



LE MODELE iSDG, QUAND LA DYNAMIQUE DES SYSTEMES SE MET
AU SERVICE DE LA PLANIFICATION DES POLITIQUES DE
DEVELOPPEMENT DURABLE DANS LES PAYS DU SUD

Arnaud DIEMER, Henri SOURGOU, Derek CHAN, Mattéo PEDERCINI

Revue Francophone du Développement Durable

2022 - n°19 - Mars

Pages 145 - 176

ISSN 2269-1464

Article disponible en ligne à l'adresse :

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

Pour citer cet article

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.

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

Arnaud DIEMER, Henri SOURGOU,
Derek CHAN, Matteo PEDERCINI

*Université de Clermont Auvergne, CERDI, ERASME, HVL, Post-Growth Institute,
Millennium Institute*

Résumé : L'avènement des Objectifs du Développement Durable (ODD) n'a pas simplement remis en cause l'hégémonie de la croissance économique et de son indicateur, le produit intérieur brut (PIB), il a également provoqué l'émergence de nouveaux modèles prospectivistes, plus adaptés au contexte des pays en développement et plus à même d'informer les décideurs politiques sur les conséquences de leurs actions. Le modèle iSDG, associé à la famille des IAM (Integrated Assessment Models), se distingue par son recours à la dynamique des systèmes, popularisée par Forrester et la publication du Rapport *Limits to Growth* (1972). Derrière ce modèle, se cache un puissant outil de simulation susceptible de répondre aux grands enjeux de société. Ces enjeux renvoient à l'évolution démographique, à la consommation alimentaire et énergétique, aux mobilités, à l'éducation et la santé, à l'usage des terres, à l'urbanisation et à la production agricole... Autant de variables d'état susceptibles d'initier une véritable dynamique du changement et de scénariser les trajectoires possibles.

Mots clés : iSDG, Modèles, Systems Thinking, Systems Dynamics, T21

En 2015, l'Assemblée générale des Nations unies a adopté le Programme 2030 pour le développement durable, composé des 17 objectifs du développement durable (ODD) et de cibles connexes (A/RES/70/1). Les ODD se présentent sous la forme d'un appel à l'action de tous les pays (pauvres et riches) afin de promouvoir la prospérité tout en protégeant la planète (Khushik, Diemer, 2020). Il s'agit à la fois de mettre fin à la pauvreté et aux inégalités tout en luttant contre le changement climatique, préservant l'environnement et répondant à un ensemble de besoins sociaux (éducation, santé, protection sociale, emplois). La résolution souligne que "*les liens et la nature intégrée des ODD sont d'une importance cruciale*" et que "*les défis et les engagements identifiés... sont interdépendants et appellent des solutions intégrées*". Afin de répondre au besoin d'outils de planification, le Millennium Institute a développé le modèle iSDG (Integrated Sustainable Development Goals) pour la planification nationale à moyen et long terme vers les ODD. Le modèle iSDG est le dernier né de la lignée des modèles T21, basés sur la dynamique des systèmes et développés par le Millennium Institute (2017). La dynamique des systèmes, initiée par Forrester dans les années 60, s'appuie sur une approche non linéaire des relations entre de nombreuses variables d'un système, elle est particulièrement adaptée pour étudier les environnements socio-économiques complexes (Sterman, 2000).

Dans ce qui suit, nous chercherons à montrer qu'au-delà du simple exercice de modélisation, le modèle iSDG offre un nouveau regard sur les politiques de développement durable, et notamment la mise en place des ODD dans les pays du Sud. Pour ce faire, nous présenterons dans un premier la structure et les caractéristiques du modèle iSDG. Nous reviendrons plus précisément sur les modèles T21. Dans un second temps, nous préciserons la méthode utilisée par ces modèles, la dynamique des systèmes, qui s'écarte radicalement des modèles d'équilibre général et d'optimisation, longtemps prescrits par les institutions internationales, telles que le FMI ou la Banque Mondiale. Enfin, nous reviendrons sur quelques modèles iSDG appliqués à différents pays du Sud, afin de souligner les contributions mais également les critiques que l'on peut adresser à ces modèles.

Le cadre structurel du modèle iSDG

Le modèle iSDG est le dernier né d'une série de modèles appelés T21 (Threshold 21), développés par le Millennium Institute¹ (MI, 2003) à l'échelle des Etats-Unis (Bassi, 2011 ; Bassi & Shilling, 2010 ; Cimren, Bassi, Fiksel, 2010 ; Bassi, 2009 ; Bassi & Pedercini, 2007 ; Bassi, 2006), puis dans un grand nombre de pays africains (Bénin, Cap Vert, Egypte, Ghana, Malawi, Mali, Mozambique, Somalie, Tunisie), asiatiques (Bangladesh, Bhoutan, Cambodge, Chine, Indonésie, Taiwan) ou européens (Italie, Lituanie). Les modèles T21 intègrent les questions de durabilité dans une logique de planification du développement national à moyen et long terme en prenant en compte les facteurs sociaux, économiques et environnementaux, le tout dans un cadre cohérent et intégré (Diemer, 2012, 2005, 2004). Ces modèles présentent plusieurs particularités : (i) ils s'appuient sur un examen détaillé de la littérature en matière de modélisation et de théorie scientifique, provenant de sources telles que celles de la Banque Mondiale, du FMI, de la FAO, du GIEC ou du Département de l'énergie des Etats-Unis ; (ii) ils reposent sur une méthode – la dynamique des systèmes – et des outils de simulation (logiciels Vensim et Stella) susceptibles de résoudre des problèmes complexes et de produire des résultats quantitatifs (graphiques) sur des horizons allant de 5 à 100 ans ; (iii) les simulations permettent de visualiser des trajectoires temporelles pour n'importe quelle variable ou série de variables sur un horizon temporel donné. Il est alors possible de préciser les impacts de politiques publiques ou de changements structurels, mais également de générer des dialogues sur les options choisies avec les différents ministères d'un gouvernement, les agences d'expertise partenaires ou encore la société civile.

Les modèles T21 s'inscrivent dans cette longue lignée de modèles qui sont apparus dans les années 70 et 80 à la suite de la révolution informatique et des simulations assistées par ordinateur (Garrett, 1990 ; Barney, Wilkins, 1986). Barney, Kreutzer et

¹ Hans Herren (2013, p.1) – président du Millennium Institute (MI) – rappelle que MI a été créé en 1983 en tant qu'organisme à but non lucratif pour promouvoir la planification stratégique holistique et à long terme en utilisant des modèles de dynamique des systèmes aux niveaux local, national, régional et global.

Garrett (1991) ont rassemblé cette vaste littérature dans un ouvrage intitulé “*Managing a Nation : The Microcomputer Software Catalog*”. Cet ouvrage se présente comme “*a collection of reviews of microcomputer programs of special relevance to those people around the world who are responsible for the management of the current and future affairs and business of their countries*” (1991, p. 3). Le livre est composé de trois parties.

La première partie recense les modèles sectoriels, les secteurs renvoient ici à différentes thématiques : l’agriculture, l’économie et l’industrie, l’énergie, l’environnement et l’écologie, les ressources naturelles, la politique, la démographie, la santé et l’éducation, le développement rural et urbain, la sécurité nationale ou encore les transports et la communication. Ainsi, dans le thème économie et industrie, on peut citer l’existence du 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 profonde allant de la politique gouvernementale, fiscale et monétaire jusqu’à la comptabilité des entreprises, la fixation des prix et l’ordonnancement 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. Dans le cas de l’énergie, on peut citer le modèle LEAP (Long Range Energy Alternatives Planning System) développé par le Stockholm Environment Institute (SEI). LEAP fournit un cadre informatisé pour l’évaluation des options de politique et de planification énergétiques dans les pays en développement. LEAP a été conçu comme un outil flexible et accessible permettant aux planificateurs et aux décideurs d’identifier et de quantifier les implications à long terme des alternatives de politique énergétique (Raskin, 1985). Lors de la conception et de la mise en œuvre d’un plan énergétique efficace, le planificateur doit tenir compte de questions très diverses : sources et prix des combustibles, stratégies énergétiques rurales, compromis en matière d’environnement et d’utilisation des terres, gestion de la demande et de la conservation de l’énergie, et évolution des modèles économiques et démographiques. LEAP a trois principales fonctions : “ (1) *an information bank and guide to data development in establishing national energy accounts ; (2) an instrument for long-term projections of supply/demand configurations under alternative development scenarios ; and (3) a vehicle for identifying and evaluating policy and technology options with respect to near and long-term supply/demand balance, capital requirements, costs and benefits and foreign exchange impacts*” (Raskin, 1986, p. 1).

La deuxième partie introduit des modèles nationaux multi-secteurs et des modèles globaux. Les modèles nationaux multisectoriels synthétisent un grand nombre des

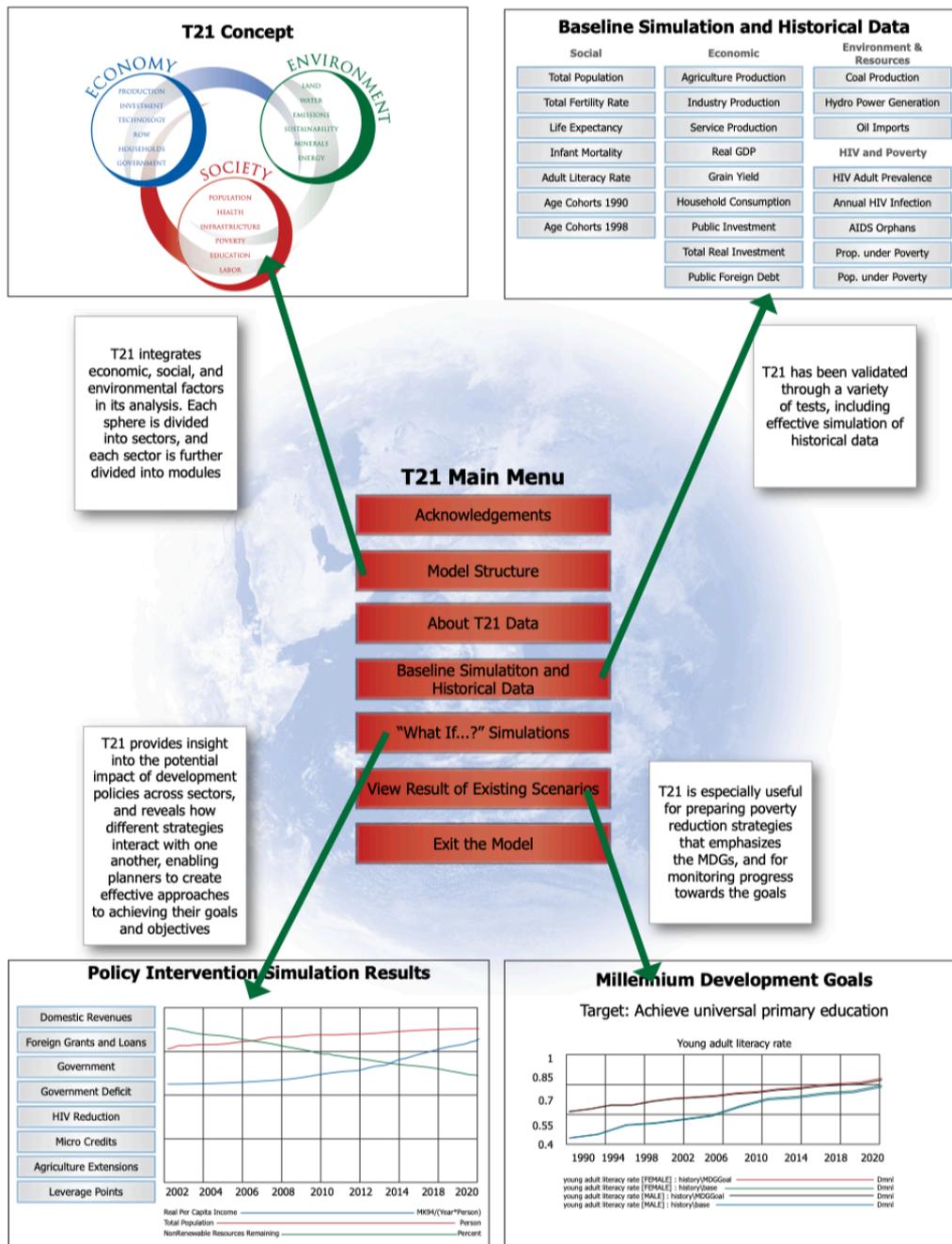
domaines individuels abordés dans la première partie. Cette intégration est très importante car pratiquement toutes les questions de politique publique importantes dépassent les frontières ministérielles (Barney, Kreutzer, Garret, 1991). Les modèles mondiaux donnent une vue d'ensemble des interactions entre les nations. Ces modèles prennent de plus en plus d'importance, non seulement en raison des relations et du commerce internationaux, 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 ; Sterman, Meadows, 1985). 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). WORLD 3 est quant à lui, le modèle mondial associé au rapport *Limits to Growth* (Meadows & al., 1972). Il consistait à simuler sur une période de 100 ans et plus, les interactions dynamiques globales de la population, des terres arables, du capital agricole et industriel, des services du capital, des ressources non renouvelables et de la pollution. La structure détaillée du modèle a été présentée dans *The Dynamics of Growth in a Finite world* (Meadows & al., 1974) et reconceptualisée dans *Toward Global Equilibrium* (Meadows, 1973)

La troisième partie consiste à aider le lecteur à tirer parti des bénéfices des modèles et des simulations informatiques en questionnant l'objet du modèle, ses hypothèses, le recours aux données et l'origine des sources de données. Ce chapitre rédigé par John Sterman introduisait notamment la différence entre modèles d'optimisation et modèles de simulation : "*The distinction between optimization and simulation models is particularly important since these types of models are suited for fundamentally different purposes*" (Sterman, 1991, p. 212).

C'est cet état des lieux de la littérature qui a initié les premiers travaux du Millennium Institute et le développement des modèles T21. Ces modèles s'appuient sur une structure générique qui représente des mécanismes de développement que l'on peut trouver dans la plupart des pays en développement et industrialisés. Cette structure couvre un large éventail de problèmes auxquels les pays du monde entier sont confrontés : de la pauvreté à la dégradation de l'environnement, de l'éducation à la santé, de la croissance économique aux expansions démographiques. En d'autres

termes, les modèles T21 sont conçus pour couvrir les problèmes à long terme les plus courants que les pays rencontrent dans le processus de développement.

Figure 1 : Ossature du T21

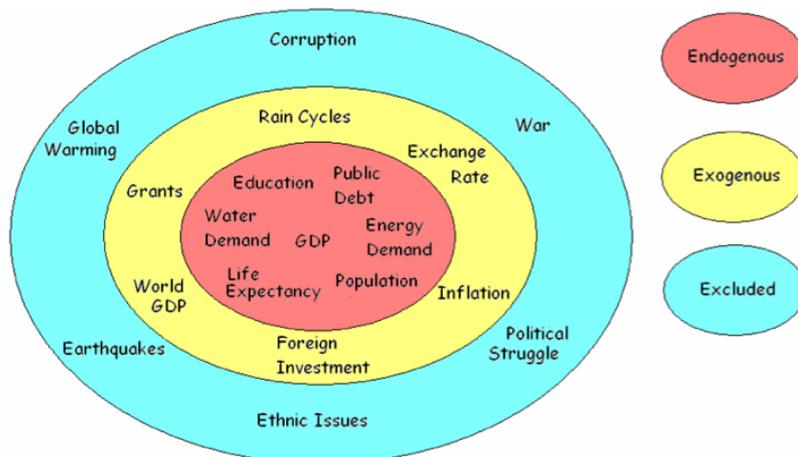


Source : Millennium Institute (2007, p. 2)

Dans sa forme originelle, le modèle T21 intègre des limites à la fois conceptuelles (variables endogènes, exogènes et exclues) et d'ordre spatio-temporel (Zapata, Gauthier, 2003). Les variables endogènes font partie intégrale des mécanismes de développement, on y retrouve le PIB, la population, l'éducation, la dette publique, la demande d'énergie. Les variables exogènes qui ont une influence importante dans les problématiques posées mais qui ne sont que faiblement influencées par ces dernières

(on peut citer le taux de change, les cycles des pluies ou encore le niveau des subventions). Enfin, les variables qui n'ont pas d'effet quantifiable et qui ne sont pas explicitement représentées dans le modèle. C'est le cas des températures, des critères ethniques ou de la corruption).

Figure 2 : Diagramme inclusion et exclusion des variables



Source : MI (2007, p. 5)

En raison du niveau de variété des problématiques prises en compte, le modèle T21 est un modèle de taille relativement importante. Il est composé de plus d'un millier d'équations et il comprend près de 60 variables de stocks et plusieurs milliers de boucles de rétroaction. Le T21 est composé de 37 modules, regroupés en 18 secteurs (6 secteurs sociaux, 6 secteurs économiques et 6 secteurs environnementaux). On retrouve ici les trois sphères (la société, l'économie et l'environnement) de la durabilité.

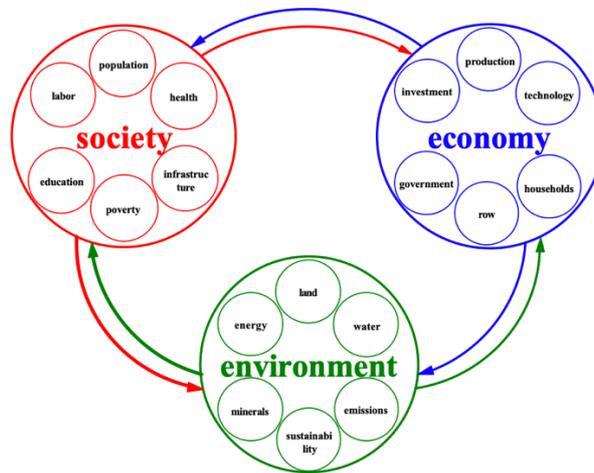
Tableau 1 : Modules, secteurs et sphères du T21

SOCIETE	ECONOMIE	ENVIRONNEMENT
Secteur de la population 1. Population 2. Fertilité 3. Mortalité	Secteur de la production 14. Production nationale et revenus 15. Agriculture 16. Elevage, pêches, foresterie 17. Industries 18. Services	Secteur de la terre 30. Les terres
Secteur de l'éducation 4. Education primaire 5. Education secondaire	Secteur technologique 19. Technologie	Secteur de l'eau 31. La demande d'eau 32. L'offre d'eau
Secteur de la santé 6. Accès aux soins essentiels de santé 7. HIV/SIDA 8. HIV Enfants 9. Nutrition	Secteur des ménages 20. Compte des ménages	Secteur de l'énergie 33. La demande d'énergie 34. L'offre d'énergie
Secteur des infrastructures 10. Routes	Secteur de l'Etat 21. Les recettes de l'Etat 22. Les dépenses de l'Etat 23. L'investissement public et la consommation 24. La balance publique et son financement 25. La dette publique	Secteur des minéraux 35. La production d'énergie fossile
Secteur du travail 11. Emploi 12. Travail disponible et coût	Secteur international 26. La balance commerciale 27. La balance des paiements	Secteur des émissions 36. Les énergies fossiles et les émissions GES
Secteur de la pauvreté 13. Distribution des revenus	Secteur de l'investissement 28. Prix relatifs 29. L'investissement	Secteur de la durabilité 37. L'empreinte écologique

Source : MI (2007, p. 8)

La principale caractéristique distinctive de T21 réside toutefois dans la manière dont les différents modules sont reliés entre eux, formant un réseau complexe de boucles de rétroaction. La figure 3 propose une vue conceptuelle des trois sphères (société, économie et environnement) ainsi que des liens avec les secteurs. Ainsi, chaque sphère affecte et est affectée par les deux autres.

Figure 3 : Sphères, secteurs et liens croisés

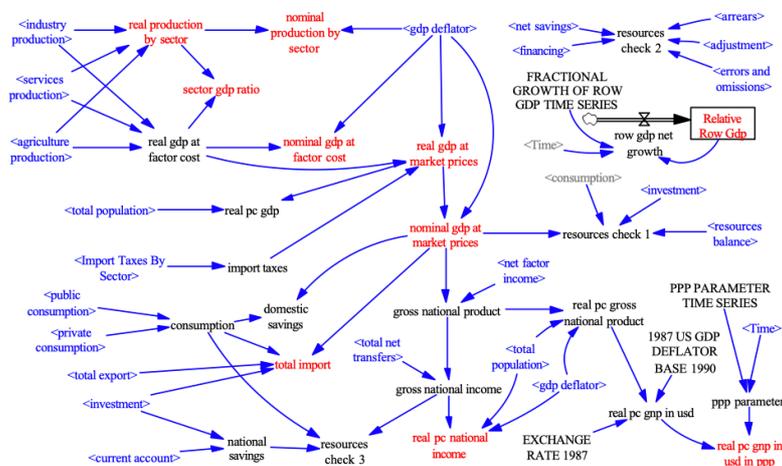


Source : MI (2007, p. 10)

La flèche bleue allant de la sphère économique à la sphère sociale indique qu'au moins un secteur économique affecte un secteur social, par exemple, la production peut affecter la population. Chaque secteur est composé de variables endogènes et exogènes, de paramètres, de variables de stocks et de flux.

Prenons le secteur 14 Production nationale et revenus. Le module est bâti à partir d'identités comptables et d'indicateurs clés en macroéconomie, inspirés par l'ouvrage *Macroeconomics* de Dornbusch et Fisher (1994). C'est le cas du niveau donné de production, obtenu par la somme de la consommation, de l'investissement et des exportations, moins les importations : $Y = C + I + X - M$

Figure 4 : Production nationale et revenus

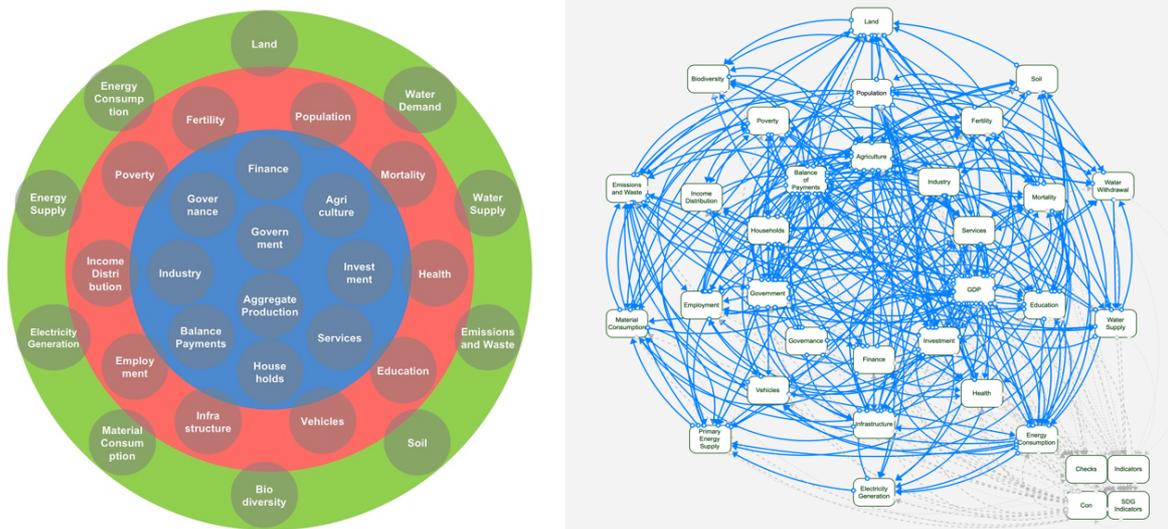


Source : MI (2007, p. 65)

Au fil du temps, le T21 a évolué, incorporant des structures supplémentaires en fonction des besoins et vérifiées par les universitaires et les praticiens sur le terrain par le biais de la construction de modèles de groupe et d'applications pratiques du modèle. Le modèle iSDG est la dernière version du modèle T21.

(i) C'est un modèle de système dynamique intégré, couvrant tous les Objectifs du Développement Durable (ODD) avec une batterie de plus de 80 indicateurs. L'intégration concerne principalement trois domaines (économie, social et environnement). Chaque domaine comprend des secteurs (30 secteurs au total) qui interagissent entre eux et avec les secteurs des autres domaines.

Figure 5 : La structure du modèle iSDG

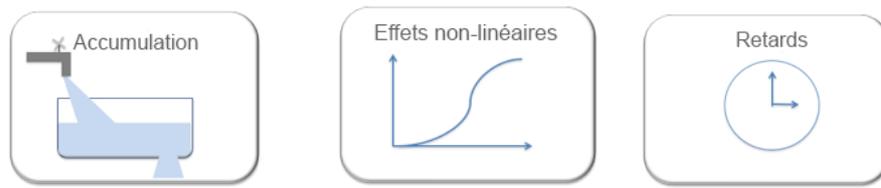


Source : Millennium Institute

Le domaine de l'économie (bleu) contient les principaux secteurs de production (agriculture, industrie, services) qui sont caractérisés par des fonctions de production Cobb-Douglas avec des entrées de ressources, de travail, de capital et de technologie. La demande est basée sur la population et le revenu par habitant et est distribuée entre les sous-secteurs. Le domaine social (rouge) contient la dynamique détaillée de la population par sexe et cohorte d'âge, les défis et programmes de santé et d'éducation, les infrastructures de base, l'emploi, les niveaux de pauvreté et la distribution des revenus. Le domaine Environnement (vert) suit la pollution créée dans les processus de production et ses impacts sur la santé. Il estime également la consommation de ressources naturelles (renouvelables et non renouvelables) et l'impact de l'épuisement de ces ressources sur la production et d'autres facteurs (MI, 2017).

(iii) Il représente les éléments importants de la complexité que nous trouvons dans la dynamique des systèmes (relations de rétroaction flux - stocks, non-linéarité, délais).

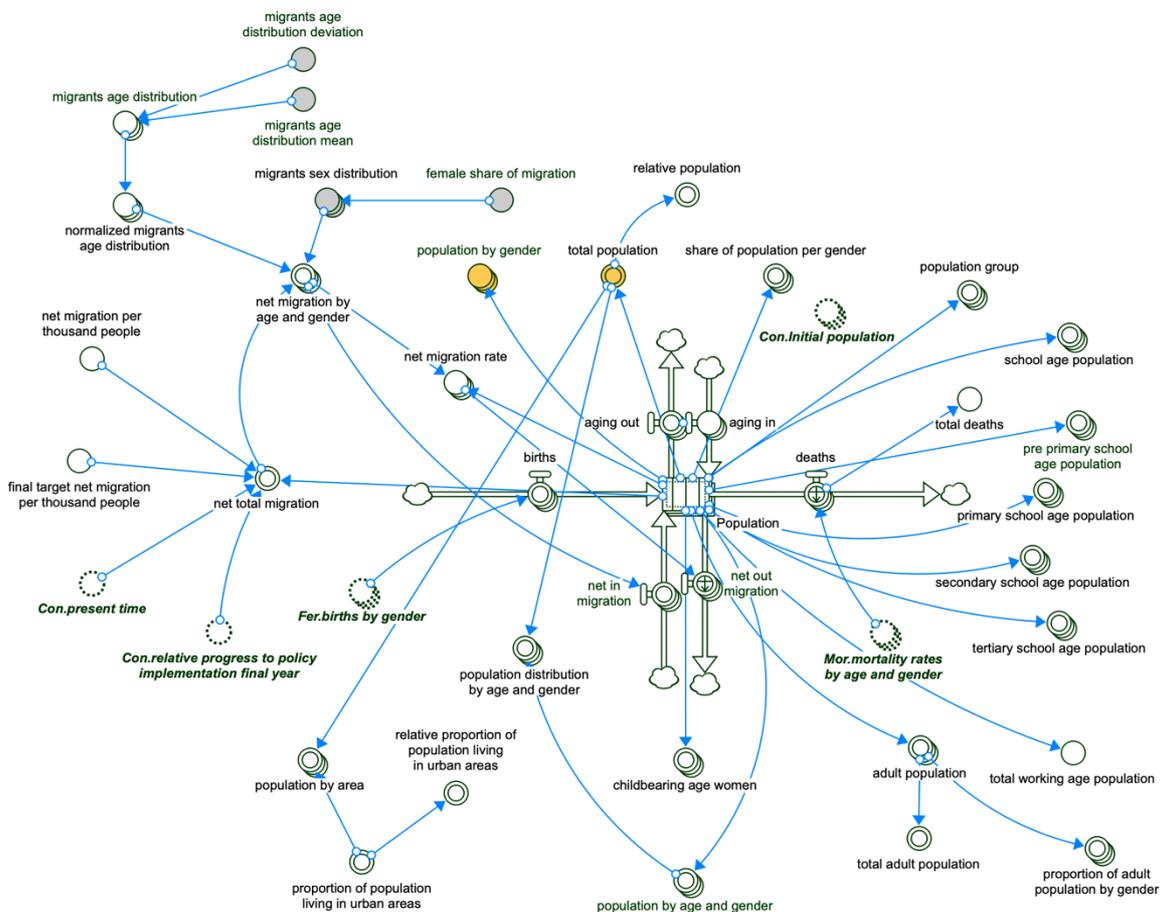
Figure 6 : Eléments de la dynamique des systèmes



Source : Diemer (2004)

Prenons l'exemple du secteur de la population qui fait partie du domaine social, sa modélisation via le logiciel STELLA, permet de faire apparaître les flux entrants (naissances : births ; migrations : net in migrations) et sortants (décès : deaths ; migrations : net out migrations), modifiant le stock de population. Le taux de fécondité joue sur les naissances, le taux de mortalité a des conséquences sur les décès. La population permet de déterminer une population en âge d'aller à l'école, mais également une classe d'âge allant à l'école primaire ou l'école secondaire. La population permet également d'intégrer la question du genre, la part de la population vivant dans les zones urbaines et celle habitant les zones rurales.

Figure 7 : Secteur de la population dans le modèle iSDG (Stella)



(iii) Il est transparent dans sa structure (hypothèses, équations, données requises), de manière à servir d'outil participatif (Van Den Belt, 2004 ; Vennix, 1996) dans la recherche de consensus et les discussions politiques (Collste, 2016).

(iv) Il est flexible pour être adapté à des pays spécifiques par la formation des utilisateurs sur la base des conditions spécifiques du pays (le Bangladesh pour les soins de santé, la nutrition et l'éducation en 1994 ; la Tunisie pour l'eau et la fertilité revisitée en 1996 ; le Cambodge pour les effets de la guerre en 1997 ; la Chine pour les prix relatifs, le transport et l'interface chinoise en 1999 ; Guyana pour l'ajustement structurel des industries du sucre et de la bauxite en 2001 ; Mozambique pour le microcrédit, l'extension agricole, les nouvelles routes et les objectifs du millénaire pour le développement en 2003, Mali pour la production de coton et l'extraction d'or en 2005 ; Jamaïque pour la criminalité, les catastrophes naturelles, la production de canne à sucre en 2006 ; la CEDEAO et la conception de modèles d'intégration régionaux en 2010 ; le Burkina-Faso pour son rapport exploratoire sur l'économie verte en 2014 ; le Sénégal comme outil d'évaluation quantitative des scénarios pour 2035 en 2014 ; la Côte d'Ivoire pour les impacts économique, social et environnemental de la transition vers une économie verte en 2017 ; le Sénégal comme outil de projection des indicateurs des ODD en 2017). La calibration du modèle s'appuie sur une base de données pays.

(v) Il simule les conséquences à court et à long terme des politiques alternatives (2030 - 2050).

(iv) Il permet la comparaison avec des scénarios de référence et supporte des méthodes analytiques avancées telles que l'analyse de sensibilité et l'optimisation.

Modèle de dynamique des systèmes

Le modèle ISDG se distingue surtout dans le paysage des Integrated Assessment Models (Diemer & al. 2019) par le recours à la dynamique des systèmes, développée au MIT dans les années 1960 par Forrester. Son premier livre, *Industrial Dynamics* (1961), contient les germes d'une méthode qui connaîtra le succès dans les années 1970, notamment à travers deux ouvrages "*World dynamics*" (Forrester, 1972) et *Limits to Growth* (Meadows et al., 1972).

Pour Forrester (1961), la dynamique industrielle était une façon d'étudier le comportement des systèmes industriels afin de montrer comment les politiques, les décisions, la structure et les retards sont liés entre eux pour influencer la croissance et la stabilité d'un système (Diemer, 2018). Parler de systèmes " implique une structure de fonctions en interaction. Tant les fonctions distinctes que les interrelations définies par la structure contribuent au comportement du système" (Forrester, 1967, p. 1). Pour décrire un système, nous devons décrire non seulement les fonctions séparées, mais aussi leur mode d'interaction : "Tel qu'il est utilisé ici, un système signifie un regroupement de parties qui fonctionnent ensemble dans un but commun" (Forrester, 1968a, p. 1). Ainsi, pour

identifier la structure d'un système spécifique, il faut comprendre la nature fondamentale de la structure commune à tous les systèmes dynamiques. Dans *Industrial Dynamics*, Forrester a intégré les domaines fonctionnels distincts que sont la gestion, le marketing, l'investissement, la recherche, le personnel, la production et la comptabilité (Forrester, 1968b). Chacune de ces fonctions est ramenée à une base commune en reconnaissant que toute activité économique ou d'entreprise consiste en des flux d'argent, de commandes, de matériaux, de personnel et de biens d'équipement. Ces cinq flux sont intégrés par un réseau d'information. De ce fait, la dynamique industrielle *"reconnaît l'importance critique de ce réseau d'information pour donner au système ses propres caractéristiques dynamiques"* (Forrester, 1961, p. vii).

Selon Forrester, la dynamique industrielle est devenue possible à la suite de quatre avancées majeures : (1) la théorie du contrôle par rétroaction de l'information, (2) l'analyse des processus décisionnels, (3) les approches expérimentales de l'analyse des systèmes et (4) les ordinateurs numériques.

1) Un système de rétroaction de l'information existe *"chaque fois que l'environnement conduit à une décision qui entraîne une action qui affecte l'environnement et influence ainsi les décisions futures"* (Forrester, 1961, p. 14). L'étude des systèmes de rétroaction porte sur la manière dont l'information est utilisée à des fins de contrôle. Elle permet de comprendre comment la quantité d'actions correctives et les délais dans les composants interconnectés peuvent conduire à des fluctuations instables. Pour Forrester, les systèmes de rétroaction de l'information ont trois caractéristiques : la structure (qui nous indique comment les parties du système sont reliées les unes aux autres), les délais (qui existent toujours dans la disponibilité de l'information, dans la prise de décisions basées sur l'information et dans l'action sur les décisions) et l'amplification (qui se manifeste lorsqu'une action est plus énergique que ce qui pourrait être impliqué à première vue par les entrées d'information des décisions qui gouvernent).

(2) Les processus décisionnels ont été réalisés dans les années 1950 lors de l'automatisation des opérations tactiques militaires. Pour Forrester, les décisions de prédiction de conduite de tir pendant la Seconde Guerre mondiale ont été prises automatiquement par des machines. Quelques années après, ces décisions automatiques ont été acceptées et mises en pratique. Il était donc nécessaire d'interpréter le jugement tactique et l'expérience des décisions militaires en règles et procédures formelles : *"Il a été amplement démontré que des règles formelles soigneusement sélectionnées peuvent conduire à des décisions tactiques à court terme qui dépassent celles prises par le jugement humain sous la pression du temps, ou avec des hommes ayant une expérience et une pratique insuffisantes, ou dans la rigidité des grandes organisations"* (Forrester, 1961, p. 17).

(3) L'approche expérimentale nous rappelle que l'analyse mathématique n'est pas assez puissante pour donner des solutions analytiques générales à des situations aussi complexes que celles rencontrées dans les affaires. La simulation est souvent utilisée

pour mener des expériences sur un modèle (par exemple, la conception d'un système de défense aérienne ou d'un processus d'ingénierie) : *"L'utilisation des méthodes de simulation ne nécessite pas de grandes capacités mathématiques. Bien sûr, les détails de la mise en place d'un modèle doivent être suivis par des experts car il y a des compétences spéciales requises et des pièges à éviter"* (Forrester, 1961, p. 18).

(4) Les ordinateurs électroniques numériques sont devenus disponibles entre 1950 et 1960. Les machines à calculer (avec une mémoire, une vitesse et une capacité accrues) permettaient de traiter des systèmes plus complexes.

Ces quatre nouveaux domaines associés à la modélisation des entreprises ont constitué le terreau du développement de la dynamique des systèmes : *"Le hasard est encore intervenu lorsque je me suis retrouvé à discuter avec des gens de General Electric. Ils se demandaient pourquoi leurs usines d'appareils ménagers travaillaient parfois en trois ou quatre équipes et devaient, quelques années plus tard, licencier la moitié de leur personnel. ... Après avoir découvert comment la société prenait ses décisions en matière d'embauche et d'inventaire, j'ai commencé à faire des simulations, en utilisant un crayon et une page dans un cahier. En haut, j'ai mis des colonnes pour les stocks, les employés et les commandes. Compte tenu de ces conditions et des politiques suivies, on pouvait prédire combien de personnes seraient embauchées la semaine suivante. Cela produisait un nouvel ensemble de conditions pour les stocks, l'emploi et la production. Il est devenu évident qu'il y avait là le potentiel d'un système oscillatoire ou instable, entièrement déterminé en interne. Même si les commandes entrantes restaient constantes, l'instabilité de l'emploi pouvait toujours survenir en raison des politiques communes de prise de décision. Ce premier système de contrôle des stocks sur papier et crayon a marqué le début de la dynamique des systèmes"* (Forrester, 1989, p. 5).

En dynamique industrielle, la dynamique des systèmes peut être présentée comme une forme de modélisation par simulation informatique qui utilise les concepts de retour d'information et de variables d'état pour modéliser les systèmes sociaux et explorer le lien entre la structure du système et le comportement évolutif dans le temps (Forrester, 1968a). Pour modéliser le comportement dynamique d'un système, nous devons introduire deux nouvelles publications de Forrester, *Principles of systems* (1968) et *Urban Dynamics* (1969). Dans ces livres, Forrester a proposé une description détaillée de l'approche de la dynamique des systèmes et a reconnu quatre hiérarchies de structure : une frontière fermée autour du système ; des boucles de rétroaction comme éléments structurels de base à l'intérieur de la frontière ; des variables de niveau (état) représentant les accumulations à l'intérieur des boucles de rétroaction ; des variables de taux (flux) représentant l'activité à l'intérieur des boucles de rétroaction.

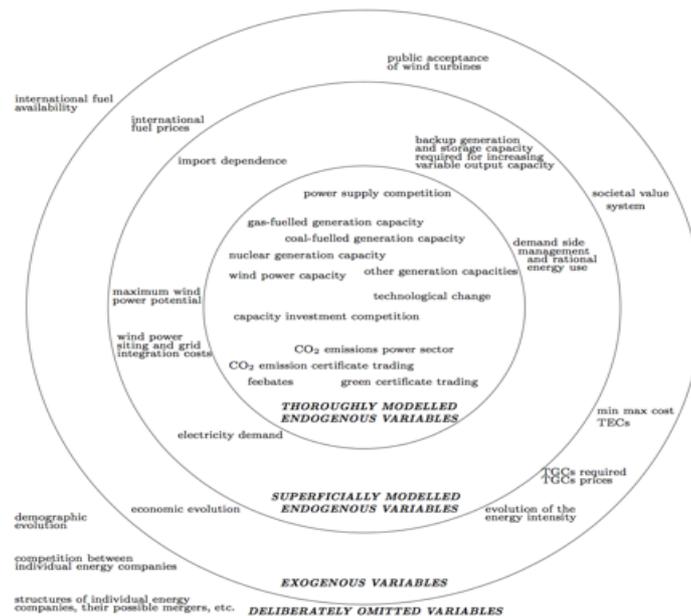
Tableau 2 : Quatre étapes dans la théorie du système structure

A Closed boundary	
1 Feedback loops	
a Levels b Rates	
	(1) Goal
	(2) Observed condition
	(3) Discrepancy
	(4) Desired action

Source : Forrester (1967, p. 2)

Limite fermée du système : Pour appréhender un système, il faut établir la limite à l'intérieur de laquelle se produisent les interactions qui donnent au système son comportement caractéristique. Forrester affirme que "la limite fermée ne signifie pas que le système n'est pas affecté par des événements extérieurs. Mais cela signifie que ces événements extérieurs peuvent être considérés comme des événements aléatoires qui affectent le système et ne lui confèrent pas en soi ses caractéristiques intrinsèques de croissance et de stabilité" (Forrester, 1969, p. 12). La limite étendue d'un système explique ce qu'il faut inclure et ce qu'il faut exclure (variables endogènes et exogènes). La limite intensive définit la profondeur ou le niveau de détail auquel les éléments inclus dans le modèle sont représentés. Le modèle repose principalement sur des variables endogènes explicatives - des drivers qui impulsent la dynamique du système. Ces drivers introduisent des variables endogènes de second rang, de troisième rang..., puis des variables exogènes... Il existe également des variables endogènes qui n'ont pas été prises en compte, et dont il faudra expliquer la non prise en compte (Diemer, 2004).

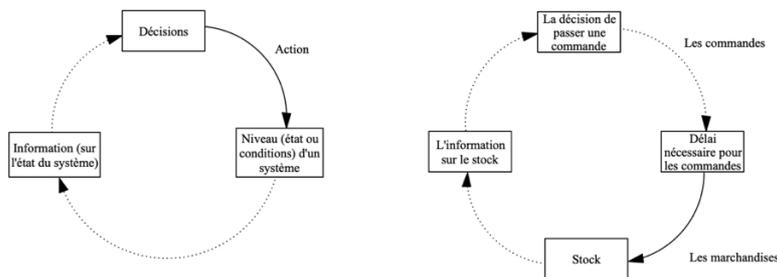
Figure 8 : Les limites d'un système



Source : Pryut (1982)

Structure en boucles de rétroaction : Le comportement dynamique des systèmes est généré au sein de boucles de rétroaction (Roberts, 1975). Une boucle de rétroaction est composée de deux types de variables, appelées variables de taux et de niveau (Diemer, Nedelciu, 2020). Une boucle de rétroaction est une structure dans laquelle un point de décision - l'équation de taux - contrôle un flux ou une action. L'action est intégrée pour générer un niveau de comportement du système. L'information sur le niveau est la base sur laquelle le débit est contrôlé.

Figure 9 : Configuration d'une boucle de rétroaction

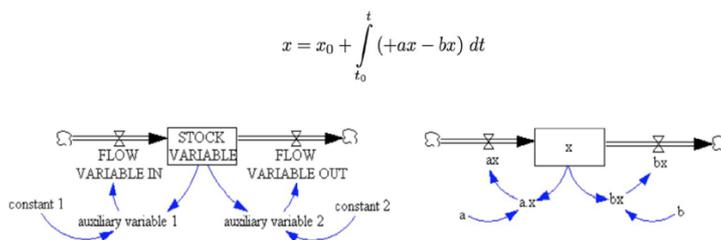


La figure de gauche est la forme la plus simple d'un système de rétroaction, il peut y avoir des retards et des distorsions supplémentaires apparaissant séquentiellement dans la boucle. Il peut y avoir de nombreuses boucles qui sont interconnectées. La figure de droite décrit la structure circulaire de cause à effet de la boucle de rétroaction lorsqu'une entreprise commande des marchandises pour maintenir un stock initial.

Une boucle de rétroaction s'appuie sur une distinction entre les flux et les stocks. Un stock est une accumulation de matière, d'énergies, de personnes ou de choses sur une période donnée. Cette accumulation varie en fonction des flux entrants et des flux sortants. Mathématiquement, il s'agit d'un calcul d'intégrale.

$$\text{Stock}(t) = \int_{t_0}^t [\text{Inflow}(s) - \text{Outflow}(s)] ds + \text{Stock}(t_0)$$

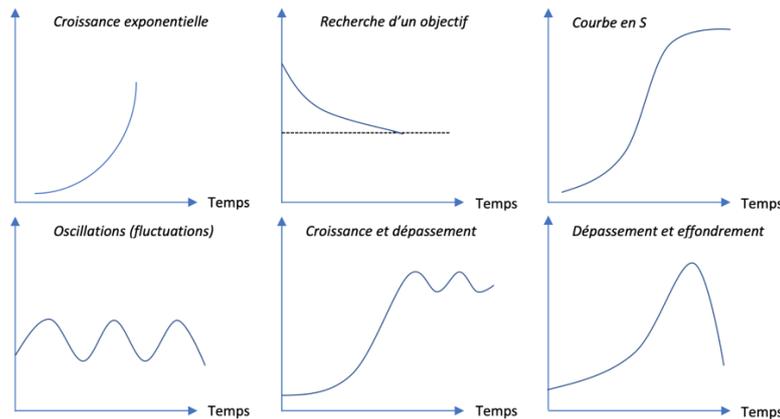
Le flux est le taux de variation d'un stock. Il représente des matières ou des informations qui entrent et sortent d'un stock sur une période donnée. Mathématiquement, les équations de flux incluent des variables, des paramètres et des constantes.



Les représentations générales des variables et de la structure de rétroaction d'un modèle sont transmises à l'aide de diagrammes de boucles causales (CLD). En revanche, les diagrammes stock/flux (SFD) sont plus détaillés et distinguent les variables d'état et de flux.

Dans un modèle de dynamique des systèmes, la polarité de chaque boucle de rétroaction est un élément crucial pour comprendre le comportement du modèle.

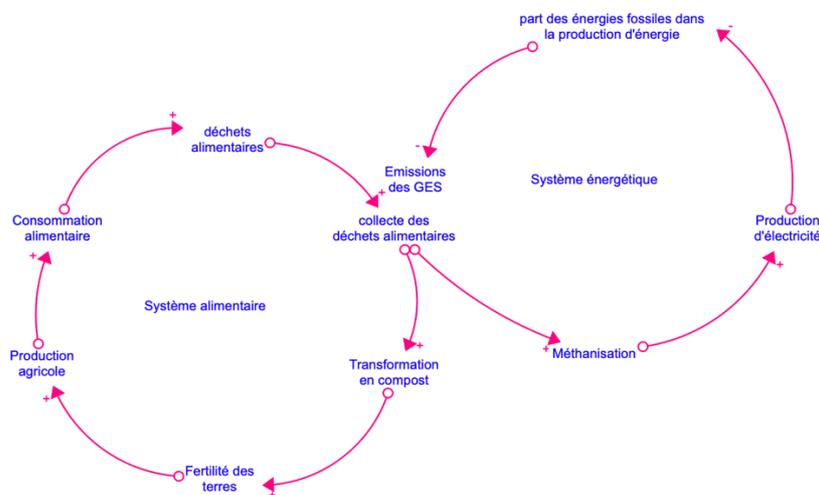
Figure 10 : Différents modèles de comportement



Source : Diemer (2004)

Il existe essentiellement deux types de boucles : les boucles de renforcement et les boucles d'équilibrage. Les boucles de renforcement (R) ont une polarité positive (+) et génèrent une croissance et un effondrement exponentiels, qui se poursuivent à un rythme toujours plus élevé. Les boucles d'équilibrage (B) génèrent une force de résistance (qui peut limiter la croissance). Les boucles d'équilibrage ont une polarité négative (-) et se trouvent dans des situations qui s'autocorrigent et s'autorégulent.

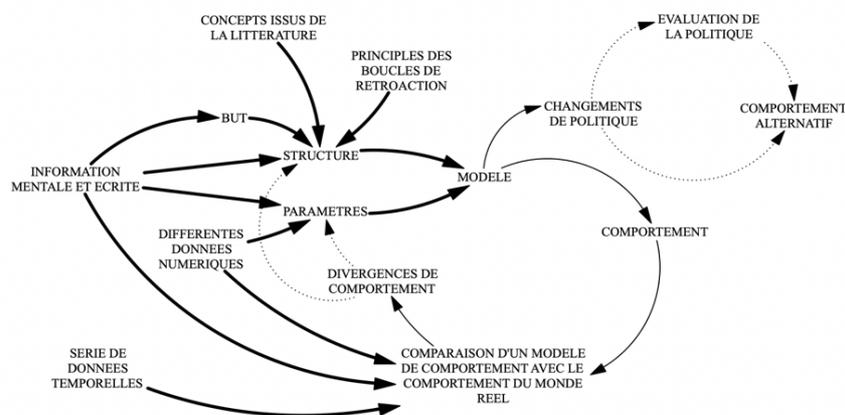
Figure 11 : Exemple de boucles intégrant le système alimentaire et énergétique



Dans la figure 11, la boucle de gauche suggère que la consommation alimentaire génère toujours plus de déchets, leur collecte et leur tri permet une transformation en compost, qui augmente la fertilité des terres et donc la production agricole. Il est alors possible de répondre aux hausses de la consommation alimentaire d'une population (nous avons une boucle de renforcement). La boucle de droite part du principe que les déchets alimentaires vont alimenter un méthaniseur, ce qui permettra de produire de l'électricité, de diminuer la part des énergies fossiles et de réduire les émissions de GES (boucle de régulation).

L'objectif de la modélisation en dynamique des systèmes est d'expliquer un comportement en fournissant une théorie causale (Lane, Sterman, 2011), puis d'utiliser cette théorie comme base pour concevoir des politiques d'intervention dans la structure du système (Sterman, 2007), ce qui permet ensuite de tenter de modifier le comportement ultérieur et d'améliorer les performances (Lane, 2008). Chaque étude de la dynamique d'un système commence par une situation problématique et un ensemble d'hypothèses utilisées pour décrire cette situation problématique (Goodman, 1974). Ces hypothèses sont conservées dans un modèle mental de dynamique des systèmes (MMDS). La figure 12 décrit le processus mental (Arnold, Wade, 2015 ; Senge, 1990) associé à un objectif (but), ce qui revient à définir la structure du modèle (ensemble de variables reliées par des causalités via des boucles de rétroaction) et à identifier des paramètres (on parle de modèle structurel). C'est ce modèle qui va engendrer un type de comportement (pour être plus précis, il conviendrait de souligner que chaque variable d'un modèle suit un type de comportement identifié par la figure 12). Le modèle structurel n'est pas simplifié, la dynamique des systèmes tient compte de toute la complexité des relations entre les variables. Les données et les séries temporelles permettent de comparer le modèle de comportement avec le comportement du monde réel.

Figure 12 : Création d'un modèle de dynamique des systèmes



Source : Diemer (2004)

Précisons que la dynamique des systèmes accorde une place importante :

- **Au rôle de la simulation** : l'interaction de ces relations complexes dépasse presque toujours la capacité de déduction de l'esprit humain - la simulation mentale étant déficiente. La simulation informatique est donc rigoureusement nécessaire pour déduire les conséquences de ces relations et pour révéler le comportement contre-intuitif qui résulte des hypothèses du modèle.

- **Aux méthodes de diagramme** : Deux méthodes de diagramme sont dominantes dans la communauté des chercheurs en dynamique des systèmes (Lane, 2008). Les représentations générales des variables et de la structure de rétroaction d'un modèle sont transmises à l'aide de diagrammes de boucles causales (CLD). En revanche, les diagrammes stock/flux (SFD) sont plus détaillés et distinguent les variables d'état et de flux.

A ce stade de la discussion, il est important de souligner trois quatre importants relatifs à l'utilisation de la dynamique des systèmes :

(i) Si *Industrial Dynamics* (1961) et *Urban Dynamics* (1969) ont présenté la dynamique des systèmes comme un modèle de simulation informatique de la façon dont les ventes ou une ville se développent, stagnent ou se dégradent, c'est parce que l'effort principal de Forrester visait à développer un outil destiné à être utilisé par les gestionnaires et les responsables de la politique urbaine. Mais la dynamique des systèmes est avant tout une méthode "pour traiter les questions relatives aux tendances dynamiques des systèmes complexes, c'est-à-dire les modèles comportementaux qu'ils génèrent au fil du temps" (Meadows, 1976, p. 31). La dynamique des systèmes nous permet "d'apprendre la complexité dynamique, de comprendre les sources de la résistance aux politiques et de concevoir des politiques plus efficaces" (Sterman, 2000, p. 4). En tant que méthode ancrée dans l'interdisciplinarité, la dynamique des systèmes tire ses racines de la théorie de la dynamique non linéaire et du contrôle par rétroaction développée en mathématiques, en physique et en ingénierie (Milsom, 1968, Wolstenholm, Coyle, 1983 ; Wolstenholme, 1985). Parce que nous l'appliquons pour comprendre le comportement des systèmes humains ainsi que des systèmes physiques et techniques, la dynamique des systèmes a été utilisée en sciences sociales et en économie (Morecroft, 1982, 1985). Pour cette dernière, il semblerait que la dynamique des systèmes ait généré un " conflit de paradigme " (Diemer, 2004, 2012), avec une autre méthode, l'économétrie (Tinbergen, 1954), développée par les économistes (Irving Fisher, Ragnar Frisch) dans les années 1930. Comme le suggère Donella Meadows, "un examen plus approfondi des deux paradigmes de modélisation révèle une division plus profonde, qui n'est pas facile à combler" (Meadows, 1976, p. 47). Des mots clés tels que prévisibilité vs imprévisibilité, linéarité vs non-linéarité, quantitatif vs qualitatif, structure ouverte vs structure fermée sont des symboles de l'opposition farouche entre les deux approches.

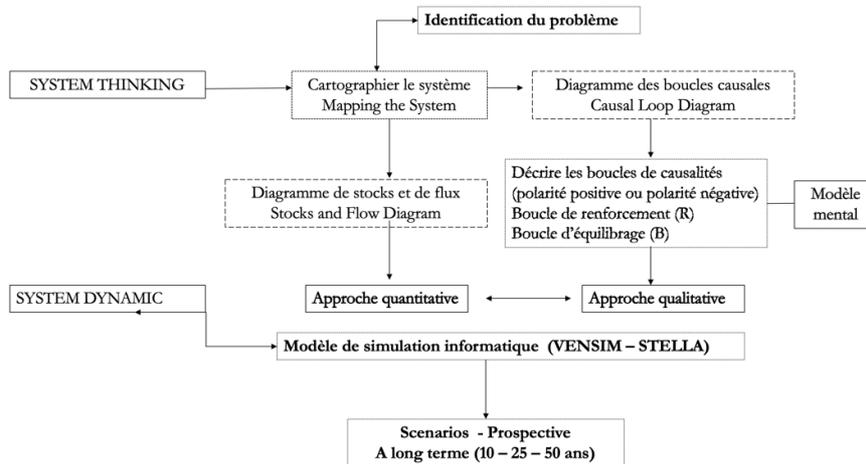
(ii) La dynamique des systèmes se concentre sur les tendances dynamiques générales, "que le système dans son ensemble soit stable ou instable, oscillant, croissant, déclinant ou en équilibre" (Meadows, 1976, p. 31). Ainsi, la dynamique des systèmes en tant que méthode, semble être un moyen très intéressant pour améliorer les fondements théoriques et l'analyse descriptive des ondes longues (ainsi que du cycle économique). Ce point est développé par Forrester (1977) dans son article "Growth Cycles". Considérant que la plupart de la littérature sur les cycles économiques se divise en deux catégories, soit l'analyse statistique des séries chronologiques passées, soit la spéculation descriptive sur la façon dont les différents aspects du système socio-économique interagissent pour produire un comportement cyclique, Forrester affirme que "les modèles de simulation informatique de la dynamique des systèmes peuvent être utilisés pour conserver la force de la méthode descriptive tout en surmontant sa principale faiblesse" (1977, p. 525) et pour proposer une nouvelle base puissante pour tester les théories sur la façon dont la structure et les politiques interagissent pour produire des fluctuations et la croissance dans un système socio-économique.

(iii) Pour explorer les tendances dynamiques des systèmes, il est nécessaire d'inclure dans les modèles des concepts issus de nombreuses disciplines ou domaines de pensée, notamment ceux provenant des sciences physiques et biophysiques, des sciences sociales et de l'économie, et d'actualiser les théories à la lumière de nos connaissances sur la structure des systèmes. Dans *Industrial Dynamics*, J.W Forrester (1961, p. 49) a introduit les modèles comme "une base pour les investigations expérimentales". Les modèles ont été largement acceptés comme moyen d'étudier des phénomènes complexes. Une classification des modèles a utilisé certains mots clés comme abstrait - physique, statique - dynamique, linéaire - non linéaire, instable - stable ou état stable - transitoire.

(iv) La dynamique des systèmes (Forrester, 1961, 1969) - via les diagrammes de boucles causales (CLD) et les diagrammes de flux de stock (SFD) - est l'étude des systèmes de rétroaction dynamiques à l'aide de la simulation informatique (à l'aide des logiciels VENSIM, STELLA ou POWERSIM). Elle s'applique aux problèmes dynamiques survenant dans des systèmes sociaux, de gestion, économiques ou écologiques complexes - littéralement tout système dynamique est caractérisé par l'interdépendance, l'interaction mutuelle, le retour d'information et la causalité circulaire. Les diagrammes de boucles causales nous amènent à considérer la causalité comme un "processus continu", plutôt que comme un événement ponctuel. Le langage de la pensée systémique est donc celui des "liens" et des "boucles". À partir de tout élément d'une situation (variable), il est possible de tracer des flèches (liens) qui représentent l'influence sur un autre élément. Ces liens peuvent révéler des cycles qui se répètent, encore et encore. Les liens n'existent jamais isolément, ils forment toujours un cercle de causalité - une boucle de rétroaction (dite de renforcement ou de régulation) dans laquelle chaque élément est à la fois cause et conséquence. Par ailleurs, ces boucles introduisent souvent des retards. Les retards peuvent avoir des

conséquences importantes dans un système, en précisant souvent l'impact d'autres forces. Les boucles et les retards font partie du diagramme des boucles causales (CLD). Les CLD permettent de visualiser la structure et le comportement d'un système, et d'analyser le système de manière qualitative. Ce point est important car il nous rappelle qu'un modèle est avant tout qualitatif (il doit être basé sur des hypothèses qui doivent être testées, c'est le modèle structurel), puis ensuite quantitatif (ce dernier permettant notamment de faire des simulations selon différents scénarios).

Figure 13 : Systems Thinking, Systems Dynamic, Modèles et Simulation



Source : Diemer (2004)

En outre, les CLD nous permettent d'identifier les points d'intervention dans le système et d'approximer l'efficacité d'une certaine intervention politique sur le système global (Meadows, 1999).

Tableau 3 : Les points leviers de Donella Meadows, où intervenir dans un Système ?

12. Constantes, paramètres, chiffres (tels que subventions, taxes, normes)	6. La structure des flux d'informations (qui a et n'a pas accès à quels types d'informations)
11. Les tailles des stocks stabilisateurs, par rapport à leurs flux.	5. Les règles du système (telles que les incitations, les punitions, les contraintes)
10. la structure des stocks et des flux de matières (tels que les réseaux de transport, les structures d'âge de la population)	4. Le pouvoir d'ajouter, de modifier, de faire évoluer ou d'auto-organiser la structure du système.
9. La durée des retards, par rapport au taux de changement du système.	3. Les objectifs du système
8. La force des boucles de rétroaction négative, par rapport aux impacts qu'elles tentent de corriger.	2. L'état d'esprit ou le paradigme à partir duquel le système - ses objectifs, sa structure, ses règles, ses délais, ses paramètres - émerge.
7. Les gains liés à l'activation des boucles de rétroaction positives	1. Le pouvoir de transcender les paradigmes

Source : Meadows (1999)

Quelques utilisations du modèle iSDG

Le modèle iSDG est une interface de simulation qui met en interconnection les 17 ODD ainsi que leurs indicateurs de développement proposés par les Nations Unies. Utilisant la dynamique des systèmes, il est l'un des modèles qui permet d'analyser les interactions entre les ODD, de mesurer leurs performances et d'implémenter des synergies entre différentes politiques pour atteindre plus rapidement les cibles fixées par les ODD (Pedercini, Arquitt, Collsten Herren, 2019). Le tableau 4 montre les résultats de l'application du modèle iSDG dans quelques pays en voie de développement.

Tableau 4 : Tableau des modèles iSDG dans quelques pays du Sud

Pays utilisateur du modèle iSDG	Thème	ODD ciblés par le modèle iSDG	Types de politiques ou programmes évalués	Nombre de scénarios analysés	Résultats des différents scénarios analysés	Limites de calibrage du modèle pour chaque étude	Recommandations de l'étude
Ouganda (2020)	Dynamics analysis of Sustainable Development Goals : Achieving the SDGs with Uganda's Third National Development Plan	Le modèle iSDG-Ouganda simule l'évolution des 17 ODD pendant la période 1995-2030 et pour une vision 2040 des ODD afin d'identifier des points de leviers pour améliorer leur performance.	Le modèle examine l'impact potentiel de 9 catégories d'interventions du troisième Plan National de Développement (NPD 3 couvrant la période 2020-2025) pour la période 1995-2030. Ces interventions concernent le financement de l'agro-industrialisation, l'industrie, les services, les infrastructures, l'eau et l'assainissement, la santé et l'éducation, l'environnement et la gouvernance.	Trois scénarios analysés : - un scénario Business As Usual (BAU) qui suppose que le niveau actuel (niveau d'investissement de 2019) d'investissement restera inchangé et qu'il n'y a pas de changement de politique après 2020 (pas de NPD 3). - Un scénario modéré avec un investissement additionnel moyen qui est égal à la moitié du budget prévu pour la période 2020/21-2024/25 dans le NPD 3 est maintenu après 2024/2025. - Un scénario optimiste où après 2024/25 le niveau moyen de l'investissement supplémentaire prévu dans le NPD 3 de la période 2020/21-2024/25 continue sur la base du pourcentage du PIB.	Sous le scénario de BAU le niveau de réalisation de l'ensemble des ODD est en moyenne 32% en 2030 comparé à leur niveau de réalisation en 2020 qui est 25,1%, celui du scénario modéré est de 35,2% et le niveau atteint dans le scénario optimiste est de 35,9% en 2030. Les ODD 10, 12, 15 et 17 ont des niveaux de réalisation appréciables (supérieurs à 50%) dans tous les scénarios contrairement aux ODD 2, 5, 11 et 14 qui ont les niveaux de réalisations les plus faibles. La performance de chaque scénario est respectivement environ 7%, 10,1% et 10,8%. Ces performances sont portées en particulier par l'ODD 9 à travers les investissements sur les routes, rails et infrastructures qui ont des effets de boule de neige sur les autres ODD et l'ODD 6 avec l'amélioration des conditions d'accès à l'eau et à l'assainissement. Par contre le SDG 12 engendre une contre-performance (très faible) avec l'augmentation de la consommation des ressources naturelles qui a des effets négatifs sur les performances des autres ODD par manque d'interventions environnementales prévues dans le NPD 3.	Le modèle iSDG comprend plusieurs secteurs et plusieurs indicateurs donc avoir des données dans tous les secteurs n'est pas évident. Dans ce rapport, le manque de données dans certains secteurs a amené le comité technique à élaborer des hypothèses pour combler le manque de données. En plus, d'autres données existantes ne représentent pas la réalité ou ne sont pas consistantes donc un réajustement a été fait à travers les hypothèses.	Pour tester la validité des résultats, l'équipe technique a suggéré de comparer les données historiques et celles simulées par le modèle de 2019-2030. Et cette comparaison a permis de valider les résultats de l'analyse qui semblent représenter la réalité. Enfin, la faible performance des ODD a conduit les auteurs à proposer des points de leviers importants tels que l'amélioration des indicateurs de gouvernance, les investissements environnementaux et dans l'industrie. Et surtout l'implémentation collective de ces interventions qui ont des effets synergiques bénéfiques pour l'ensemble des ODD.

<p>Sénégal (2017)</p>	<p>Le Sénégal à l'horizon 2030 : Analyse de scénarios de progrès vers les ODD pour la période 1990-2030</p>	<p>Le modèle T21-iSDG-Sénégal analyse les performances des 17 ODD pour atteindre les objectifs ciblés de l'Agenda 2030 des Nations Unies adopté en 2015</p>	<p>Le modèle évalue le Plan Sénégal Emergent (PSE) qui est le cadre de référence pour le développement économique et social du Sénégal pour la période 2015-2030. Les majeures interventions sont entre autres l'investissement pour l'adaptation au changement climatique, l'augmentation de la pression fiscale pour le financement des ODD accompagnée de la mise en place d'un système de taxation favorable aux plus pauvres, ensuite, la combinaison de politiques agricoles, d'élevage, de pêche et d'aquaculture et d'agroalimentaire et enfin, l'amélioration de la bonne gouvernance.</p>	<p>Trois scénarios : - Un scénario de BAU qui retrace le rythme d'évolution de l'ensemble des secteurs socio-économiques dont les politiques de développement actuelles restent inchangées après 2015 - Un scénario moyen axé sur la recherche d'une croissance éffrénée sans tenir compte du tissu social et de l'environnement. Ce scénario ne recherche qu'une croissance économique au détriment de la solidarité inter et intra-générationnelle. - scénario optimiste qui est la recherche de l'émergence dans tous les secteurs de développement, il se veut « <i>un Sénégal émergent en 2035 avec une société solidaire dans un Etat de droit</i> » avec le Plan Sénégal Emergent (PSE).</p>	<p>Le niveau d'atteinte de tous les ODD est de 29% en 2030 porté par les ODD 3, 6, 12 et 14 sous le scénario de BAU. Cette faible performance est due à une croissance économique faible (4,7%) et peu inclusive, des niveaux d'investissement très faibles et une gestion non durable des stocks des ressources naturelles. Sous le scénario moyen, la performance de tous les ODD est de 41,6% portée par les ODD 3,6,12, 14 et 17 qui ont des niveaux de réalisation dépassant le seuil de 50%. Ce niveau de 41,6% a été possible grâce au taux de croissance économique annuel moyen de 5% et l'allocation de plus de ressources pour la construction des infrastructures et l'amélioration des secteurs sociaux de base. Sous le scénario optimiste le niveau de réalisation des ODD est de 61,3% avec une croissance économique estimée à 7,3% sur la période 2015-2030. Le scénario optimiste montre un progrès vers un développement durable sur les plans économique, social et environnemental à l'horizon de 2030 même si d'autres politiques restent à mettre en place. La performance de ce scénario est influencée par l'augmentation des investissements publics, l'implication de la diaspora dans le développement à travers les investissements directs étrangers et l'amélioration de la bonne gouvernance. D'où les performances élevées des ODD 2, 6, 8, 13, 15, 16 et 17.</p>	<p>Problèmes de fiabilité des données utilisées et l'influence de facteurs exogènes qui sont hors du pays que le modèle ne peut pas prendre en compte dans la simulation.</p>	<p>Test du comportement du modèle : effectuer une comparaison des résultats du modèle avec les données historiques de 1990-2015. Pour atteindre l'Agenda 2030, l'étude recommande la prise en compte de toutes les dimensions du développement durable notamment l'économie, le social et l'environnement.</p>
<p>Côte-d'Ivoire (2016)</p>	<p>Toward achieving Sustainable Development Goals in Ivory Coast : Simulating pathways to sustainable development</p>	<p>Le modèle T21-iSDG-Côte-d'Ivoire intègre des politiques économiques, sociales et environ</p>	<p>Le modèle évalue l'impact de l'implémentation du programme national d'Etude Perspective (NPS) sur les performances des 17 ODD pour la période 1990- 2030 et une</p>	<p>Trois scénarios sont simulés : - un scénario BAU qui simule les performances des 17 ODD d'ici 2030 avec les politiques actuelles sans la mise en place du NPS - un scénario de NPS qui évalue les impacts des</p>	<p>Le niveau de réalisation de tous les ODD sous le scénario de BAU est estimé à 21% sur une cible de réalisation de 100% en 2030. Cette performance assez faible est due à une population pauvre qui vit dans la famine avec un faible accès aux infrastructures de santé et un niveau d'éducation faible. Cependant, le niveau d'atteinte des ODD est</p>	<p>Le modèle est basé sur des simulations et non sur des prédictions précises et est fait sur des indicateurs agrégés des différents secteurs et ne tient pas</p>	<p>La réplication du comportement historique dans les secteurs principaux de 1990-2015 a permis de valider les résultats du modèle. En termes de recommandation de politiques, l'analyse suggère l'augmentation des financements</p>

		<p>nement ale pour l'atteint e des 17 ODD d'ici 2030.</p>	<p>perspective 2040.</p>	<p>politiques incluses dans le NPS avec un financement de 4,5% du PIB - un scénario d'ODD qui évalue les effets des politiques incluses dans le NPS et des politiques additionnelles recommandées par l'Agenda 2030 des NU avec un financement de 15% du PIB.</p>	<p>de 50% sous le NPS scénario due à une réduction de la pauvreté, des inégalités et de la famine, les investissements dans le domaine de la santé et de l'adaptation au changement climatique. Et sous le SDG scénario, le niveau de réalisation des ODD est de 67%. Cette performance est beaucoup influencée par la cohérence entre les ODD 1 à 5 et les ODD 11, 13 et 17 due à la combinaison de plusieurs politiques synergiques telles que l'augmentation des dépenses de santé, l'adaptation au changement climatique, la réduction de la pauvreté et des inégalités et la gestion des déchets. Cette combinaison de politiques mixtes permet aux populations de sortir de la trappe à pauvreté à travers l'accumulation de capital humain et financier qui est un facteur important pour la croissance économique.</p>	<p>compte des indicateurs locaux. En plus, le manque de données pour plusieurs indicateurs fait que le modèle ne prend en compte que 78 indicateurs des ODD au lieu de 230 indicateurs proposés par l'Agenda 2030 des NU. Enfin certaines valeurs cibles utilisées des ODD ne respectent pas celles établies par les Nations Unies donc ces valeurs cibles sont discutables au niveau national.</p>	<p>pour la formation de la population adulte, une croissance économique durable au profit des groupes de population à revenu faible, une utilisation efficace des ressources naturelles et aquatique, l'amélioration de la bonne gouvernance, une promotion de la mobilité durable et des énergies renouvelables et une promotion d'une paix durable car la Côte d'Ivoire a connu beaucoup de crises politiques dans son histoire.</p>
<p>Nigeria (2019)</p>	<p>Achieving the SDGs in Nigeria : pathways and policy options Report of Simulation- based Scenario Analysis of SDGs Attainment using the Integrated Sustainable Development Goals model for Nigeria</p>	<p>La simulati on du modèle iSDG- Nigeria porte sur l'ensem ble des 17 ODD en prenant en compte dans le modèle cinq problè mes majeurs du Nigeria qui sont les conflits, l'exploit ation du pétrole et le gaz, l'exploit ation des minérau x</p>	<p>Plan de relance et de croissance économique (ERGP) pour la période 2017-2020. Il y a au moins une intervention dans chaque ODD qui sont entre autres des interventions de lutte contre la pauvreté et l'insécurité alimentaire, l'amélioration de la qualité de l'éducation, le développement de l'industrie, l'adaptation au changement climatique et la protection des ressources naturelles, les infrastructures et les services sociaux de base, la gouvernance et la mobilisation des ressources.</p>	<p>Trois scénarios d'analyse ont été faits : - scénario de non ERGP qui suppose un non changement des politiques après 2015 avec une continuation des politiques pré- ERGP - Scénario optimiste ERGP qui estime l'impact potentiel des politiques incluses dans le programme ERGP pour l'atteinte de l'Agenda 2030 en maximisant sur l'amélioration de la gouvernance - un scénario de ERGP+ODD qui intègre des politiques synergiques qui peuvent améliorer les performances des ODD dans les secteurs où</p>	<p>La simulation montre que sans le programme ERGP seulement 2/64 des indicateurs seront atteints d'ici 2030, seul l'ODD 12 a un niveau de réalisation supérieur à 50% et 12/17 ODD ont des niveaux d'atteinte inférieurs à 30% dans le scénario de non ERGP en 2030. Dans le scénario optimiste avec la mise en place du programme ERGP 16/64 indicateurs seront atteints, seulement 9/17 ODD ont des performances supérieures à 50% et uniquement 4/17 ODD ont des niveaux de performances inférieures à 30% et l'ODD 2 est presque atteint en 2030. Enfin, sous le scénario d'optimisation de politiques d'ODD du programme ERGP, 25/69 indicateurs sont presque atteints, 3/17 ODD sont presque atteints et seulement 3/17 ODD ont des performances moins de 50% en 2030. Ce scénario laisse voir une perspective d'atteinte des</p>	<p>Le grand défi de l'étude a été les problèmes de disponibilit é et de qualité des données dans plusieurs domaines surtout dans les régions de conflits. Ce qui fait que le modèle est constitué seulement de 64 indicateurs d'ODD liés au manque de données.</p>	<p>Plus d'investissements dans la mobilisation des données au niveau national et local par le Bureau d'Etat de la statistique et ses partenaires pour la prise en compte de nombreux secteurs pour des simulations futures.</p>

		solides, les problèmes du secteur de l'électricité et la désagrégation sous-locale.		les politiques du scénario optimistes sont inefficaces et insuffisantes. Ce scénario optimise les politiques de dépense, de taxation et d'autres politiques additionnelles.	ODD d'ici 2030 si de nouvelles politiques efficaces et cohérentes sont mises en place et que tous les gouvernements infranationaux s'impliquent à l'exécution de ces politiques et programmes de développement.		
Malawi (2020)	Industry note : seeing through the SDG maze – the iSDG model, a simulation-based tool to aid SDG planners	Le modèle iSDG-Malawi est appliqué dans ce rapport à l'ODD 2 à travers la lutte contre l'insécurité alimentaire et la sous-nutrition.	La politique évaluée dans ce rapport concerne les effets d'un investissement d'une utilisation efficace de l'eau par l'irrigation à travers la conversion des irrigations existantes à des technologies économes en eau et l'expansion d'une irrigation efficace aux terres non irriguées auparavant pour promouvoir l'ODD 2. Cette ambition est financée à travers une augmentation des investissements annuels à 1% du PIB dans le secteur de l'irrigation.	Deux scénarios ont été simulés dans ce rapport : - un scénario de BAU qui suppose la non mise en place d'une nouvelle politique d'irrigation après 2016 - un scénario alternatif avec la mise en place de la politique d'irrigation économe en ressources en eau pendant la période 2017-2030.	Sous le scénario de BAU la production céréalière est passée de 4 millions de tonnes à environ 4,75 millions de tonnes en 2030 alors que celle du scénario alternatif a atteint environ 5 millions de tonnes grâce à l'irrigation, l'intensification des terres et l'exploitation de nouvelles surfaces. Sous le scénario alternatif, l'augmentation de la production céréalière a eu une incidence positive sur la croissance du PIB et sur le PIB et une augmentation de la production céréalière par tête qui est passée de 0,1 tonne par personne à 0,4 tonne par personne en 2030. Par contre, l'augmentation de la population contraint les avantages de cette politique avec une faible réduction de la pauvreté et de la sous-nutrition durant la période 2017-2030. Ensuite, l'intensification des terres augmente la prise de nutriments qui vont appauvrir les terres et l'augmentation de l'utilisation de l'eau par l'irrigation détruit l'indice de vulnérabilité de l'eau durant cette période.		Il y a une cohérence entre l'ODD 2 et les ODD 1 et 6 donc la mise en place d'une irrigation efficace a entraîné une expansion des terres irriguées qui a permis d'augmenter la production agricole (ODD 2) et une légère réduction des personnes vivant sous le seuil de la pauvreté (ODD 1). Ensuite, cette politique d'irrigation a contribué à la dégradation de l'indice de vulnérabilité de l'eau suite à l'augmentation de la consommation d'eau par l'agriculture (ODD 6). Donc l'auteur du papier recommande au gouvernement du Malawi de trouver des politiques cohérentes capables de minimiser les effets négatifs de cette politique sur les autres ODD.

Source : Les auteurs

Il s'agit d'étudier le niveau qu'atteindra chaque ODD d'ici 2030 et de mesurer la performance globale de l'ensemble des ODD (Pedercini, Arquitt, Chan, 2020). Le modèle ISDG a été appliqué dans plus de 40 pays du monde et a produit des résultats intéressants sur lesquels les décideurs publics se sont basés pour prendre des décisions de long terme. Le développement du modèle iSDG est l'œuvre du Millennium (MI), il fournit aux décideurs publiques un support de planification en matière de soutenabilité et d'évaluation des politiques pour atteindre l'Agenda 2030 des Nations-Unies (Pedercini, Zuellich, Dianati, Arquitt, 2018). Ainsi, il permet d'élaborer un

ensemble de stratégies politiques relatives aux ODD, d'évaluer leur pertinence en matière de contribution au développement à chaque étape de leur mise en œuvre. Un autre aspect important du modèle dans le processus de planification est qu'il permet d'estimer le budget de mise en œuvre des politiques et surtout l'allocation du budget national entre différents secteurs.

De nos jours, l'utilisation du modèle iSDG est particulièrement approprié au niveau national car sa structure et son calibrage reposent sur des données nationales susceptibles de produire des simulations. L'amélioration du modèle passe cependant par trois grands défis : (i) l'amélioration de la robustesse des équations qu'il utilise, l'application du modèle au niveau local (notamment celui des villes) pour les études au niveau décentralisé. Enfin, l'utilisation du modèle à l'échelle régionale de plusieurs pays du moment que le développement est aussi une interaction entre les pays à travers l'élaboration des politiques communes, la construction d'infrastructures communes et la mutualisation des investissements.

Les principaux résultats contenus dans le tableau 4 montrent que le modèle permet d'évaluer les effets de plusieurs scénarios (politiques) relatifs aux ODD, d'estimer le budget pour chaque scénario et de guider les décideurs politiques vers des objectifs tangibles et atteignables. Le scénario Business As Usual (BAU) est un scénario de référence permettant de comparer les impacts des politiques adoptées en matière de performances des indicateurs et d'ODD. Les scénarios alternatifs (simulés via des politiques supplémentaires ou additionnelles) sont comparés au scénario de référence. La différence entre les niveaux atteints des ODD dans les autres scénarios par rapport à leurs niveaux dans le scénario de référence (à l'horizon 2030) constitue une sorte d'indicateur de performance de chaque ODD suite aux nouvelles politiques prises.

Outre son applicabilité à l'échelle de tous les 17 ODD, le modèle iSDG peut être utilisé pour élaborer des politiques dédiées à un seul ODD tels que la sécurité alimentaire, l'accès à l'eau, l'éducation, la santé, etc. La Côte d'Ivoire l'a utilisé en 2020 pour étudier la pertinence des investissements dans l'ODD 4 pour atteindre une situation économique et sociale prospère d'ici 2040 en se focalisant sur le développement de la petite enfance du plan "Étude Nationale Prospective Côte d'Ivoire 2040 (ENP)" basé sur l'Agenda 2030 des NU. L'ODD 4 a pour but d'assurer un accès à une éducation de qualité pour tous sans distinction de genre et de promouvoir l'apprentissage tout au long de la vie. En effet, il est au cœur de tous les ODD car il est connecté et influence positivement à l'amélioration de la performance de plusieurs ODD. Une population bien éduquée possède une forte capacité de production avec l'acquisition de bonnes aptitudes individuelles et collectives gages d'un développement économique et du bien-être social. En effet, investir dans le développement de la petite enfance constitue un levier pour développer le capital humain des enfants notamment leurs facteurs physiques, cognitifs, linguistiques et socio-émotionnels (Naudeau et al., 2012).

Tableau 5 : L'investissement dans le secteur de l'éducation en Côte d'Ivoire

<p>Côte D'Ivoire (2020)</p>	<p>Investir dans le développement de la petite enfance et l'éducation pour le développement socio-économique de la Côte-d'Ivoire : une analyse basée sur le modèle iSDG</p>	<p>Le modèle simule la réalisation des 17 ODD de l'Agenda 2030 en mettant l'accent sur l'amélioration des indicateurs de santé, d'éducation et économiques de L'Étude National Prospective (ENP) adoptée en 2015 pour une Côte d'Ivoire industrialisée à l'horizon 2040</p>	<p>Trois politiques sont évaluées dans ce rapport :</p> <ul style="list-style-type: none"> - les transferts d'argent conditionnels et la création des infrastructures d'éducation pour les enfants de moins de 5 ans - le développement des programmes de santé maternelle et infantile - le déploiement de diverses politiques d'éducation de qualité à travers la formation des enseignants et la réduction du ratio élèves/enseignants. 	<p>Trois scénarios sont simulés :</p> <ul style="list-style-type: none"> - un scénario de BAU, sous lequel les dépenses budgétaires d'aujourd'hui demeurent inchangées après 2019 - un scénario modéré sous lequel les investissements de ces trois regroupements d'interventions sont effectués comme prévu dans le ENP - un scénario fort dans lequel ces investissements sont doublés après 2019 	<p>Les résultats montrent qu'en général, les programmes de santé maternelle et infantile ont un impact plus important sur les indicateurs de santé et sur les autres ODD, les transferts d'argent pour l'enrôlement des enfants au préscolaire améliorent leur réussite à l'école primaire et secondaire, augmentent le nombre d'années de scolarisation mais impactent faiblement les indicateurs de nutrition à cause de sa couverture territoriale faible et son coût élevé.</p> <p>Les interventions d'éducation de qualité réduisent le taux d'abandon scolaire ce qui augmente le nombre d'années de scolarisation qui sans doute aura des effets économiques à long terme et la réduction des inégalités. En termes de performances des ODD sous le scénario de BAU, seul l'ODD 13 est atteint à l'horizon 2030 et 2040 par contre l'ODD 2 qui est important dans l'étude car concernant les indicateurs de nutrition a un niveau de réalisation en dessous de 1%. Les ODD 1, 3 et 4 enregistrent une amélioration en 2030 et 2040 mais leur niveau de réalisation est en dessous de 50%.</p> <p>Dans le scénario modéré le coût des interventions est estimé à 0,89% du PIB ivoirien soit 197,8 millions de Fcfa durant la période 2020-2040 lorsque les trois politiques sont combinées. Seul l'ODD 13 reste toujours atteint. Les ODD 3, 4 et 5 ont connu une amélioration importante à l'horizon de 2030 et 2040 par contre, l'ODD 2 qui était quasiment nul a connu une légère amélioration au-dessus de 1% en 2040. La combinaison des trois interventions ne constitue pas une force pour booster les performances des ODD car la synergie d'entre elles est de -0,011%.</p> <p>Dans le scénario fort les investissements constituent 1,78% du PIB</p>	<p>Des données manquantes ont été enregistrées pour l'année 2020 pour certains indicateurs l'année à laquelle l'étude a été réalisée et aussi l'absence totale de données pour certains indicateurs de 1990-2020 comme par exemple la proportion de la population âgée de 20 à 24 ans qui a terminé le secondaire. Dans ce cas, certains résultats du modèle sont discutables.</p>	<p>En termes de recommandations politiques, la faiblesse des performances des indicateurs de nutrition qui sont beaucoup plus liés aux productions agricoles et aux revenus des ménages, montrent que le gouvernement doit beaucoup investir dans les programmes de production agricoles comme la formation pour une agriculture durable qui est à la fois bénéfique pour les populations en revenu et aussi pour une alimentation saine. Ensuite, les auteurs du rapport encouragent le gouvernement à investir suffisamment dans la santé, le préscolaire et l'éducation et la réduction des inégalités entre sexe qui sont des domaines importants pour le développement des enfants, du capital humain des jeunes et des avantages économiques futurs. Enfin, d'autres indicateurs tels que la gouvernance, l'indice de capital humain et la répartition des richesses qui ne sont pas prioritaires dans l'étude mais qui sont importants pour améliorer les performances des ODD sont à prioriser dans les dépenses publiques.</p>
-----------------------------	---	---	---	--	--	--	---

					<p>durant la période 2020-2040 soit 449,1 millions de Fcfa lorsqu'on combine les trois interventions. Dans ce cas, presque tous les ODD ont connu une amélioration de leur performance sauf l'ODD 13 qui avait déjà atteint sa valeur cible avant 2030 et 2040. Les ODD 1, 2, 3 et 4 qui sont des ODD cibles de l'étude ont enregistré une amélioration grâce à la combinaison des trois interventions dont leur synergie est positive (0,002%).</p>		
--	--	--	--	--	--	--	--

Source : Les auteurs

L'utilisation du modèle iSDG dans ce projet est d'analyser les synergies intersectorielles qui peuvent émerger de l'interaction entre les ODD pouvant améliorer le développement de la petite enfance, accélérer les performances des ODD et de maximiser l'efficacité des investissements. Et les trois formes de politiques simulées dans ce projet sont censées influencer potentiellement l'ODD 2 à travers la réduction de la malnutrition, de la sous-alimentation et les retards de croissance. L'ODD 3 avec la réduction de la mortalité maternelle et celle des enfants à la naissance et la mortalité néonatale. Enfin, l'ODD 4 à travers une éducation inclusive, la réduction du taux d'abandon scolaire à tous les niveaux du système éducatif, l'amélioration des résultats scolaires des enfants. Le tableau ci-dessous résume les résultats de l'étude sur lesquels deux recommandations importantes ont été adressées au gouvernement Ivoirien qui est la maximisation des investissements dans le secteur agricole qui emploie la majorité de la main d'œuvre de la Côte-d'Ivoire. Et l'investissement soutenu dans le secteur de l'éducation qui contribue à la réduction des inégalités, la pauvreté, et l'amélioration de la santé et du bien-être des populations en général.

Conclusion

Depuis le début des années 70, les modèles de simulation se présentent aux différents gouvernements comme des outils de planification du développement à long terme. Le modèle World 3 (*Limits to Growth*, 1972) est considéré comme l'ancêtre des modèles d'intégration assignée (Integrated Assessment Models). Il a également initié, via une nouvelle méthodologie - la dynamique des systèmes - un certain engouement pour les modèles nationaux. Le modèle T21 puis le modèle iSDG du Millennium Institute se sont attachés à définir les différentes trajectoires de développement durable d'un pays en cherchant à dépasser l'objectif de croissance économique illimitée (dont le PIB est la cible principale). En effet, depuis 2015, la réalisation des Objectifs du Développement Durable nécessite des stratégies différentes selon les pays et les décideurs politiques ont besoin de comprendre les interconnexions entre les 17 ODD

afin de cibler au mieux les stratégies de développement qu'il convient de mettre en place. Le modèle iSDG simule les tendances fondamentales des ODD jusqu'en 2030 dans le cadre d'un scénario « Statu Quo », puis propose des scénarios alternatifs susceptibles d'engager les différents gouvernements sur la voie d'une durabilité forte. Il est dès lors plus facile d'identifier les points leviers (points d'intervention) qui peuvent conduire à un changement rapide et positif. D'une certaine manière, le modèle iSDG réactualise le principe d'optimisation de la dépense publique en élargissant le domaine de l'intervention publique, non pas au seul domaine économique, mais également aux domaines environnementaux et sociaux.

Références

- ARNOLD R.D, WADE J.P (2015). A Definition of Systems Thinking : A Systems Approach. *Procedia Computer Science*, 44, 669 - 678.
- BARNEY G.O, WILKINS S. (1986), *Managing a Nation : The Software Sourcebook*. Arlington. Global Studies Center.
- 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.
- BASSI A. (2011). *System Dynamics Modeling for Policy Analysis*. Threshold 21. ICTP Trieste, May 20th, 52 p.
- BASSI A.M., SHILLING J.D (2009). Informing the US Energy Policy Debate with Threshold 21. *Technological Forecasting & Social Change*, vol 77, 396 – 410.
- BASSI A.M (2009). *Analysing the role of integrated, dynamic, national development planning models to support policy formulation and evaluation*. 3rd OECD World Forum on Statistics, Knowledge and Policy. Busan. Korea, october 27th – 30th.
- BASSI A.M (2006). *Modeling U.S. Energy With Threshold 21 (T21)*. February. 28 p.
- BASSI A., PEDERCINI M. (2007). *An Overview of Threshold 21 (21) Framework*. Millennium Institute, Lusaka, October, 56 p.
- CEDEAO (2010). *Approfondissement du processus d'intégration régionale*. Rapport intérimaire 2010 de la Commission de la CEDEAO. Abuja, Mai, 61 p.
- CIMREN E., BASSI A., FIKSEL J. (2010). T21-Ohio, A System Dynamics Approach to Policy Assessment For Sustainability Development : A Waste to Profit Case Study. *Sustainability*, vol 2, 2814 – 2832.
- COLLSTE D., PEDERCINI M., CORNELL S. (2017). Policy Coherence to Achieve the SDGs : Using Integrated Simulation Models to Assess Effective Policies. *Sustainability Science*. Vol 12, 921 – 931.
- COLLSTE D. (2016). Overview of the Millennium Institute's Threshold 21 iSDG Model and Method. Stockholm Resilience Centre. 26 p.
- EDI S.J, LAFFITEAU E. (2017). Les modèles macroéconomiques en usage dans les systèmes statistiques des pays membres d'Afristat : un état des lieux. *Stateco*, n°11, 31 – 42.

- FORRESTER J.J, 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, 51 - 68.
- DIEMER A., NEDELICIU E. (2020). *System Dynamics for Sustainable Urban Planning*. In: Leal Filho W., Azul A., Brandli L., Özuyar P., Wall T. (eds) *Sustainable Cities and Communities*. *Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Springer, Cham
- DIEMER A., GLADKHIK G., SPITLLER N., COLLSTE D., NDIAYE A., DIERICKX F. (2019), *Integrated Assessment Models and Other Climate Policy Tools*. Editions Oeconomia.
- DIEMER A. (2018). "Business Cycle to 2008's Crisis : How system Dynamics can help the economists to understand financial crisis", in Alcouffe A., Poettinger M., Schefold B. (eds), *Business Cycles in Economic Thought, A history*, Routledge.
- DIEMER A. (2012). *Le développement durable vu par les économistes*. Editions Oeconomia.
- DIEMER A. (2005), « Le Développement Durable vu par les économistes », Journées « Culture, Economie et Développement durable », IUFM Auvergne, 20-21 octobre, 13 p.
- DIEMER A. (2004). *Le développement durable et la dynamique des systèmes*. HERMES. Document de travail n°2004/05. Université de Reims, mai, 20 p.
- DORNBUSCH R., FISCHER S. (1978). *Macroeconomics, 6th edition*. 1994. McGrawHill.
- FORRESTER J.W (2007), "System Dynamics – a personal view of the first fifty years", *System Dynamics Review*, vol 23, n°2/3, p. 345 – 357.
- FORRESTER J.W (1995), *The beginning of system dynamics*, *Mc Kinsey Quarterly*, November, 14 p.
- FORRESTER J.W (1991), *System Dynamics and the lessons of 35 years*, Sloan School of Management, MIT, April 29th, 35 p.
- FORRESTER J.W (1987), "Nonlinearity in High Order Models of Social Systems", *European Journal of Operational Research*, vol 30, p. 104 – 109.
- FORRESTER J.W (1981), "Innovation and Economic Change", *Futures*, vol 13, p. 323 – 331.
- FORRESTER J.W (1980), "Information Sources for Modeling the National Economy", *Journal of the American Statistical Association*, vol 75, n°371, p. 555 – 566.
- FORRESTER J. (1979), *An Alternative Approach to Economic Policy: Macro behavior from Microstructure*, in Kamrany N., Ray R. (eds), *Economic Issues of the Eighties*, Baltimore, John Hopkins University Press.
- FORRESTER J.W (1977), "Growth Cycles", *De Economist*, vol 125, p. 525 – 543.
- 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 (1976), "Business Structure, Economic Cycles and National Policy", *Futures*, vol 8, p. 195 – 214.
- FORRESTER J.W (1975), "A National Model for understanding social and economic change", *Simulation Today*, vol 33, 129 – 133.

- FORRESTER J. W (1975), *Collected papers of Jay W. Forrester*, Waltham, MA: Pegasus Communications. 284 p.
- FORRESTER W. (1972), *World Dynamics*, Waltham, MA: Pegasus. 144 p.
- FORRESTER J.W (1971), "Counterintuitive Behavior of Social Systems", *Technology Review*, vol 73, n°3, January.
- FORRESTER J.W (1969), *Urban Dynamics*, Waltham, MA: Pegasus Communications. 285 p.
- FORRESTER J.W (1968a), *Principles of Systems*, Waltham, MA: Pegasus Communications. 391 p.
- FORRESTER J.W (1968b), "Industrial Dynamics - After the First Decade," *Management Science*, March.
- FORRESTER J.W (1967), "Market Growth as Influenced by Capital Investment", 9th Annual Paul O. Converse Awards Symposium, University of Illinois, April 13th, 23 p.
- FORRESTER J.W (1961), *Industrial Dynamics*, Waltham, MA: Pegasus Communications.
- GARRETT M.J (1990), National 21st Century Studies, *Futures*, May.
- GOODMAN M. (1997). Systems Thinking : What, Why, When, Where and How ? *Systems Thinkers*, vol 8, n°2, march, 6-7.
- HERREN H.R (2013). T21 Millennium Institute. *Technical Workshop on Tool and Measures to inform including Green Economy Policies UNEP, UNDP, UNDESA, UNCSD*. Nairobi, Kenya, 2-4 july. 15 p.
- KHUSHIK F., DIEMER A. (2020). Education and Sustainability, How SDG4 contributes to change the representations of developing issues ? The case study of Pakistan. *International Journal of Management and Sustainability*, vol 9, n°2, 101 - 119.
- LANE D.C, STERMAN J.D (2011), Jay Wright Forrester, chapter 20, in Gass S., Assad A. (eds), *Profiles in Operations Research: Pioneers and Innovators*, New York, Springer, 363 - 386.
- LANE D.C (2008). The Emergence and Use of Diagramming in System Dynamics: A Critical Account. *Systems Research and Behavioral Science*, 25, 2 - 23.
- LEIPZIGER D., FAY M., WODON Q. and YEPES T., (2003). "Achieving the Millennium Development Goals : The Role of Infrastructure." The World Bank Policy Research Working Paper 3163, November.
- LE PHARE (2017). Les Objectifs du Développement Durable (ODD) : quel agenda pour le Sénégal ? Conférence nationale. *Bulletin trimestriel*, n°2, janvier.
- 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.H (1999). *Leverage Points: Places to Intervene in a System*. Sustainability Institute.
- MEADOWS D.H (1976). *The Unavoidable A Priori*. In Jorgen Randers (ed), *Elements of the System Dynamics Method*. The MIT Press.
- MEADOWS D.L, BEHRENS W.W, MEADOWS D.H, NAILL R.F, RANDERS J., ZAHN E.K.O (1974). *Dynamics of Growth in a Finite World*. Wright Allen Press.
- MEADOWS D.L, MEADOWS D.H (1973). *Toward Global Equilibrium: Collected Papers*. Wright Allen Press.
- MEADOWS D. H., MEADOWS D.L, RANDERS J. (1972), *The Limits to Growth*. New York: Potomac Associates.
- MEADOWS D.L (1970), *The Dynamics of Commodity Production Cycles*, Cambridge Mass, Wright Allen Press.
- MILLENNIUM INSTITUTE (2017). *iSDG Model – Model Documentation*, version of January, 15th. <http://www.isdg.org>
- MILLENNIUM INSTITUTE (2007). *A Technical Introduction to Threshold 21 Integrated Development Model*. Millennium Institute, *promoting systems literacy and dynamic modeling tools for sustainable development worldwide*.
- MILLENNIUM INSTITUTE (2007). *Technical Documentation for the Threshold 21, Starting Framework Model*. Millennium Institute institute, *A Sustainable Future for Earth is Possible*.
- MILLENNIUM INSTITUTE (2003). *Threshold 21 Model Project for Conservation International : Strategic Options for Papua Indonesia*, January. 21 p.
- MILSUM J.H (1968). *Mathematical Introduction to General System Dynamics*. New York Pergamon Press.
- NAUDEAU S., KATAOKA N., VALERIO A., NEUMAN M. J., ELDER L. K. (2012). *Investir dans la petite enfance : un guide de développement de la petite enfance pour le dialogue de politique et la préparation de projets*. World Bank Publications.
- PEDERCINI M., ARQUITT S., CHAN D. (2020). *Integrated Simulation for the 2030 Agenda*. *System Dynamics Review*. Vol 36. Issue 3. 333 – 357.
- PEDERCINI M., ARQUITT S., COLLSTE D., HERREN H. (2019). *Harvesting Synergy From Sustainable Development Goals Interactions*. PNAS, vol 116 (46). 23021 – 23028.
- PEDERCINI M., ZUELLICH G., DIANATI K., ARQUITT S. (2018). *Toward Achieving Sustainable Development Goals in Ivory Coast : Simulating Pathways to Sustainable Development*. *Sustainable Development*. Vol 26. Issue 6. 588 – 595.
- PEDERCINI M., BARNEY G.O (2010). *Dynamic Analysis of Interventions Designed to Achieve Millennium Development Goals (MDG) : The Case of Ghana*. *Socio-economic Planning Sciences*, vol 44. 89 – 99.
- PNUE (2014). *Rapport exploratoire sur l'économie verte au Burkina Faso*. 52 p.
- PRUYT E. (1982). *System Dynamics Models for Big Issues*. TU Delft Library. 2013. The Netherlands.

- OU W., BARNEY G.O, SYMALLA D., MARTIN L. (1999), The Threshold 21 : National Sustainable Development Model in Integrated Global Models of Sustainable Development - Vol. II. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*.
- RASKIN P.D (1986), *LEAP, A description of the LDC Energy Alternatives Planning System*, The Beijer Institute and the Scandinavian Institute of African Studies.
- RASKIN P.D (1985) Integrated Energy planning in Developing Countries : The role of Computer Systems. *Energy and Developing Countries*, vol 14, n°4/5, 210 - 213.
- REPUBLIQUE DU SENEGAL (2014). *Etude prospective « Sénégal 2035 »*. Emergence dans la solidarité et Etat de droit. Octobre. 187 p.
- RICHMOND B. (2000). The Thinking in Systems Thinking : Honing your Skills. *The Systems Thinker*, vol 11, n°8, october, p. 6.
- RICHMOND B. (1997). The Thinking in Systems Thinking : How can we make it easier to master ? *The Systems Thinker*. Vol 8, n° 2, 1-5.
- ROBERTS N. (1975), *Dynamic Feedback Systems Diagram Kit*, Cambridge, Mass.: Pugh-Roberts Associates.
- SENGE P.M (1990). *The Fifth Discipline*. Dell Publishing Group.
- STERMAN J. D. (2007), "Exploring the next frontier: System Dynamics at 50", *Special issue of System Dynamics Review*, vol 23 (2-3).
- STERMAN J. D (2000), *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill, New York.
- STERMAN J.D, MOSEKILDE E. (1992), "Business Cycle and Long Waves: A Behavioral Disequilibrium Perspective", *MIT System Dynamics National Model Project*, D - 4308, December, 37 p.
- STERMAN J. D. (1991). A Skeptic's Guide to Computer Models. In Barney, G. O. et al. (eds.), *Managing a Nation: The Microcomputer Software Catalog*. Boulder, CO : Westview Press, 209-229
- STERMAN J. D (1985), "A behavioral model of the economic long wave", *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol 6, (1), 17-53.
- 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.
- TINBERGEN J. (1954). *L'économétrie*. Librairie Armand Colin.
- VAN DEN BELT M., DIETZ T. (2004). *Mediated Modeling*. Island Press.
- VENNIX J.A.M (1996). *Group Model Building. Facilitating Team Learning Using System Dynamics*. Wiley.
- WOLSTENHOLME E.F (1985). A Methodology for Qualitative System Dynamics. *Proceedings of the 1985 System Dynamics Conference*.
- WOLSTENHOLME E.F, COYLE R.G (1983). The Development of Systems Dynamics as a Methodology for System Description and Qualitative Analysis. *Journal of the Operational Research Society*, vol 34, issue 7, 569 - 581.

ZAPATA H.O, GAUHIER W.M (2003). Threshold Models in Theory and Practice. Department of Agricultural Economics and Agribusiness ; Baton-Rouge LA. *Southern Agricultural Economics Association Annual Meeting, Alabama, February 1-5.* 17 p.