distribution and Exchange* » *Economic Journal*, (p 37 – 59). On trouve aussi cet article sous la référence suivante : "*Mechanical and biological analogies in economics*", A. Marshall, 1898, in *Memorials of Alfred Marshall*, A. C. Pigou (ed) Kelley & Millman, NY, 1956.

MARX K. (1867), *Le capital* (Réimpression, Editions Sociales, 8 vol, 1978)

MARX K. (1859), *Grundrisse der Kritik der Politischen Ökonomie*. Traduction française : Introduction générale à la critique de l'économie politique. Editions sociales. 1972.

MEADOWS D. (2022), Le système actuel va disparaître. *L'Observateur*, n°3002, 28 avril, p. 75 – 77.

MEADOWS D. (2022), *Préface à l'édition des 50 ans* in Meadows D., Meadows D., Randers J. (ed.), *Les Limites à la Croissance*. L'Écopoche.

MEADOWS D.L (2007). A brief and incomplete history of operational gaming in system dynamics. *System Dynamics Review*, vol 23, p. 199 – 203.

MEADOWS D.L (2001). Tools for understanding the limits to growth: comparing a simulation and a game. *Simulation & Gaming*, vol 32, n°4 December, p. 522-536.

MEADOWS D. (1976), *A Critical of the Short Term Perspectives Implicit in Most Resource Models* in W.A Vogely (ed.), *Mineral Materials Modeling*, RFF Press. Resources for the Future.

MEADOWS D. & al. (1972). *Limits to Growth*, Penguin Editions.

O'CONNOR J. (1998), *Natural Causes, Essays in Ecological Marxism*. The Guildford Press.

PASSET R. (2010), *Les grandes représentations du Monde et de l'Economie*. Les Liens qui libèrent.

PIRGMAIER E. (2018), *Value, Capital and Nature, Rethinking the Foundations of Ecological Economics*, PhD Dissertation, University of Leeds. September.

RICARDO D. (1817), *Les principes de l'économie politique et de l'impôt* (Réimpression, Champs-Flammarion, 1977).

ROCKSTROM J. & al. (2009), A Safe Operating Space for Humanity, *Nature*, vol 461, p. 472 – 475.

SAITO K. (2023), *Marx and the Anthropocene, towards the idea of Degrowth Communism*, Cambridge University Press.

SAITO K. (2021), *La Nature contre le Capital, l'écologie de Marx dans sa critique inachevée du capital*. Syllepse Eds.

SAITO K. (2017), *Karl Marx's Ecosocialism : Capital, Nature and the Unfinished Critique of Political Economy*. Monthly Review Press.

SCHUMPETER J. (1911), (1939) *Business Cycles, A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*, Mc Graw Hill, NY / London.

STERMAN J., MEADOWS, D.L (1985). Stratagem 2: A mMicrocoputer Simulation Game of the Kondratiev Cycle. *Simulation & Games*. Vol 16, n°2, June, 174 – 202.

SMITH A. (1776), *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. W. Strahan and T. Cadell Publisher. London.

VELARDO T. (2021), La vision et l'Analyse chez Schumpeter : Une relecture critique en philosophie économique. *Oeconomia, Varia*, 577 - 622.

VIVIEN F-D. (1994), *Economie et Ecologie*, Collection Repères.