

Intégration des inégalités de genre dans un modèle de
dynamique des systèmes global : une mise à jour du rapport
« The Limits to Growth »

par

ANNABELLE RAIZIN

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE, ÉNERGIES RENOUVELABLES ET
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 22 AOÛT 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Annabelle Raizin, 2025



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Daniel Rousse, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Yves-Marie Abraham, codirecteur
Département de management à l'école des Hautes Études Commerciales

M. Philippe Terrier, président du jury
Département des enseignements généraux à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 21 AOÛT 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Rousse pour m'avoir proposé ce sujet passionnant et pour m'avoir permis de participer à ce projet de recherche. Je suis également reconnaissante à Monsieur Abraham, mon co-directeur, pour m'avoir initiée à la pensée de la décroissance et pour les échanges éclairants qui ont nourri ma réflexion tout au long de ce travail. Un grand merci à Madame Fournier-Guillemette, qui m'a accueillie dans son cours d'introduction aux courants féministes et a pris le temps d'échanger avec moi sur les bonnes pratiques en études féministes.

Je remercie également chaleureusement les chercheurs et chercheuses qui ont pris le temps de répondre à mes questions, Monsieur Bardi, Monsieur Motesharrei, Madame Carrasco contribuant ainsi à la richesse de cette recherche.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à mes collègues du groupe de recherche, en particulier Pablo, pour leur soutien, leur disponibilité et les réflexions partagées tout au long de ce travail.

Je remercie également l'École de technologie supérieure (ÉTS) pour l'accueil au sein de son programme de maîtrise, ainsi que le réseau Polytech, et en particulier Polytech Nancy, de m'avoir offert la possibilité de suivre un double diplôme et de bénéficier d'une formation rigoureuse et complémentaire en ingénierie.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à mes parents, dont le soutien moral et financier a rendu ce parcours possible, ainsi qu'à mes proches, pour leur présence, leurs encouragements et leur soutien constant tout au long de ces années.

**Intégration des inégalités de genre dans un modèle de dynamique des systèmes global :
une mise à jour du rapport
« The Limits to Growth »**

ANNABELLE RAIZIN

RÉSUMÉ

L'urgence climatique, les limites planétaires et les inégalités sociales appellent à repenser les modèles globaux de soutenabilité. Les travaux historiques du rapport Limits to Growth ont permis de modéliser les trajectoires systémiques à l'échelle mondiale, mais n'intègrent pas explicitement les dimensions sociales telles que les inégalités de genre. Ce mémoire propose une mise à jour du modèle World3 afin d'y inclure les principales composantes de l'Indice d'Inégalité de Genre (IIG), comme l'éducation secondaire féminine, la mortalité maternelle, la participation économique des femmes et leur représentation politique.

À partir de cette nouvelle structure, plusieurs scénarios sont comparés : les scénarios classiques issus du rapport Meadows (BAU, BAU2, CT et SW) ainsi qu'un scénario alternatif, IIG+, centré sur des politiques d'émancipation des femmes. La simulation est réalisée à l'aide de Vensim, et les variables sociales intégrées permettent de suivre l'évolution de l'IIG dans chaque trajectoire. Les résultats montrent que les scénarios purement technologiques ou économiques ne suffisent pas à réduire les inégalités de genre. En revanche, le scénario IIG+, permet de faire baisser significativement l'IIG, tout en contribuant à la stabilisation démographique et à une meilleure soutenabilité globale. Cela met en lumière l'effet de levier des politiques sociales et féministes dans les modèles systémiques.

Une discussion théorique propose enfin une lecture féministe de la dynamique des systèmes, notamment à travers une taxonomie du sous-système socio-culturel, un nouvel indicateur écoféministe et une réflexion sur le rôle fondamental du travail invisible.

Mots-clés: inégalités de genre, dynamique des systèmes, World3, écoféminisme, soutenabilité

Integrating Gender Inequality into a Global System Dynamics Model : An Update of the "Limits to Growth"

ANNABELLE RAIZIN

ABSTRACT

Several major global challenges like climate change, planetary boundaries, and social inequalities require a rethinking of sustainability models. While the historical Limits to Growth report laid the foundations for global system dynamics modeling, it did not explicitly account for social dimensions such as gender inequality. This thesis proposes an update to the World3 model to integrate key components of the Gender Inequality Index (GII), including female secondary education, maternal mortality, women's economic participation, and political representation. Using this extended framework, several scenarios are analyzed : the original World3 trajectories (BAU, BAU2, CT, and SW) as well as a new alternative scenario, IIG+, which prioritizes policies for women's empowerment. The simulation is carried out in Vensim, and the newly integrated social variables allow tracking the evolution of GII across all trajectories.

Results show that purely technological or economic strategies are insufficient to reduce gender inequalities. Conversely, the IIG+ scenario, even without technological change, significantly lowers the GII while also contributing to demographic stabilization and greater long-term sustainability. This suggests a leverage effect of social and feminist policies within systemic models.

The final discussion introduces a feminist perspective on system dynamics modeling, including a proposed taxonomy of the socio-cultural subsystem, a new ecofeminist indicator, and a reflection on the crucial role of invisible labor.

Keywords: gender inequality, system dynamics, World3, ecofeminism, sustainability

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Dynamique des systèmes et systèmes monde	5
1.1.1 La dynamique des systèmes et les modèles	5
1.1.1.1 Modèle Lotka-Voltera	7
1.1.1.2 Systèmes monde et Terre	10
1.2 Rapport du Club de Rome : <i>The Limits to Growth</i>	12
1.2.1 Présentation et définitions	13
1.2.2 World3	17
1.2.3 Scénarios et résultats	19
1.2.4 Comparaisons avec la réalité	24
1.2.5 Limites, critiques et conclusion	25
1.3 Modèles complémentaires	28
1.3.1 Rapport du Club de Rome : Terre pour Tous	28
1.3.2 Modèle dynamique HANDY	31
1.3.3 Economie du doughnut, économie du bien-être, économie du bonheur, économie du soin et approche une santé	33
1.4 La décroissance	35
1.5 Le féminisme	36
1.6 Inégalités	38
1.6.1 Inégalités de genre	39
1.6.2 Indicateurs de mesure des inégalités de genre	41
1.6.2.1 Indice de Développement de Genre (IDG)	41
1.6.2.2 Indice d’Inégalité de Genre (IIG)	42
1.6.2.3 Indice d’Egalité de Genre (IEG)	42
1.6.2.4 Indice Mondial d’Ecart entre les Sexes (IMES)	43
1.6.2.5 Indice des Institutions Sociales et de l’Égalité de Genre (SIGI)	43
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	45
2.1 Choix méthodologique et hypothèses	45
2.2 Outils et méthode de collecte de données	47
2.3 Intégration de l’Indice d’Inégalité entre les Genres	48
2.3.1 Composantes de l’Indice d’Inégalité entre les Genres (IIG)	48
2.3.2 Identification des variables pertinentes dans World3	50
2.3.3 Définition des relations causales	51
2.3.3.1 Taux de mortalité maternelle	52
2.3.3.2 Taux de fécondité des adolescentes	59
2.3.3.3 Sièges parlementaires	66
2.3.3.4 Éducation secondaire	69

2.3.4	2.3.3.5 Taux d'activité	82
2.3.4	Calcul de l'IIG	87
CHAPITRE 3	RÉSULTATS	89
3.1	Présentation des scénarios	89
3.2	Trajectoires des simulations	92
3.2.1	Scénario 1 : BAU	92
3.2.2	Scénario 2 : BAU2	93
3.2.3	Scénario 3 : CT	94
3.2.4	Scénario 4 : SW	95
3.2.5	Scénario 5 : IIG+	96
3.2.5.1	Avec boucles de rétroactions	96
3.2.5.2	Avec politique pour l'égalité des genres	100
3.3	Synthèse	102
CHAPITRE 4	DISCUSSION	105
4.1	Limites de la modélisation actuelle	105
4.2	La décroissance et le travail invisible	106
4.2.1	La décroissance	106
4.2.2	Le travail invisible	108
4.3	Approche des modèles de dynamiques des systèmes globaux sous l'angle du genre	109
4.3.1	Taxonomie du sous-système socio-culturel	110
4.3.2	Apports d'une lecture féministe des systèmes dynamiques	110
4.3.3	Esquisse d'un nouveau modèle	110
4.3.4	Nouvel indicateur écoféministe de soutenabilité	111
CONCLUSION	113
ANNEXE I	DIAGRAMME DYNAMO DE WORLD3	115
ANNEXE II	DIAGRAMME DE L'IIG SUR WORLD3 SUR VENSIM	117
ANNEXE III	PRINCIPAUX CHANGEMENTS DANS LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS	119
ANNEXE IV	RÉSULTAT DES SCÉNARIOS DE WORLD3 AVEC L'IIG	121
ANNEXE V	INTÉGRATION DES VARIABLES DE GENRE DANS LES MODÈLES DE DYNAMIQUE DES SYSTÈMES	129
ANNEXE VI	PROPOSITION DUN INDICE DE RÉSILIENCE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (IRSE)	133
ANNEXE VII	TAXONOMIE DU SOUS-SYSTÈME SOCIO-CULTUREL	135

BIBLIOGRAPHIE	137
---------------------	-----

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 2.1	Comparaison des principaux indicateurs d'inégalités de genre : forces et limites	46
Tableau 2.2	Décomposition des dimensions de l'IIG	49
Tableau 2.3	Déterminants de la mortalité maternelle selon différentes catégories ...	54
Tableau 2.4	Déterminants de la fécondité des adolescentes	60
Tableau 2.5	Déterminants du pourcentage de population adulte avec un niveau d'éducation secondaire	71
Tableau 2.6	Déterminants de la participation des femmes à la force de travail	83

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Schéma du modèle proie-prédateur selon le formalisme de Forrester	8
Figure 1.2	Evolution des populations de saumons et de pygargues dans le temps	9
Figure 1.3	Couplage progressif des modèles du système terrestre et absence de couplage bidirectionnel avec les sous-systèmes humains Tirée de Mote, Rivas & Kalnay (2020)	11
Figure 1.4	Taxonomie des sous-systèmes proposée pour le système Monde-Terre Adaptée de Donges <i>et al.</i> (2021)	12
Figure 1.5	Courbe exponentielle et linéaire	14
Figure 1.6	Représentation simplifiée des cinq sous-systèmes de World3 Tirée de Myrtveit (2005)	17
Figure 1.7	Représentation des flux du capital industriel dans l'économie selon le modèle World3 Tirée de Meadows, Meadows, Randers & Abraham (2013)	18
Figure 1.8	Résultat du scénario BAU Tirée de Meadows <i>et al.</i> (2013)	20
Figure 1.9	Résultat du scénario SW Tirée de Meadows <i>et al.</i> (2013)	23
Figure 2.1	Structure de la variable IIG Tirée de UNDP (2024b)	50
Figure 2.2	Relation pour différents pays entre la mortalité maternelle et les dépenses de santé par habitant (EHSPC) pour l'année 2015	56
Figure 2.3	Multiplicateur de la mortalité maternelle par les dépenses en santé	57
Figure 2.4	Relation pour différents pays entre la mortalité maternelle et le ratio femmes/hommes en éducation secondaire pour l'année 2015	58
Figure 2.5	Multiplicateur de la mortalité maternelle par le ratio femmes/hommes en éducation secondaire (SER)	58
Figure 2.6	A droite : Évolution de la mortalité maternelle dans le monde (1985-2020). A gauche : Évolution de la mortalité maternelle dans le scénario 1	59
Figure 2.7	Évolution de la fécondité des adolescentes dans le monde (2000-2022) .	60

Figure 2.8	Fécondité des adolescentes selon le ratio femme/homme en éducation secondaire pour différents pays pour l'année 2015	62
Figure 2.9	Multiplicateur de la fécondité adolescente par le ratio d'éducation secondaire femme/homme (<i>AFRMSER</i>)	63
Figure 2.10	Fécondité des adolescentes selon les dépenses de santé par habitant pour différents pays pour l'année 2015	63
Figure 2.11	Multiplicateur de la fécondité adolescente selon les dépenses de santé par habitant (<i>AFRMHS</i>)	64
Figure 2.12	Indicateur de santé simulé par le scénario 1	65
Figure 2.13	Calcul de l'indicateur de santé au niveau mondial avec les données empiriques	65
Figure 2.14	Évolution de la part des femmes dans les parlements nationaux (1997 à 2024)	66
Figure 2.15	Proportion de sièges occupés par des femmes selon la part des femmes dans la population active (données de 2015)	69
Figure 2.16	Évolution de la part des femmes dans les parlements nationaux dans le scénario 1	69
Figure 2.17	Dépenses en éducation par personne versus part des services par personnes dans le PIB pour l'année 2015	73
Figure 2.18	Allocations de services d'éducation par habitant sur Vensim	73
Figure 2.19	Dépenses en éducation par personne selon la part de la population ayant atteint un niveau d'éducation secondaire pour l'année 2015 d'après les données de la banque mondiale	74
Figure 2.20	Multiplicateur du taux d'éducation secondaire par les services en éducation	75
Figure 2.21	Revenu médian par personne versus part de la population ayant atteint un niveau d'éducation secondaire pour l'année 2015	76
Figure 2.22	Multiplicateur du taux d'éducation secondaire par les revenus des familles	76

Figure 2.23	Ratio femme/homme de 25 ans et plus ayant une éducation secondaire selon le taux global de la population de 25 ans et plus ayant atteint ce niveau	78
Figure 2.24	Multiplicateur du ratio femme/homme d'éducation secondaire par le taux global d'éducation	79
Figure 2.25	A droite : Évolution du taux global d'éducation secondaire dans le monde (1970-2023). A gauche : Évolution du taux global d'éducation secondaire dans le scénario 1	80
Figure 2.26	A droite : Évolution du ratio femmes/hommes ayant atteint un niveau d'éducation secondaire (1970-2023). A gauche : Évolution du ratio femmes/hommes ayant atteint un niveau d'éducation secondaire dans le scénario 1	80
Figure 2.27	Corrélation entre <i>SER</i> et le ratio femmes/hommes de participation à la population active	85
Figure 2.28	Table d'équivalence du multiplicateur <i>LFPRMSER</i> selon le ratio d'éducation secondaire femmes/hommes	85
Figure 2.29	Table d'équivalence du multiplicateur <i>LFRMIO</i> selon le capital industriel par habitant	86
Figure 2.30	Corrélation entre la part de la population active et le ratio femmes/hommes de participation	86
Figure 2.31	Table d'équivalence du multiplicateur <i>LFRMLF</i> selon la proportion de population active	87
Figure 3.1	Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans le scénario BAU	93
Figure 3.2	Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans le scénario BAU2	94
Figure 3.3	Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans le scénario CT	95
Figure 3.4	Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans le scénario SW	96
Figure 3.5	Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans l'étape 1 du scénario IIG+ avec les hypothèses de BAU	97
Figure 3.6	Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans l'étape 1 du scénario IIG+ avec les hypothèses de SW	99

Figure 3.7	Évolution de l'indice d'inégalité de genre et de ses sous-indicateurs dans l'étape 2 du scénario IIG+ avec les hypothèses de BAU	101
Figure 3.8	Évolution de l'indice d'inégalité de genre et de ses sous-indicateurs dans l'étape 2 du scénario IIG+ avec les hypothèses de SW	102

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AFR	Adolescent Fertility Rate
AFRMHS	Adolescent Fertility Rate Multiplier Health Services
AFRMHST	Adolescent Fertility Rate Multiplier Health Services Table
AFRMSER	Adolescent Fertility Rate Multiplier Secondary Education Ratio
AFRMSERT	Adolescent Fertility Rate Multiplier Secondary Education Ratio Table
BAU	Business As Usual
BAU2	Business As Usual 2
BNB	Bonheur National Brut
CIM-11	Classification internationale des maladies Onzième édition
CITE	Classification Internationale Type de l'Éducation
CT	Comprehensive Technology
DICE	Dynamic Integrated model of Climate and the Economy
Dmnl	Dimensionless
E4A	Terre pour tous
EESPC	Effective Education Services per capita
EHSPC	Effective Health Services Per Capita
EI	Empowerment Index
EIGE	European Institute for Gender Equality
ESAPC	Education Services Allocation Per Capita
ESAPCT	Education Service Allocation Per Capita Table
ESID	Education Service Impact Delay
ETS	École de Technologie Supérieure
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations ou Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GDP	Gross Domestic Product
GES	Gaz à effet de serre

GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat
HANDY	Human And Nature Dynamics
HI	Health Index
IBH	Indice de Bien-être Humain
IDG	Indice de Développement de Genre
IDH	Indice de Développement Humain
IEG	Indice d'Égalité de Genre
IIG	Indice d'Inégalité entre les Genres
IMES	Indice Mondial d'Écart entre les Sexes
IPBES	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
IPCC	Intergovernmental Panel On Climate Change
IPG	Indice de Parité de Genre
LFP	Labor Force Participation
LFPR	Labor Force Participation Ratio
LFPRMLF	Labor Force Participation Ratio Multiplier Labor Force
LFPRMLFT	Labor Force Participation Ratio Multiplier Labor Force Table
LFPRMSER	Labor Force Participation Ratio Multiplier Secondary Education Ratio
LFPRMSERT	Labor Force Participation Ratio Multiplier Secondary Education Ratio Table
LFPRN	Labor Force Participation Ratio Normal
LFRMIO	Labor Force Ratio Multiplier Industrial Output
LFRMIOT	Labor Force Ratio Multiplier Industrial Output Table
LTG	The Limits To Growth
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MMR	Maternal Mortality Ratio
MMRMHS	Maternal Mortality Ratio Multiplier Health Services
MMRMHST	Maternal Mortality Ratio Multiplier Health Services Table

MMRMSER	Maternal Mortality Ratio Multiplier Secondary Education Ratio
MMRMSERT	Maternal Mortality Ratio Multiplier Secondary Education Ratio Table
MMRN	Normal Maternal Mortality Ratio
MRP	Men Representation in Parliament
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
ODD	Objectifs de Développement Durable
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OMSA	Organisation Mondiale de la Santé Animale
ONU	Organisation des Nations Unies
PdG	Pas de Géant
PIB	Produit Intérieur Brut
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement (United Nations Development Programme)
SE	Secondary Education
<i>SE_F</i>	Secondary Education Female
<i>SE_M</i>	Secondary Education Male
SEMES	Secondary Education rate multiplier from Education Services
SEMEST	Secondary Education rate multiplier from Education Services Table
SEMF1	Secondary Education Multiplier from Family Income
SEMFIT	Secondary Education Multiplier from Family Income Table
SEN	Secondary Education Normal
SER	Secondary Education Ratio
SERMT	Secondary Education Ratio Multiplier Table
SIGI	Indice des Institutions Sociales et de l'Égalité de Genre
SOPC	Service Output Per Capita
SW	Stabilized World
TPTT	Trop Peu Trop Tard

TpT	Terre pour tous
UIP	Union interparlementaire
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
UNICEF	Fonds des Nations Unies pour l'Enfance
USGCRP	U.S. Global Change Research Program
WI	Work Index
WRP	Women Representation in Parliament
WRPMLFPR	Women Representation in Parliament Multiplier Labor Force Participation Ratio
WRPMLFPRT	Women Representation in Parliament Multiplier Labor Force Participation Ratio Table
WRPN	Women Representation in Parliament Normal

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	Taille d'une population
c	Taux de croissance d'une population
C_s	Taux d'accroissement des proies en l'absence de prédateur
e	Efficacité de transformation des proies en nouveaux prédateurs
M_p	Taux de mortalité des prédateurs en l'absence de proie
p	Taux de prédation
P	Population de prédateurs
S	Population de proies
t	Temps
α, β, γ	Constantes
\$	Dollard

INTRODUCTION

Contexte de la recherche

Depuis plus d'un demi-siècle, les signaux d'alerte se multiplient quant aux impacts environnementaux et sociaux de la croissance économique. Parmi eux, le rapport *The Limits To Growth* (LTG), publié en 1972 par l'équipe Meadows, a marqué un tournant en modélisant les limites physiques d'un monde soumis à une expansion continue de la population, de la production et de la consommation. Cinquante ans plus tard, cette question reste largement ignorée. Le modèle économique dominant continue de reposer sur l'idée d'une croissance illimitée, au mépris des limites physiques de la planète. Il organise l'exploitation systématique de la nature, le pillage des ressources du Sud global et l'invisibilisation du travail de soin, largement assumé par les femmes. Les alertes scientifiques se multiplient, les rapports s'accumulent, et pourtant, la croissance continue de dicter l'ensemble des décisions politiques.

Depuis le XVIII^{ème} siècle, les bases de la pensée économique moderne s'appuient sur les théories de l'économie classique, portées notamment par Adam Smith (1776) et David Ricardo (1817). Cette approche conçoit la richesse comme un produit du travail et de la terre, et voit dans le marché un mécanisme autorégulateur garantissant l'équilibre général. L'économie néoclassique, qui s'impose ensuite au tournant du XIX^{ème} siècle, renforce cette vision en insistant sur la rationalité des acteurs économiques, le fonctionnement autorégulateur des marchés et une répartition optimale des ressources. Au fil du temps, l'idée d'une croissance économique illimitée devient centrale : produire plus, consommer plus, échanger plus devient la norme des sociétés dites développées.

Or, cette vision du progrès, basée sur la croissance continue et l'usage intensif des ressources, entre aujourd'hui en conflit avec les frontières écologiques de la Terre. L'empreinte écologique de l'humanité dépasse les capacités de régénération des écosystèmes, entraînant une dégradation accélérée des conditions de vie sur la planète. Dans ce contexte, de plus en plus de scientifiques

parlent désormais d'une nouvelle ère géologique : l'Anthropocène. Ce terme désigne la période où l'humanité est devenue une force capable de modifier profondément la Terre, à travers, notamment, du changement climatique, de l'érosion de la biodiversité et la pollution généralisée et la déstabilisation des cycles biogéochimiques. Face à cette réalité, plusieurs voix s'élèvent pour dénoncer l'aveuglement de l'économie dominante, incapable de prendre en compte les dimensions biophysiques de la production ni les dynamiques sociales de domination. L'Anthropocène n'est pas le résultat d'une humanité universelle qui aurait, collectivement, dépassé les limites planétaires. Elle découle d'un système économique bien concret, construit au fil du temps, fondé sur l'extractivisme, le productivisme et des rapports de domination profondément inégalitaires à toutes échelles.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le modèle World3, élaboré dans le cadre du rapport LTG, pour représenter les grandes dynamiques globales liées à la population, au capital économique, aux ressources naturelles, à la production alimentaire et à la pollution. Ce modèle a permis d'ouvrir une réflexion systémique sur les limites planétaires, en mettant en évidence les tensions entre croissance et soutenabilité. Mais il reste aveugle à certaines dimensions sociales fondamentales, notamment les inégalités de genre. Cette omission n'est d'ailleurs pas propre à World3 : dans l'analyse économique dominante elle-même, les rapports sociaux de sexe sont souvent ignorés ou relégués au second plan. Pourtant, cette absence limite la capacité de ces modèles à représenter les dynamiques sociales. Or, les trajectoires démographiques, économiques et environnementales sont toutes influencées par des rapports de genre. La plupart des modèles, dont World3, reposent sur une représentation homogène de la population humaine : ils ne distinguent ni les rôles sociaux, ni les inégalités internes aux sociétés. Pourtant, dans les faits, les réalités varient selon les contextes. Par exemple, les femmes assurent une part essentielle du travail reproductif (souvent non rémunéré) et figurent parmi les populations les plus vulnérables face aux crises écologiques, économiques ou sanitaires (ONU (2021); Jarry (2024)). Ainsi, certaines dimensions genrées, telles que la santé reproductive, l'accès à l'éducation secondaire,

la participation économique ou la représentation politique ont une influence directe sur des variables clés du modèle, comme la fécondité, la mortalité ou la production.

Le Programme des Nations Unies pour le Développement (United Nations Development Programme) (PNUD (UNDP)), en créant l'Indice d'Inégalité entre les Genres (IIG), a reconnu l'importance de ces facteurs pour le développement humain. Pourtant, les modèles globaux de dynamique des systèmes, à l'image de World3, continuent de représenter la population de manière homogène, sans intégrer structurellement les rapports sociaux de genre.

Objectif de la recherche

Dans ce contexte, ce mémoire propose donc une première approche de modélisation des dynamiques de genre en dynamique des systèmes global. En s'appuyant sur la structure du modèle World3 et en s'inspirant de travaux récents comme HANDY (Motesharrei, Rivas & Kalnay, 2014), il vise à intégrer des variables représentant les inégalités de genre afin de rendre visibles les interactions entre justice sociale et soutenabilité. L'objectif principal de ce travail est d'introduire une dimension genrée dans le modèle World3, en représentant les inégalités de genre à travers un indicateur composite inspiré de l'IIG. Plutôt que de modifier la structure du modèle, cette approche s'appuie sur l'influence de variables déjà existantes dans World3 sur certaines composantes sociales (éducation, santé reproductive, participation économique et politique). Il s'agit donc d'une première étape pour montrer comment, dans le cadre de la dynamique des systèmes, les grandes tendances mondiales peuvent affecter l'égalité de genre. En parallèle, un second travail a été amorcé pour construire un nouveau modèle intégrant dès sa conception les liens entre inégalités de genre, enjeux écologiques et organisation économique. Ce travail, encore en cours, ne sera pas présenté ici afin de ne pas surcharger ce mémoire, dont l'objectif principal reste la mise à jour du modèle des *Limites à la croissance*.

Il est important de préciser que ce mémoire adopte principalement une lecture binaire des rapports de genre, en se concentrant sur les catégories femmes et hommes. Cela ne reflète en

rien une volonté d'exclusion des personnes non-binaires, transgenres ou intersexes. Ce choix vise à assurer une meilleure clarté d'analyse et à rester cohérent avec les sources utilisées (qui ont majoritairement une approche binaire). Il s'agit d'un choix méthodologique, et non d'un positionnement politique ou identitaire restrictif.

Au-delà de l'enjeu technique, ce travail s'inscrit dans une perspective critique vis-à-vis du modèle de croissance économique dominant. Bien qu'il ait permis des avancées matérielles, ce modèle repose aussi sur des formes d'exploitation structurelles. Les apports des théories féministes permettent de questionner les fondements de cette croissance en révélant les rapports de pouvoir invisibilisés, notamment à travers la division sexuelle du travail, la dévalorisation des activités de soin et les inégalités dans la répartition des ressources et des risques. Ce mémoire poursuit ainsi un double objectif :

- d'une part, adapter le modèle World3 pour y intégrer une dimension genrée, afin d'examiner les effets systémiques des inégalités sociales ;
- d'autre part, contribuer à une lecture critique des modèles de croissance en articulant les dimensions de justice sociale et de soutenabilité écologique.

Structure du mémoire

Le **chapitre 1** présente l'état de l'art sur les modèles de dynamique des systèmes, les apports et limites du modèle World3, ainsi que les connaissances actuelles sur les inégalités de genre et leurs impacts systémiques. Le **chapitre 2** décrit la méthodologie employée pour construire les nouvelles variables et leur intégration dans la structure du modèle. Le **chapitre 3** présente les résultats des simulations pour différents scénarios. Enfin, le **chapitre 4** discute les implications de ces résultats pour les politiques de transition et propose des pistes d'amélioration du modèle.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre a pour objectif de dresser un état des lieux des différentes notions qui sont utilisées dans ce mémoire. Tout d'abord, cette section permet de présenter la dynamique des systèmes, avant de se concentrer plus spécifiquement sur les modèles développés à partir des années 1970. La deuxième partie traite du rapport du Club de Rome intitulé *Limits to Growth*, ainsi que de toutes les mises à jour qui ont été apportées depuis, jusqu'au nouveau modèle proposé dans le livre *Terre pour tous (E4A)*, publié en 2023. Ensuite, les théories qui ont guidé le mémoire seront présentées. Finalement, un état de l'art du féminisme et de différents indicateurs de mesure qui attestent des inégalités de genre seront étudiés.

1.1 **Dynamique des systèmes et systèmes monde**

Cette première partie de la revue de littérature définit les concepts de la dynamique des systèmes utilisés dans ce mémoire, puis présente un modèle de référence. Ensuite, elle présente les spécificités des systèmes monde-Terre, et en particulier celles du modèle World3, qui constitue le support principal de ce travail.

1.1.1 **La dynamique des systèmes et les modèles**

La dynamique des systèmes est une discipline de modélisation qui apparaît dans les années 1960. Inventée par Jay Forrester, son objectif est de comprendre et reproduire les interactions qui se produisent à l'intérieur d'un système. Cette idée découle de la théorie des systèmes de Karl Ludwig von Bertalanffy théorisée il y a près de cent ans, en 1937.

Celui-ci propose une nouvelle vision des interactions du monde en introduisant une vision systémique. Les systèmes sont nombreux et plus ou moins complexes. Comme l'explique Forrester (1968), nous sommes entourés de systèmes, nous en utilisons tous comme nous vivons à l'intérieur.

Nous définissons, pour la suite de ce mémoire, un système ou une dynamique, comme « un

groupement d'éléments qui opèrent ensemble dans un but commun » (Forrester, 1968). Un système simple peut-être, par exemple, un vélo qui est un ensemble de pièces interconnectées destiné à avancer. Les pédales permettent d'actionner les roues au travers d'un système de renvoi. Mais pour faire avancer le vélo il faut une action mécanique qui appuie sur les pédales, dans ce cas l'humain qui pédale fait aussi partie du système. Un coup de pédale actionne une réaction en chaîne qui fait avancer le vélo.

On distingue différents types de systèmes, selon Forrester (1968) :

- systèmes ouverts : c'est-à-dire que les résultats dépendent de ce qui est mis en entrée, mais pas l'inverse ;
- système à rétroaction : c'est-à-dire que les entrées et les sorties s'influencent les unes et les autres. Il en existe deux sous-catégories :
 - boucles positives : le résultat génère une action encore plus importante qu'initialement (phénomène de croissance ou de déclin) ;
 - boucles négatives : en fluctuant, les itérations tendent à converger vers une valeur stable.

La formalisation des systèmes implique une catégorisation des variables selon trois sortes (Provitolo, 2006) :

- les variables d'état ou de niveau qui représentent l'état du système, elles représentent les stocks à chaque instant ;
- les variables de flux qui reflètent les forces qui influencent l'état du système ;
- les variables auxiliaires qui peuvent être des constantes, des paramètres ou des fonctions.

Pour relier ces variables entre elles, il y a des « [canaux] d'informations » (Provitolo, 2006). Ces relations sont représentées mathématiquement par des équations qui régissent les interactions entre les paramètres. Les équations peuvent être linéaires, ce qui signifie que la proportionnalité entre la cause et la conséquence est connue en tout temps, ou non.

La représentation d'un système est un modèle, ils sont « [des substituts] pour un objet ou un système » (Forrester, 1968). Le plus connu est probablement celui qui représente la dynamique « proie-prédateur ». Développé simultanément par Lotka et Volterra à la même période dans

les années 1920, ce modèle vient compléter celui de Malthus, qui décrit la croissance d'une population en l'absence d'interactions avec d'autres espèces.

1.1.1.1 Modèle Lotka-Voltera

Développé à la fin du XVIII^{ème} siècle, ce dernier suppose qu'une population croît de manière exponentielle, sans limite, tant que les ressources sont suffisantes. L'équation 1.1 présente la formule de base du modèle de Malthus :

$$\frac{dA(t)}{dt} = cA(t) \quad (1.1)$$

avec :

- $A(t)$: la taille de la population à l'instant t ;
- c : le taux de croissance de la population (taux de natalité – taux de mortalité).

La solution de cette équation différentielle est une fonction exponentielle : $A(t) = A_0 e^{ct}$ avec A_0 la population initiale.

Il est important de noter que ce modèle n'est pas complet, en effet, il ne prend pas en compte les contraintes environnementales qui impactent les espèces comme la disponibilité limitée des ressources (Delmas, 2004). C'est pourquoi d'autres modèles viennent le compléter comme celui de Verhulst qui introduit une capacité de charge maximale pour la population ou bien celui de Lotka-Voltera (Alfred J. Lotka (1925), Volterra (1926)) qui intègre une interaction entre les espèces et donc permet une régulation du nombre d'individus.

Ainsi, grâce à ce dernier, il est possible de suivre dans le temps l'évolution du système biologique que représentent les proies avec leurs prédateurs. Il repose sur l'idée que, sans prédateurs, la population de proies augmente de manière exponentielle, mais est régulée par leur présence. À l'inverse, les prédateurs voient leur nombre diminuer en l'absence de proies, mais croître lorsque la nourriture devient disponible. Les interactions entre les deux espèces sont décrites par des équations différentielles non linéaires. De plus, pour simplifier l'exemple, on suppose que l'espèce prédatrice se nourrit uniquement d'un type de gibier, qui est exclusivement chassé

par ce prédateur. Ainsi, le modèle conduit à des cycles dans la taille des populations. Prenons l'exemple de saumons et de pygargues.

On note $S(t)$ et $P(t)$ le nombre de proies et de prédateurs au temps t . Ces nombres sont définis dans \mathbb{R}^+ étant donné que le nombre d'individus ne peut pas être négatif.

On pose :
$$\begin{cases} c_s = \text{taux d'accroissement des proies sans prédateur} \\ p = \text{taux de prédation (taux de mortalité des proies dû aux prédateurs)} \\ e = \text{efficacité de conversion des proies en nouveaux prédateurs} \\ M_p = \text{taux de mortalité des prédateurs en l'absence de proie} \end{cases}$$

Chaque espèce évolue selon les équations présentées dans le système 1.2 :

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = S(t)(C_s - pP(t)) \\ \frac{dP(t)}{dt} = P(t)(eS(t) - M_p) \end{cases} \quad (1.2)$$

Un représentation de ce modèle est donné ci-dessous dans la figure 1.1 :

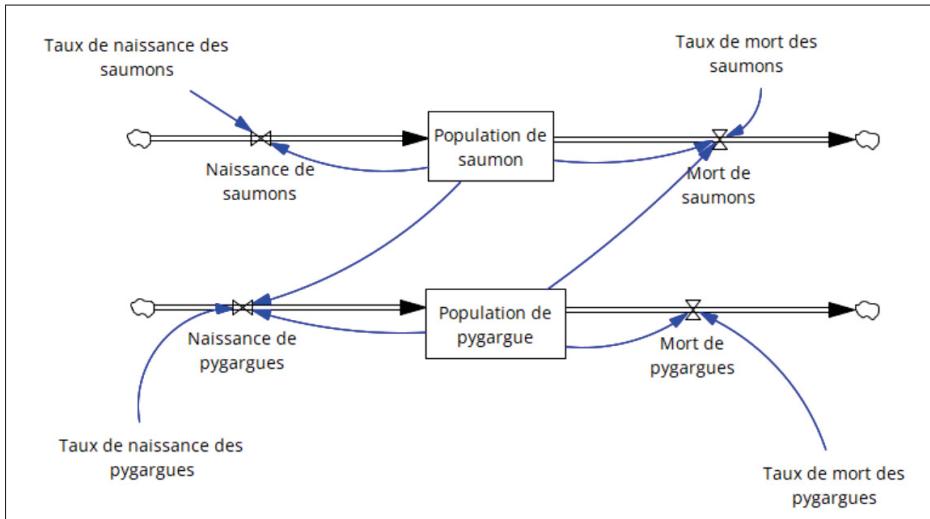


Figure 1.1 Schéma du modèle proie-prédateur selon le formalisme de Forrester

Les populations d'animaux sont représentées comme des stocks (rectangles noirs sur le schéma), les flux (flèches bleues) correspondent aux taux de décès, de naissance et aux interactions entre

les deux espèces. On observe bien des boucles de rétroactions qui rendent le modèle non linéaire et qui, dans ce cas, conduit à des cycles concernant les effectifs des espèces. Grâce au logiciel de simulation Vensim on peut obtenir les courbes affichées sur la figure 1.2 pour une certaine population de départ et certains taux de naissance et de décès. On observe des oscillations périodiques des deux espèces animales.

On observe quatre phases qui se répètent :

1. Lorsque les saumons sont nombreux, le nombre de prédateurs augmente étant donné qu'ils ont suffisamment de ressources pour se développer ;
2. lorsque les pygargues deviennent trop nombreux et tuent les saumons plus vite qu'ils ne peuvent se reproduire. La population de proie se met à diminuer ;
3. la chute dans la population de saumon va par la suite elle-même diminuer le nombre de pygargues ;
4. une fois les prédateurs moins nombreux, la population de saumons peut à nouveau croître.

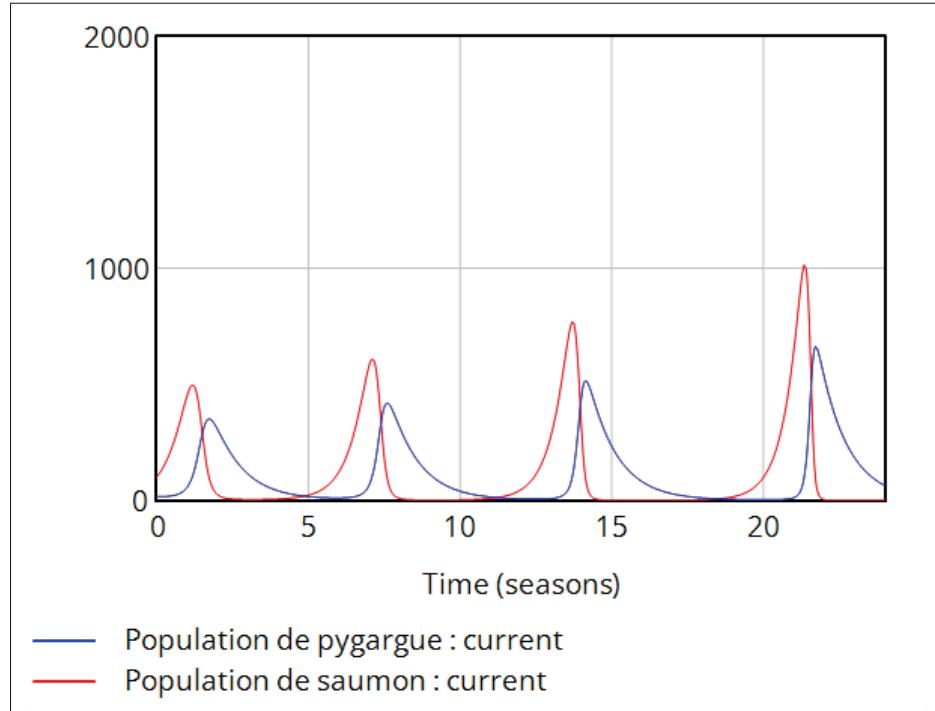


Figure 1.2 Evolution des populations de saumons et de pygargues dans le temps

Ces oscillations illustrent un équilibre dynamique entre la population de saumons et celle de pygargues. Cependant, dans la réalité, d'autres facteurs peuvent influencer cette dynamique. Le modèle Lotka-Volterra est donc une simplification utile pour comprendre les interactions de base, mais il doit être enrichi pour des analyses plus complexes.

Le modèle proie-prédateur est un outil fondamental pour comprendre les interactions entre espèces dans un environnement (Diz-Pita & Otero-Espinar, 2021). Cet exemple de modèle permet de bien comprendre les aspects non linéaires de certains systèmes ainsi que la simplification systématique des modèles de dynamique des systèmes et leur impossibilité à représenter la réalité entièrement (Barbrook-Johnson & Penn, 2022).

1.1.1.2 Systèmes monde et Terre

Les modèles de dynamique des systèmes peuvent être très variés. Ils représentent toute sorte de systèmes plus ou moins complexes. Ce mémoire se concentre sur les modèles qui représentent le monde ou la Terre. Il s'agit des modèles qui tentent de modéliser les dynamiques des systèmes sociaux ou économiques qui font la structure des sociétés humaines, les cycles et lois du système terrestre qui correspondent à la physique, la biologie ou la chimie de la planète (comme le cycle de l'eau par exemple) et les relations entre ces différents systèmes (Mote *et al.*, 2020).

Dès les années 1960 des scientifiques ont développé un modèle numérique qui modélise l'atmosphère terrestre (Manabe, Smagorinsky & Strickler, 1965). Celui-ci a pour objectif l'étude des dynamiques en œuvre dans l'atmosphère avec notamment les interactions entre « le transfert radiatif, le cycle hydrologique, la photochimie de l'ozone et le mouvement à grande échelle » (traduction libre, Manabe *et al.*, 1965, p.29). Après ces premiers essais de modélisation, les scientifiques ont développé d'autres modèles qui représentent les dynamiques des sols, l'océan et la glace, le cycle du carbone, celui de la végétation et d'autres composés chimiques. La figure 1.3 représente l'évolution des systèmes du climat terrestre dans le temps. Tous ces sous-systèmes couplés les uns aux autres permettent de représenter les dynamiques en jeu sur Terre, la bidirectionnalité de ces interactions reproduit le système réel du climat terrestre. Ainsi, les boucles de rétroaction sont primordiales dans la modélisation, le système global est plus que

la somme de tous les sous-systèmes.

Une autre partie des systèmes monde concerne les modèles sociétaux qui cherchent à représenter l'organisation sociale de nos sociétés et l'impact de nos activités sur notre environnement. Les scientifiques cherchent ainsi à modéliser l'économie, notre modèle d'agriculture, nos industries, notre utilisation des terres et de l'eau, la démographie et autres sous-systèmes qui permettent de s'organiser ensemble. Dans un article de 2020, Mote, Rivas & Kalnay mettent en avant le fait que les sous-systèmes humains ne sont pas suffisamment couplés aux systèmes terrestres pour permettre une compréhension globale de la Terre. Pour répondre à cette problématique, ces mêmes auteurs ont développé un nouveau modèle de dynamique des systèmes basés sur l'interaction proie-prédateur, ce modèle est présenté dans la section 1.3.2.

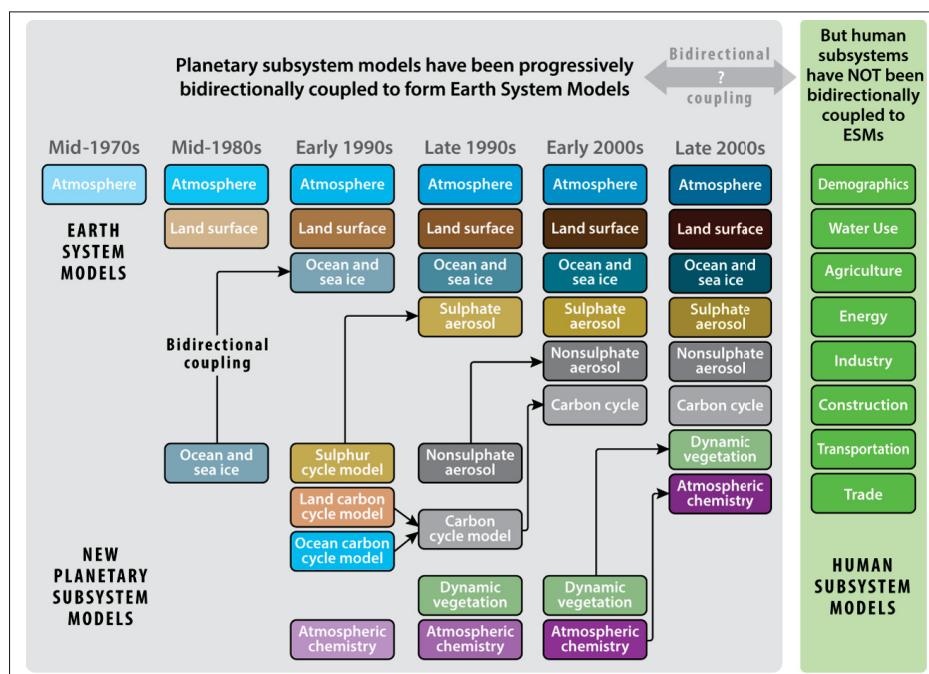


Figure 1.3 Couplage progressif des modèles du système terrestre et absence de couplage bidirectionnel avec les sous-systèmes humains

Tirée de Mote *et al.* (2020)

Les modèles du climat terrestre permettent ainsi de représenter le système planétaire de manière de plus en plus précise (Météo-France, 2021). Les modèles qui représentent l'économie, la démographie et les autres grandes structures sociales sont également bien documentés. Et, depuis

le rapport LTG, les modèles qui font le lien entre les activités humaines et leur environnement sont assez développés également. Pour une représentation totale du monde terrestre il ne manque donc que les interactions au sein même de la société humaine telles que la politique, les inégalités, les comportements économiques et culturels, les normes sociales. . . . Malgré son rôle important dans l'évolution des sociétés ce sous-système est peu documenté (Donges *et al.*, 2021). De plus, par leur nature ces processus « ne sont [potentiellement] que partiellement formalisables » (traduction libre, Donges *et al.*, 2021, p. 6). En effet, plusieurs difficultés apparaissent, par exemple les différentes échelles de temps des variables. Certains indices peuvent varier instantanément, tandis que d'autres peuvent prendre des décennies avant d'évoluer (Donges *et al.*, 2021). La classification des systèmes monde proposée par Donges *et al.* reprend ces trois sous-systèmes (figure 1.4) et identifie neuf types d'interactions comme le montre la matrice à droite de la figure 1.4.

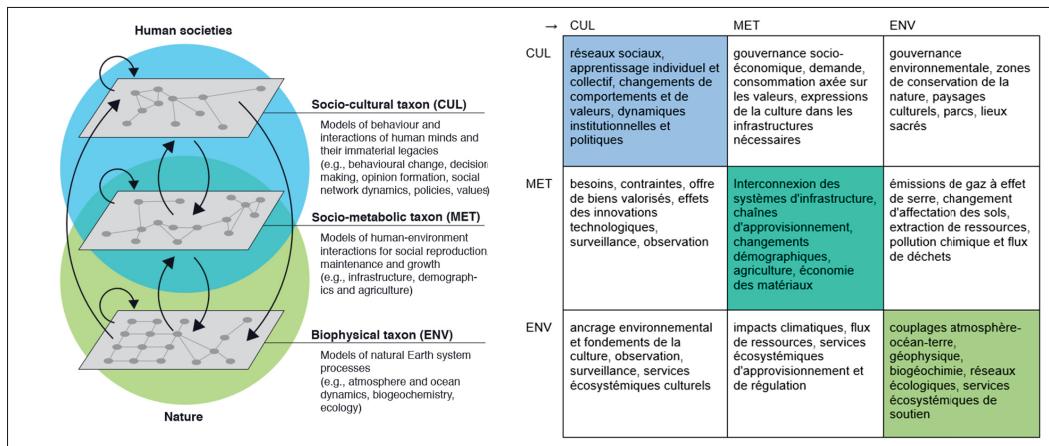


Figure 1.4 Taxonomie des sous-systèmes proposée pour le système Monde-Terre
Adaptée de Donges *et al.* (2021)

1.2 Rapport du Club de Rome : *The Limits to Growth*

Sortie en 1972, la première édition du livre traduit en français « *Halte à la croissance* » fait rapidement polémique. Ses auteurs, Donella Meadows, Dennis Meadows, Jorgen Randers et William Behrens du Massachusetts Institute of Technology (MIT) à la demande du Club

de Rome présentent une mise en garde contre la croissance économique et démographique déraisonnée qui épuise les ressources et augmente la pression sur la Terre (Meadows, Meadows, Randers & Behrens III, 1972). Le développement de la société de consommation et le choc pétrolier de l'époque expliquent en grande partie le scepticisme avec lequel le rapport est reçu. Pourtant plus de cinquante ans plus tard les inquiétudes qui y étaient soulevées sont plus que jamais d'actualité (INA, 2024).

Cette section vise à présenter ce rapport dans son ensemble.

1.2.1 Présentation et définitions

Le rapport LTG est né de l'initiative du Club de Rome, un think tank international fondé par Aurelio Peccei, un industriel italien, et Alexander King, ancien directeur de l'OCDE. Préoccupée par les impacts écologiques de la croissance économique et démographique effrénée de l'époque, l'organisation contacte Jay Forrester qui développe à l'époque un modèle du monde en dynamique des systèmes. Depuis sa création le Club de Rome continue de produire des analyses et des rapports sur les enjeux mondiaux, notamment les crises environnementales.

Publié dans les années 1972 et 1974, le rapport est divisé en deux ouvrages : un premier accessible au grand public *The limits to Growth* et un second *Dynamics of Growth in a Finite World*, qui détaille la modélisation réalisée par l'équipe du MIT avec le modèle World3. De nombreuses mises à jour ont été publiées depuis la publication originale, la plus récente étant celle des 30 ans du rapport. Dans cette partie seule la dernière mise à jour de l'étude par les auteurs est présentée.

L'objectif du modèle décrit dans le rapport LTG est d'explorer les effets potentiels de l'accroissement exponentiel des activités humaines sous divers scénarios. Ce type de progression est observé dans de nombreux domaines, notamment ceux relatifs aux humains comme, entre autres, l'utilisation d'engrais, le développement des télécommunications ou le tourisme international (Meadows *et al.*, 1972 ; Steffen, Broadgate, Deutsch, Gaffney & Ludwig, 2015). On observe en parallèle les mêmes phénomènes pour des données qui représentent le climat ou la biodiversité. En effet, Steffen *et al.* (2015) ont montré que les tendances dans l'évolution

des paramètres terrestres suivent des courbes exponentielles. Parmi ces paramètres figurent, par exemple, l'acidification des océans, la perte des forêts tropicales et l'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Une évolution exponentielle est caractérisée par une augmentation (ou une diminution) très rapide d'une quantité. Contrairement aux équations arithmétiques (ou linéaires) qui progressent indépendamment, les équations géométriques (ou exponentielles) sont définies par une augmentation proportionnelle à leur valeur actuelle (Meadows *et al.*, 1972). La figure 1.5 ci-dessous représente ces évolutions avec un taux d'accroissement de 10 %. On observe que le temps de doublement de la courbe exponentielle est inférieur à celui de la courbe linéaire, il faut environ sept ans pour doubler la quantité initiale contre dix ans pour la croissance linéaire.

Les cinq sphères traitées dans le rapport LTG à savoir : la population, l'industrialisation, la production alimentaire, les ressources naturelles et la pollution subissent ou ont subi des transformations exponentielles. La section suivante détaille ces cinq sous-systèmes fondamentaux.

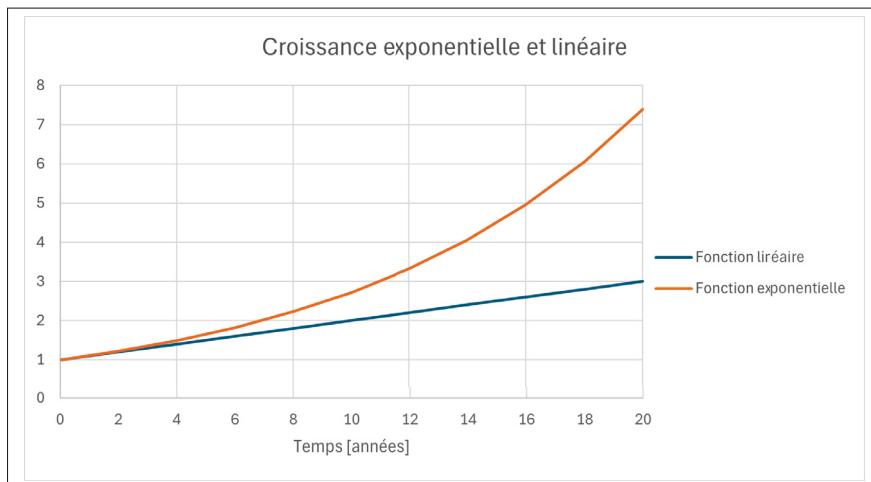


Figure 1.5 Courbe exponentielle et linéaire

Face à cet accroissement infini, le rapport discute des « possibilités limitées [de la terre] » (Meadows *et al.*, 1972, p.197) et d'effondrement. Ces réflexions autour des limites à la croissance et des tensions entre ressources et population ne sont pas nouvelles. Dès 1798, Thomas Malthus publie son *Essai sur le principe de population*, dans lequel il affirme que la population tend à

croître de façon exponentielle, tandis que les ressources, en particulier agricoles, n'augmentent que de manière linéaire. Ce déséquilibre mènerait inévitablement à des crises démographiques. Malthus identifie alors deux mécanismes de régulation : les « freins positifs », tels que la famine, la guerre ou la maladie, qui surviennent quand la population dépasse la capacité de subsistance ; et les « freins préventifs », comme la limitation volontaire des naissances (Malthus, 1798; Chemin, 2017). Il convient toutefois de rappeler que cette vision était profondément élitiste : Malthus s'opposait à toute forme d'aide aux pauvres, estimant que l'assistance ne ferait qu'encourager la croissance démographique des classes laborieuses, jugée irresponsable. Cette perspective, qui justifiait la reproduction des inégalités sociales, a été largement critiquée. Si l'histoire a montré que les prédictions de Malthus ne se sont pas réalisées au XIX^{ème} siècle grâce aux révolutions agricoles et industrielles, elles n'en ont pas moins marqué durablement la pensée économique et démographique. Aujourd'hui, ses questions sur la croissance de la population, les ressources limitées et les inégalités reviennent au cœur des débats face aux défis climatiques et sociaux. Oxfam note à ce propos dans son rapport sur les inégalités que « depuis 2020, les cinq hommes les plus riches du monde ont doublé leur fortune. [Alors qu']au cours de la même période, la richesse cumulée de 60 % de l'humanité a baissé » (Jarry, 2024, p.4).

Depuis Malthus, de nombreux chercheurs se sont penchés sur ces enjeux, qu'il s'agisse des limites physiques de la planète ou des seuils sociaux, ces deux dimensions étant liées l'une à l'autre. Les limites écologiques devenant, en effet, de plus en plus tangibles, provoquent des tensions croissantes tant sur l'environnement que dans les sociétés humaines. En 2009, un groupe international de scientifiques s'est penché sur ces contraintes physiques planétaires. Ils ont, ainsi, identifié neuf processus biophysiques qui permettent d'assurer une certaine stabilité sur terre. Des seuils ont été identifiés pour chacun des processus, en dessous de ceux-ci l'humanité se trouve dans un « espace opérationnel sûr » (Rockström *et al.*, 2009). Au-delà de ces seuils, les auteurs mettent en garde contre les dérèglements de certains phénomènes terrestres qui peuvent avoir des conséquences destructrices. Dès la première étude, les chercheurs ont souligné que l'humanité avait d'ores et déjà dépassé trois des frontières (le changement climatique, l'érosion de la biodiversité et le dérèglement du cycle de l'azote) et que quatre étaient proches des seuils. Mis à jour en 2023, six des neufs limites étaient alors dépassées (la pollution chimique, le

changement d'usage des sols et l'eau douce étant les trois nouvelles) (Richardson *et al.*, 2023).

La notion de dépassement, telle qu'évoquée dans le rapport LTG, s'associe à celle de l'effondrement. En effet, ce rapport anticipe les conséquences d'une consommation des ressources bien au-delà de ce que la planète peut offrir. La collapsologie, courant scientifique qui étudie les risques d'effondrement des sociétés humaines face aux limites planétaires, fait écho à ces préoccupations en soulignant la vulnérabilité de notre modèle de développement économique. En particulier, le jour du dépassement, qui marque le moment où l'humanité a consommé toutes les ressources que la planète peut nous renouveler en une année, est de plus en plus anticipé chaque année (Network, 2024). Les préoccupations soulevées dans le rapport LTG se trouvent ainsi largement vérifiées par les recherches actuelles. En effet, de nombreux travaux ont établi des liens clairs entre les activités humaines et les dérèglements climatiques et écologiques (Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), 2023 ; Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), 2019 ; U.S. Global Change Research Program (USGCRP), 2018).

Des économistes comme Herman Daly ou Kate Raworth remettent en question le fonctionnement du système économique. Daly parle de sous-système qui ne doit pas sortir des frontières du système dans lequel il est compris (c'est-à-dire que l'économie est un sous-système de la Terre). Il souligne que l'idée que l'argent peut régler tous nos problèmes n'est pas réelle et prône une « économie stable » (Daly, 1974). Raworth vient, quant à elle, construire un nouveau modèle qui est complémentaire, il s'agit de l'économie du Doughnut. Elle élargit la réflexion en incluant non seulement les limites écologiques mais aussi les limites sociales. Cette théorie est présentée à la section 1.3.3.

Le rapport LTG explore ainsi divers scénarios sur la base du système économique de l'époque avec ces taux de croissance du Produit Intérieur Brut (PIB) élevés. Les auteurs soulèvent la question de la capacité de la planète face aux modes de fonctionnement des êtres humains. Le phénomène de croissance exponentielle se retrouve ainsi dans les activités humaines provoquant des réactions similaires dans les dérèglements de la biosphère terrestre. Le modèle World3 utilisé dans le rapport est maintenant détaillé.

1.2.2 World3

Le modèle étudié dans ce mémoire correspond à celui présenté dans la dernière version de LTG c'est-à-dire le code World3-3. Ce modèle repose sur des équations différentielles qui décrivent les relations entre plusieurs variables globales. Celles-ci sont regroupées en cinq sous-systèmes interconnectés par une série d'équations :

- population mondiale : regroupe les variables liées à la population mondiale (comme la mortalité, le taux de fertilité ou bien l'espérance de vie). Ce sous-système montre comment la démographie évolue selon, entre autres, le taux de nourriture, la disponibilité des services de santé ou les conditions de vie ;
- production industrielle : représente la production mondiale, la consommation d'énergie et de ressources naturelles et les impacts associés ;
- agriculture : regroupe les variables liées à la production agricole, la consommation alimentaire, la gestion des terres arables et les interactions entre la production et la population ;
- pollution : indices de la pollution générée par l'activité industrielle et la consommation. Ce sous-système représente les limites de la planète ; au-delà d'un certain seuil, celle-ci n'est plus soutenable pour les populations et entraîne une dégradation des sols et de la santé ;
- ressources naturelles : comprend les ressources naturelles disponibles comme les métaux ou les combustibles fossiles.

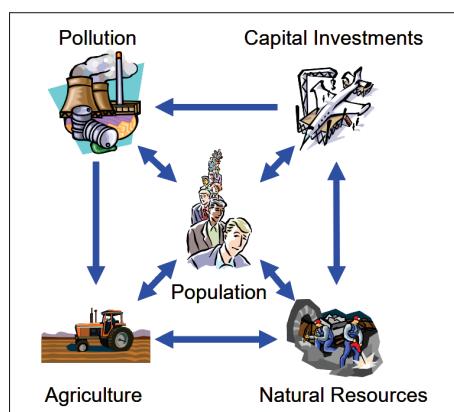


Figure 1.6 Représentation simplifiée des cinq sous-systèmes de World3
Tirée de Myrtevit (2005)

La structure simplifiée de ces cinq secteurs est détaillée dans la figure 1.6. Le schéma complet des interactions (graphique DYNAMO) est disponible en Annexe I, Figure I-1. Les flux sont nombreux dans World3, chaque boucle possède ses caractéristiques et est plus ou moins complexe. La figure 1.7 ne représente qu'une simplification des flux de capital physique dans l'économie sur World3. Certaines boucles fonctionnent à la manière d'un modèle proie-prédateur comme le capital et les ressources (Bardi, 2011). Ces dernières s'épuisent à mesure que le capital augmente, le forçant à ralentir. D'autres possèdent des retards dans leurs effets, comme les investissements industriels qui mettent plusieurs années avant d'avoir un impact sur le capital industriel.

Le modèle repose sur différentes hypothèses, les principales sont décrites ici :

- les ressources naturelles sont finies ;
- la population a tendance à croître naturellement et est impactée par les éléments extérieurs ;
- la production industrielle cherche toujours à croître ;
- la pollution a un impact négatif sur la santé et la productivité.

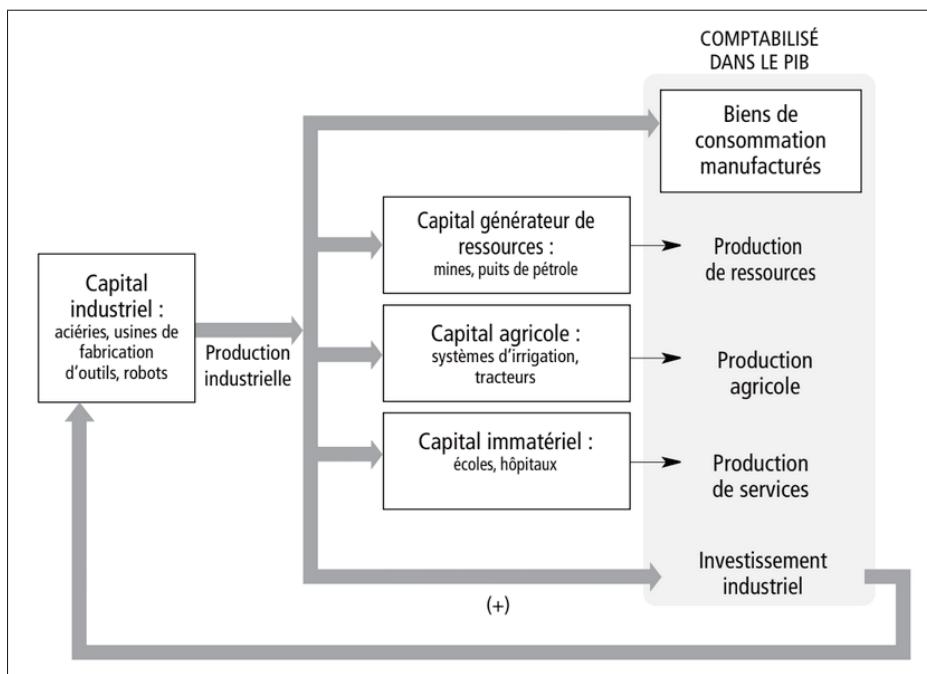


Figure 1.7 Représentation des flux du capital industriel dans l'économie selon le modèle World3
Tirée de Meadows *et al.* (2013)

La simulation prévoit ainsi l'évolution de ces variables sur une période de 200 ans (de 1900 à 2100). Les quelques 315 variables sont réparties en données de stock et de flux et deux d'entre elles ajoutées dans la dernière version concernent l'empreinte écologique et le niveau de bien-être. Pour parler des activités humaines sur la planète il est, en effet, intéressant de comprendre leur impact sur le bien-être humain d'une part et sur l'environnement d'une autre part. Afin d'intégrer des indicateurs représentatifs, Meadows *et al.* (2013) ont adapté les indicateurs du PNUD (UNDP). Ainsi, l'Indice de Développement Humain (IDH) a été transformé en Indice de Bien-être Humain (IBH), « qui est calculé en faisant la somme des indices d'espérance de vie, de niveau d'instruction et de PIB et en la divisant par trois » (Meadows *et al.*, 2013). L'empreinte écologique est elle inspirée du concept du même nom proposé par Wackernagel *et al.* (1999), qui est calculé en fonction de l'espace et des ressources naturelles nécessaires pour subvenir au mode de vie des personnes (Wackernagel *et al.*, 1999). Sur World3, l'empreinte écologique :

[...] équivaut à la somme de trois composantes : les terres arables utilisées pour la production agricole, les terres urbanisées utilisées pour les infrastructures de transport urbano-industriel et la quantité de terres d'absorption requise pour neutraliser les émissions de polluants, censée être proportionnelle au taux de génération de pollution persistante. Toutes ces surfaces sont mesurées en milliards [...] d'hectares. (Meadows *et al.*, 2013, p. 412)

Dans chacune des versions du rapport, divers scénarios ont été testés sous diverses hypothèses de départ. Le détail de chacun ainsi que leurs résultats sont expliqués dans la section suivante.

1.2.3 Scénarios et résultats

Le dernier rapport (Meadows *et al.*, 2013) propose dix scénarios pour explorer les conséquences des trajectoires des différents sous-systèmes sous différentes hypothèses. Ceux-ci sont souvent classés selon la manière dont ils répondent à la problématique posée par le scénario précédent. Toutes ces analyses viennent de la version du rapport mis à jour en 2002.

- le premier scénario, Business As Usual (BAU) suppose deux hypothèses : la croissance des ressources, de la population et de la production industrielle continue au rythme actuel

et sans restrictions volontaires ; les réserves naturelles non renouvelables sont au niveau les plus récemment évaluées. Comme visible sur la figure 1.8, les résultats indiquent une croissance de toutes les variables sauf la quantité de ressources non renouvelables qui chute progressivement à cause de leur exploitation croissante. Le maintien du flux de ressources exige des investissements croissants, réduisant ceux dans les autres secteurs et freinant la production industrielle et de services. Cette chute entraîne un effondrement du niveau de vie et de toutes les autres variables associées ;

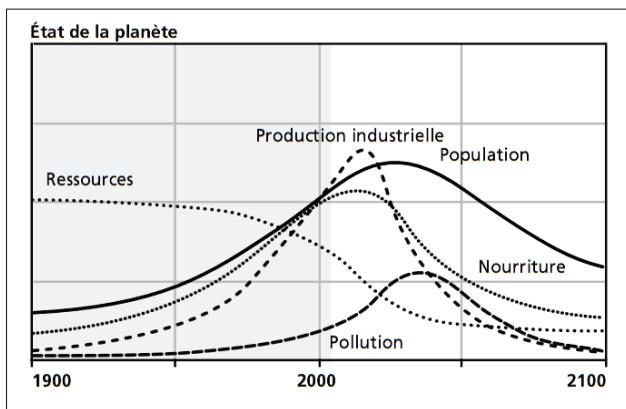


Figure 1.8 Résultat du scénario BAU
Tirée de Meadows *et al.* (2013)

- le deuxième scénario, Business As Usual 2 (BAU2), reprend le précédent, mais considère que la quantité initiale de ressources non renouvelables soit doublée et que des techniques d'extraction plus avancées permettent de retarder la hausse des coûts. Cela accorde un délai supplémentaire à l'évolution des autres variables, environ 20 ans de plus. Sous cette hypothèse ce n'est plus l'épuisement de ressources qui conduit à un effondrement mais la pollution. La dégradation des écosystèmes fait diminuer les rendements agricoles et engendre des problèmes de santé croissants, ce qui amène à une baisse de la démographie. L'augmentation des coûts pour répondre aux besoins alimentaires fait chuter la production industrielle. Comme le note Jancovici 2003, une baisse de la population due à une réduction du quota alimentaire par individu correspond à une « régulation par la famine ».

Pour tous les prochains scénario, « l'hypothèse qui [...] a servi de base pour le Scénario 2 [...

- c'est-à-dire] une plus grande quantité de ressources non renouvelables et des technologies d'extraction en constant progrès » est reprise (Meadows *et al.*, 2013) ;
- le troisième scénario, propose de répondre au problème que rencontre l'humanité dans le scénario précédent, c'est-à-dire, supposer que l'humanité a trouvé un moyen de diminuer la pollution engendrée par les activités économiques. Ce scénario introduit de nouvelles avancées technologiques qui permettent une diminution de plus en plus importante de la pollution produite par les activités industrielles et agricoles (jusqu'à 4 % par an). L'absence de limites entraîne une croissance incontrôlée de la population et de la production industrielle, épuisant progressivement les terres arables. Les surfaces cultivables se réduisent, soit en raison de leur conversion en zones urbaines ou industrielles, soit à cause de l'appauvrissement des sols dû à l'agriculture intensive. Pendant ce temps, la population continue d'augmenter, tandis que les ressources alimentaires diminuent (avec un effet retard). Une part croissante du capital doit alors être allouée à la production alimentaire, ce qui réduit les investissements industriels. Finalement, des famines provoquent une forte baisse démographique et un effondrement industriel. Ainsi, sous ces hypothèses, c'est la limite du « potentiel cultivable » qui déclenche cet effondrement (Meadows *et al.*, 2013).
 - Le quatrième scénario suppose des taux de développement technologique élevés qui permettent d'augmenter la productivité alimentaire de manière suffisante pour répondre à la demande en alimentation de la population (les rendements sont doublés) en plus de toutes les hypothèses précédentes. Les ressources naturelles n'étant pas un facteur limitant, la production industrielle par personne croît indéfiniment, de même que la population, car la productivité agricole produit les ressources nécessaires. Cependant, l'exploitation intensive des terres agricoles combinée aux pressions sur les sols par l'industrialisation et l'urbanisation entraîne une baisse de leur productivité. L'usage croissant d'engrais pour maintenir un niveau élevé de production sur les espaces restants accentue leur érosion. Le système agricole ne parvient pas à prévenir les pénuries alimentaires, ce qui mène à l'effondrement du système ;
 - le cinquième scénario ajoute, à l'amélioration des rendements agricoles, une protection contre l'érosion des sols. Contrairement aux scénarios précédents, les techniques agricoles employées sont plus durables et ne nécessitent pas d'importants investissements en capital. Ces

choix permettent de repousser l'effondrement du bien-être humain, pendant plusieurs années la pollution reste à un niveau gérable, la production agricole suffit à répondre aux besoins, et l'économie poursuit sa croissance. Toutefois, l'augmentation des coûts technologiques et l'épuisement des ressources non renouvelables, dont les prix grimpent, exigent des ressources financières que l'économie ne parvient plus à mobiliser. L'effondrement survient alors dû à de multiples crises (pénuries alimentaires, raréfaction des ressources, hausse des coûts) ;

- le scénario six, Comprehensive Technology (CT), est le dernier à tenter de répondre aux crises par l'accumulation de technologie. Les ressources non renouvelables sont plus importantes que dans le scénario de base, la pollution est contrôlée, les rendements agricoles sont améliorés et l'érosion des sols est stabilisée et on rajoute une technologie permettant une « utilisation efficiente des ressources » (Meadows *et al.*, 2013). Malheureusement toutes ces technologies ont un prix et leur mise en œuvre prend du temps. À terme, l'augmentation des coûts dans tous les domaines mène à un déclin mais pas à un effondrement ;
- le scénario sept propose alors une alternative, au lieu de répondre par la technologie les humains prennent conscience de la dégradation de la Terre et de la vie que leurs propres enfants auront. Ceci suppose alors un changement social qui implique d'avoir moins d'enfants pour garantir un certain niveau de vie à tous tout au long de leur vie et un accès à un contrôle des naissances. Dans le scénario, ceci se traduit par en moyenne deux enfants par couple à partir de 2002, il s'agit de la seule hypothèse ajoutée au scénario de base. La dynamique démographique évolue plus lentement, du fait de la structure par âges du modèle World3. Ce faible accroissement démographique permet la production industrielle de croître à un rythme soutenu jusqu'à ce quelle soit freinée par l'explosion de pollution et donc des coûts associés à sa maîtrise. Le résultat est donc le même que dans le scénario 2 ;
- le scénario huit ajoute au contrôle des naissances « une stabilisation [...] de sa production industrielle » (Meadows *et al.*, 2013). Dans ce scénario, la société fixe un certain niveau de production industrielle par habitant à ne pas dépasser. Cependant, l'augmentation de la pollution exerce une pression croissante sur les écosystèmes, en particulier sur les terres agricoles. Cette dégradation entraîne une chute significative de la production alimentaire, ce

qui a pour conséquence directe une diminution de l'espérance de vie, suivie d'un déclin de la population comme dans le scénario 2 ;

- le neuvième scénario, Stabilized World (SW), combine les solutions du scénario 8 avec celles du scénario 6 (amélioration des technologies contre la pollution et l'érosion des sols mais pour les rendements agricoles et l'utilisation efficace des ressources). Cette limitation de la population et de la production combinée aux solutions technologiques mène à un système stable avec un niveau de bien-être élevé et une empreinte écologique en baisse. L'équilibre du système est atteint (c'est-à-dire que « les boucles positives et négatives se compensent et que les [...] stocks du système [...] se maintiennent à un niveau assez constant » (Meadows *et al.*, 2013, p.354) ;

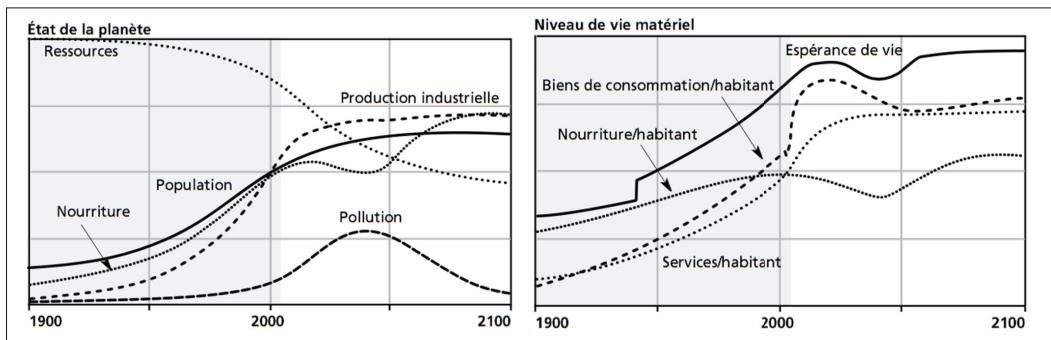


Figure 1.9 Résultat du scénario SW
Tirée de Meadows *et al.* (2013)

- le scénario dix atteint également l'équilibre et se trouve plus loin des limites du système. Les hypothèses sont les mêmes que pour le scénario 9, à savoir des politiques visant à préserver les ressources et à limiter les impacts environnementaux, mais celles-ci sont mises en œuvre 20 ans plus tôt. Malgré le fait que ce scénario ne soit plus réalisable, il est intéressant de noter que les indices comme « l'espérance de vie et la quantité de nourriture, de services et de biens de consommation par habitant » sont plus élevés que dans le scénario 9.

Ainsi, à moins d'une remise en question des objectifs de développement, les trajectoires simulées par World3 conduisent inévitablement à un effondrement de la démographie mondiale et de toutes les variables qui y touchent. La simple redéfinition des objectifs n'est pas non plus

suffisante à elle seule. Des solutions technologiques sont donc nécessaires mais pas suffisantes pour éviter un effondrement. Le rapport ne trouve que peu de solutions soutenables et enviables. Les scénarios ont ainsi proposé un ensemble de solutions à ces crises avec leurs conséquences potentielles dont deux évitent l'effondrement.

1.2.4 Comparaisons avec la réalité

Certains des scénarios décrits dans la section précédente ont été comparés à des données empiriques et à des observations réelles pour évaluer leur pertinence. Parmi les chercheurs ayant effectué ces comparaisons, on retrouve Turner (2008) et Herrington (2021), leurs résultats offrent une perspective importante sur la précision des prévisions du modèle.

Turner compare trois des scénarios de World3 à la réalité, il s'agit de BAU, CT et SW. Ceux-ci sont rapprochés avec des données empiriques des cinq sous-systèmes de World3 (à savoir la population, la production industrielle et alimentaire, la pollution, et la consommation de ressources non renouvelables). Étant donné que l'étude a été effectuée sur le modèle World3 de 1972, les variables sur le bien-être humain et l'empreinte environnementale des humains n'étaient donc pas présentes. L'étude révèle que les tendances de World3 suivent globalement l'évolution des données réelles. L'auteur rappelle tout de même que « même si la comparaison des résultats des scénarios avec les données historiques ne peut être interprétée comme une confirmation absolue du modèle, s'il y avait des défauts fondamentaux dans le modèle World3, les résultats des scénarios du modèle ne correspondraient probablement pas aussi bien aux données des longues séries chronologiques » (traduction libre, Turner, 2008). L'objectif de World3 n'est pas de fournir des prédictions précises mais d'étudier les effets potentiels de différentes hypothèses autant politiques que technologiques. Ainsi, Turner 2008 montre que les tendances historiques des variables sur la période 1970 à 2000 se rapprochent le plus des trajectoires présentées dans BAU. Le scénario CT semble quant à lui trop optimiste, la croissance des nombreuses variables est surestimée par rapport à la réalité. SW a des trajectoires très éloignées des données pour des variables clés comme les taux de services et de nourriture par habitant ou la pollution.

Dans sa comparaison, Herrington (2021) étudie quatre scénarios de World3-3 (modèle de 2012) à savoir BAU, BAU2, CT, SW. Les indicateurs de bien-être humain et de l'empreinte écologique sont donc présents dans ce travail. Mais l'évolution dans la manière de calculer ces deux indicateurs empêche de pouvoir les comparer avec les résultats de simulation. Jusque dans les années 2020, tous les scénarios suivent à peu près la même tendance pour la majorité des variables. Une fois la divergence atteinte, ce sont BAU2 et CT qui possèdent le plus de variables les plus proches de la réalité. Cependant, Herrington (2021) note également que certains aspects des prévisions du modèle ont été modérés par des avancées technologiques qui ont atténué les effets négatifs. À l'inverse, SW a le plus grand écart avec les données empiriques. Même si le scénario CT ne présente pas d'effondrement, le déclin y est bien présent et rien n'indique dans World3 que celui-ci ne sera pas suivi d'un effondrement. Herrington (2021) suggère ainsi de ne pas parier sur des changements technologiques qui risquent de ne pas arriver mais plutôt sur un changement profond des objectifs du système.

Les travaux de Turner (2008) et Herrington (2021) montrent que les scénarios de World3 ne sont pas seulement des prédictions théoriques mais des suggestions plausibles qui continuent de refléter les défis actuels. Les deux chercheurs ont montré par des preuves empiriques que les trajectoires des scénarios de World3 sont pertinentes. Les améliorations technologiques ne semblent pas suffisantes pour contrer les effets à long terme de la croissance exponentielle. L'humanité n'est donc pas sur une trajectoire soutenable mais il n'est pas trop tard pour amorcer des changements dans les valeurs sociales. Les deux chercheurs concluent que si aucune politique globale n'est mise en place pour limiter la croissance excessive et la consommation de ressources, la trajectoire de l'effondrement reste à considérer.

1.2.5 Limites, critiques et conclusion

Le rapport LTG a suscité une vive polémique à sa parution. Ce dernier et le modèle qu'il présente ont, ainsi, subi de nombreuses critiques à la fois sur un plan technique mais aussi politique. Par définition les modèles dynamiques sont incomplets et imparfaits, car ils doivent nécessairement faire des choix concernant les variables à inclure, leurs relations et les hypothèses

qui les sous-tendent. Les auteurs de LTG reconnaissent eux-mêmes des limites, notamment la simplification de certains processus complexes. Meadows *et al.* (p. 217, 2013) insistent d'ailleurs sur le fait que « [le] modèle planétaire, [n'a pas pour objectif de] livrer des prévisions précises, mais [de] comprendre dans les grandes lignes les tendances comportementales du système ». Ils soulignent ainsi eux-mêmes un certain nombre de limites comme :

- une simplification de la réalité : « Étant donné l'hétérogénéité de la société mondiale, des structures politiques nationales et des niveaux de développement – les conclusions de l'étude, bien qu'elles soient valides pour notre planète dans son ensemble, ne s'appliquent pas en détail à un pays ou à une région particulière » (traduction libre, Meadows *et al.*, 1972, p.188) ;
- la non-prise en compte des dynamiques de marché : seule l'économie physique, c'est-à-dire sur les ressources matérielles et les processus naturels soumis aux limites physiques de la planète est représentée. L'économie monétaire, « qui est une construction sociale indépendante des lois physiques » n'est pas modélisée (Meadows *et al.*, 2013, p. 80). Par conséquent, des concepts économiques tels que l'offre et la demande, ainsi que les fluctuations des marchés financiers et les risques de crises boursières, ne sont pas présents dans ce modèle, car ces phénomènes relèvent d'un système économique distinct qui opère en dehors des contraintes physiques de la Terre ;
- le manque d'intégration de dynamiques sociales : « intégrant très peu de limites sociales, World3 offre [. . .] un tableau trop optimiste des scénarios futurs. » (Meadows *et al.*, 2013, p.229).

Ces limites ont été reprises par certaines critiques et un certain rejet du livre LTG est né des analyses des données empiriques qui n'ont pas montré d'effondrement ou de diminution des ressources non renouvelables comme l'avait prédit le rapport (Lomborg & Rubin, 2002). Cependant, comme le note Herrington (2021), les graphiques des scénarios ne montrent pas d'effondrement avant l'an 2000.

Dans le même esprit, l'ouvrage *Models of Doom* publié en 1973, qui critique LTG, présente une analyse approfondie des faiblesses supposées du rapport. Ce livre met en avant deux principaux reproches : l'excès de pessimisme des hypothèses de départ et les erreurs perçues dans la

structure de World3. Par exemple, certains auteurs de *Models of Doom* estiment que le modèle a sous-estimé les capacités d'innovation technologique qui pourraient, selon eux, permettre de dépasser les limites des ressources naturelles. Leurs suggestions sur l'exploitation et la fertilisation des sols, en particulier australien, ou bien le forage profond de la croûte terrestre pour y exploiter les potentielles ressources sont, pour la plupart, non envisageables à l'heure actuelle (Bardi, 2011). Ces interrogations sur les hypothèses n'engagent pas la validité de World3, en effet, le fait que les ressources aient été, peut-être, sous-estimées ne signifie pas que le modèle est faux. D'autres contributeurs à *Models of Doom*, Cole et Curnow (1973) argumentent que World3 manque de flexibilité, notamment l'incapacité du modèle à fonctionner de manière rétrospective (c'est-à-dire à simuler le passé de façon fiable). Cela est perçu comme une faiblesse, mais, Bardi 2011 souligne que cela ne remet pas en cause la validité de LTG pour les prévisions futures. Concernant l'absence de mécanisme de prix régulateur, Solow (1973) et d'autres ont avancé qu'il s'agissait d'une faiblesse majeure de World3. En effet, d'après la théorie économique, des prix plus élevés incitent à substituer les ressources rares par d'autres alternatives technologiques. Ainsi, la diminution des ressources non renouvelables devrait entraîner une montée des prix, et les effets négatifs de la pollution pousseraient les gouvernements à instaurer davantage de régulations et à augmenter les taxes pour limiter ces externalités. Mais comme le note Herrington (2021), une étude de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) (2018) avance que les coûts sociaux liés à la pollution et à l'épuisement des ressources naturelles ne sont pas suffisamment pris en compte dans les taxes.

Enfin, Herrington (2021) identifie des critiques vis-à-vis de la sensibilité de World3. Des études soulignent, ainsi, que de petits changements de paramètres modifient dans certains cas la trajectoire d'un scénario de manière significative (Castro (2012); De Jongh (1978); Vermeulen & de Jongh (1976)). Cependant, les auteurs du livre LTG ont montré dans leur rapport technique que le dépassement et l'effondrement ne sont pas évités malgré la modification de paramètres (Meadows *et al.*, 1974).

Finalement, l'économiste William Nordhaus, a développé un autre modèle, Dynamic Integrated model of Climate and the Economy (DICE), pour proposer une alternative à World3. Nordhaus reproche à ce dernier de négliger le rôle des mécanismes de marché et des ajustements

technologiques dans la gestion des ressources et de l'environnement. En réponse à cette vision, DICE, est un modèle énergétique-économique-environnemental intégrant le changement climatique, mais en conservant l'idée que l'innovation technologique permettra de surmonter les obstacles liés à l'épuisement des ressources et aux changements environnementaux. Contrairement à celui du rapport Meadows, DICE est un modèle d'innovation continue et linéaire, alors que des changements radicaux et systémiques seraient nécessaires pour maintenir l'équilibre écologique à long terme.

Le rapport des limites à la croissance explore les conséquences d'une croissance exponentielle dans un monde aux ressources limitées. Le modèle qui y est présenté, World3, est un outil puissant pour explorer les dynamiques mondiales et comprendre les limites de la croissance. En intégrant des variables de stocks et de flux, des boucles de rétroaction et des retards temporels, il offre une vision systémique des défis environnementaux et économiques. Son objectif n'est pas de prédire le futur mais de simuler des scénarios selon différentes trajectoires possibles. Malgré cela, le rapport a été largement critiqué, en raison d'incompréhensions sur sa nature et ses hypothèses. Beaucoup lui ont reproché de négliger les innovations technologiques, les ajustements économiques, les aspects sociaux et son pessimisme. Toutefois, des analyses récentes, notamment celle de Gaya Herrington, ont montré que les tendances observées depuis les années 1970 concordent étroitement avec certains scénarios du modèle, notamment ceux menant à un déclin en l'absence de changement structurel. Le rapport Meadows, malgré ses imperfections, reste donc un outil puissant pour penser la durabilité et alerter sur les risques d'un développement incontrôlé.

1.3 Modèles complémentaires

1.3.1 Rapport du Club de Rome : Terre pour Tous

Le rapport *Terre pour tous* (2023) et le modèle E4A s'inscrivent dans une démarche qui cherche à repenser le développement économique et environnemental à une échelle planétaire, tout en

intégrant des enjeux sociaux et écologiques. Ce rapport du club de Rome, reprend les éléments de LTG en y intégrant un aspect social via deux indicateurs : le bien-être humain et les tensions sociales. Il suggère ainsi que l'effondrement peut également résulter des dynamiques et tensions sociales. Cependant, les approches et les scénarios proposés par ces rapports diffèrent à la fois sur les objectifs, les méthodologies et les solutions préconisées. Contrairement à LTG, qui étudiait l'influence de diverses hypothèses sur le système global, Terre pour tous (TpT) n'étudie que deux scénarios. Les analyses sont ainsi plus détaillées et des solutions politiques concrètes nécessaires à la transition sont expliquées. De plus, le livre met l'accent sur les aspects environnementaux, mais aussi les inégalités économiques et les dynamiques régionales. L'un des aspects clés du modèle est qu'il découpe le monde en cinq grandes régions (Afrique, Asie, Europe, Amérique du Nord et Amérique Latine), permettant d'adapter les solutions aux réalités spécifiques de chaque zone tout en poursuivant des objectifs globaux. Cette segmentation plus locale permet de tenir compte des disparités de développement, des défis locaux et des priorités spécifiques à chaque région, tout en offrant un cadre unifié pour les actions internationales. Les deux scénarios et leurs résultats respectifs sont les suivants :

- le premier appelé Trop Peu Trop Tard (TPTT) « envisage ce qu'il adviendrait si la politique économique continuait sur la même voie que celle suivie ces quarante dernières années » (Dixson-Declève *et al.*, 2022, p.7). Il envisage un futur où l'économie mondiale continue de croître, mais cette hausse se fait au détriment de la cohésion sociale, du bien-être humain et de la stabilité environnementale. La population globale atteint un pic de 9 milliards d'habitants avant de décliner, avec un vieillissement généralisé qui pèse sur les systèmes de santé et de travail. Bien que le PIB mondial augmente, notamment dans les pays à faible revenu, la pauvreté persiste et les inégalités se creusent, notamment en raison d'une progression lente dans les pays pauvres et des déséquilibres croissants dans les pays riches. La hausse des émissions de gaz à effet de serre continue, et la température planétaire pourrait dépasser 2,5 °C, entraînant des risques écologiques irréversibles. Les tensions sociales s'intensifient, augmentant les risques d'effondrements sociétaux régionaux, où les déstabilisations politiques et économiques compromettent la gestion des crises existentielles, comme le changement climatique. Toutefois, le scénario avertit que des réformes rapides et ambitieuses pourraient

encore permettre de stabiliser la situation, réduire l'extrême pauvreté et limiter l'élévation des températures sous 2 °C d'ici 2050 ;

- dans le second scénario, intitulé Pas de Géant (PdG), les auteurs imaginent que l'humanité met en place cinq changements de cap qu'ils ont identifiés. Ces points pivots reprennent les idées mises en avant par les 17 Objectifs de Développement Durable (ODD) de l'Organisation des Nations Unies (ONU), à savoir : éliminer la pauvreté, réduire les inégalités, autonomiser les femmes, transformer le système alimentaire et développer les énergies renouvelables. Ces mesures fortes mises en place efficacement permettraient d'atteindre des objectifs ambitieux de développement durable et de réduction des inégalités. D'ici 2060, la plupart des pays à faible revenu atteindraient un PIB de 15 000 dollars par personne. Ce succès serait soutenu par une réforme des institutions financières internationales et par des investissements dans les énergies renouvelables, la sécurité alimentaire durable et la protection du commerce. Le monde adopterait des mesures pour permettre de stabiliser la température mondiale en dessous de 2 °C. La croissance démographique culminerait à environ 8,5 milliards d'habitants vers 2040, avant de diminuer, et les investissements massifs dans la santé et l'éducation favoriseraient un développement rapide des pays à faible revenu. Ce scénario met l'accent sur le passage à une économie du bien-être, où la croissance du PIB n'est plus un objectif central, mais où des indicateurs sociaux et environnementaux deviennent les nouveaux repères du progrès. Des réformes fiscales progressives et la réduction des inégalités seraient essentielles pour atteindre un monde plus équitable. Une augmentation de l'investissement public et une plus grande égalité favoriseraient la confiance dans les gouvernements, permettant de mettre en œuvre des politiques de long terme. Le scénario repose sur l'idée de cinq changements de cap extraordinaires qui, mis en œuvre ensemble, créeraient des boucles de rétroaction positive, offrant une réponse systémique et cohérente aux crises mondiales. Ces changements combinés entraîneraient des solutions à long terme de nombreuses problématiques actuelles, les auteurs insistent sur cet effet systémique : « [...] les propositions politiques isolées ne suffisent pas à créer l'effet de levier nécessaire » (Dixson-Declève *et al.*, 2022, p.12).

1.3.2 Modèle dynamique HANDY

Le modèle Human And Nature Dynamics (HANDY) est un modèle mathématique développé en 2014 par Motesharrei, Rivas & Kalnay. Il vise à étudier les interactions entre les sociétés humaines et leur environnement, en particulier les risques d'effondrement. HANDY s'inspire historiquement de l'émergence de l'agriculture, avant son apparition les sociétés vivaient en harmonie relative avec leur environnement. En effet, leur mode de vie nomade permettait à la nature de se régénérer après leur passage. Avec l'avènement de l'agriculture, les humains se sont sédentarisés, exploitant de manière intensive des zones géographiques restreintes tout au long de l'année. Le développement des techniques de stockage a marqué un tournant décisif car il est devenu possible d'accumuler des ressources, assurant ainsi la survie des communautés même lors des mauvaises récoltes. Ce bouleversement a conduit à un changement structurel profond dans l'organisation des sociétés. C'est précisément ce concept de stockage des ressources qui a inspiré l'introduction de la variable W (Accumulated wealth) dans le modèle HANDY. Cette innovation a permis à HANDY d'offrir une approche novatrice pour modéliser les dynamiques complexes entre l'agriculture et les populations humaines. Ainsi, HANDY est composé de quatre variables :

- population des riches (élites) ;
- population des pauvres (travailleurs) ;
- ressources naturelles (ex. forêts, sols) ;
- richesse accumulée (capital, stocks).

Les équations différentielles du modèle HANDY simulent la consommation des ressources par les humains, la production économique, la répartition inégale des richesses et la régénération de la nature. Son fonctionnement repose sur l'interaction proie-prédateur. Ainsi, il est suggéré que l'effectif des élites agit comme des prédateurs sur les travailleurs. Et la population globale agit, elle, comme prédateur sur son environnement. La participation à la dégradation et les impacts subis par cette dégradation sont, bien évidemment, inégaux selon la classe de la population. Ceci permet de souligner l'aspect inégalitaire du système économique, les élites subissent moins les dégradations malgré le fait qu'elles y participent plus à cause de leur consommation plus

importante. Il est aussi supposé que le progrès technique ne compense pas toujours la dégradation écologique et que les élites résistent aux changements sociaux menaçant leur statut.

Le modèle proie-prédateur construit ainsi peut s'effondrer, ce qui représente une nouvelle approche (dans un modèle classique il n'y a pas d'effondrement possible). De plus, le système modélisé ainsi, suggère qu'il en existe deux types : « soit en raison d'une pénurie de main-d'œuvre (à la suite d'une famine induite par les inégalités), soit en raison d'une pénurie de nature (épuisement des ressources naturelles) » (traduction libre, Motesharrei *et al.*, 2014, p.6). Les auteurs distinguent les effondrements de type « L », causés par une élite trop nombreuse accaparant les ressources au détriment des travailleurs, et ceux de type « N », dus à l'épuisement des ressources naturelles (Motesharrei *et al.*, 2014, p.6)

Motesharrei *et al.* établissent un parallèle entre HANDY et différents épisodes historiques, notamment l'effondrement des Mayas dans le Yucatan, identifié par les auteurs d'effondrement « de Type-L », qui ne peut survenir que dans un contexte de fortes inégalités socio-économiques (Motesharrei *et al.*, 2014). Leur étude compare trois structures sociétales :

- une société inégalitaire (avec élites et travailleurs), vouée à l'effondrement sans réduction des disparités et maîtrise démographique ;
- une société égalitaire (sans élites), stable sauf en cas de surexploitation, même modérée, des ressources ;
- une société équitable intégrant des non-productifs (retraités, étudiants, ...), ceux-ci consomment comme des travailleurs mais ne produisent pas, qui peut maintenir son équilibre à condition de réguler strictement la pression sur les écosystèmes.

HANDY se distingue par son approche innovante, combinant une analyse des dynamiques sociales avec une classification rigoureuse des différents scénarios d'effondrement. Comme tout modèle, il fut critiqué notamment pour son détournement du système proie-prédateur qui sous-entendrait que les humains sont des cannibales. Sa simplicité impose de nuancer ses résultats, en effet, l'effondrement semble inévitable dès que certains seuils sont franchis, sans considérer les institutions politiques ou les mouvements sociaux comme variables correctrices.

Ce modèle s'ajoute à une longue liste de travaux cherchant à représenter les interactions entre humains et nature, ou à modéliser les systèmes économiques. Ces approches présentent chacune des forces et des limites. Cependant, un point commun émerge : aucune ne prend en compte le genre, la population est généralement segmentée en classe sociale ou par âge. Les dimensions liées au genre, à la race, à la religion ou à d'autres facteurs identitaires sont donc absentes. La section suivante, ne traite pas directement de modélisation systémique, mais explore plutôt des propositions de sociétés alternatives et des pistes de transformation structurelle.

1.3.3 Economie du doughnut, économie du bien-être, économie du bonheur, économie du soin et approche une santé

Face aux enjeux environnementaux et sociaux, de nouveaux modèles économiques émergent pour repenser la croissance, le progrès et le bien-être. Ces approches alternatives remettent en question le paradigme dominant fondé sur le PIB, la maximisation des profits et l'exploitation. Elles proposent à la place des cadres intégrant la justice sociale, la soutenabilité environnementale et la santé. Parmi ces modèles, l'économie du doughnut, l'économie du bien-être, l'économie du care, le concept une seule santé ou *One Health* en anglais. Ces modèles sont des invitations à la réflexion en offrant des perspectives complémentaires pour une transition vers des sociétés plus résilientes et équitables.

L'économie du doughnut, conceptualisée par K. Raworth (2022) définit un espace économique soutenable et juste situé entre deux frontières :

- un « plafond écologique » : qui correspond aux frontières planétaires à ne pas dépasser ;
- un « plancher social » : seuil minimal de satisfaction des besoins fondamentaux de l'humanité (accès à l'eau, à la santé, égalités, ...).

Cette approche permet de penser un développement qui ne sacrifie ni les conditions de vie des individus ni la santé de la planète. Elle promeut une économie régénérative et distributive, rejetant le dogme de la croissance infinie.

L'économie du bien-être ou *Well-being Economy* en anglais, dont Pigou est l'un des pionniers, vise à évaluer et améliorer le bien-être collectif à travers l'allocation optimale des ressources.

Pigou (1920) a notamment introduit la notion d'externalités, soulignant que certaines activités économiques peuvent avoir des effets positifs ou négatifs sur des tiers sans compensation monétaire. Selon lui, l'État devait intervenir, par exemple via des taxes ou des subventions, pour corriger ces défaillances du marché et rapprocher l'intérêt individuel de l'intérêt collectif. Ainsi, il s'agit d'une branche de l'économie qui cherche à maximiser le bien-être social en corrigeant les défaillances du marché, notamment à travers l'intervention de l'État. Cette théorie repose sur des critères plutôt objectifs (revenus, allocations de ressources, utilité théorique. . .), à l'inverse, **l'économie du bonheur** s'intéresse directement au ressenti subjectif des individus, notamment à travers des enquêtes de satisfaction de vie ou de bonheur déclaré. Cette approche remet en question le lien entre croissance du PIB et bonheur, soulignant l'importance de facteurs comme les relations sociales ou la qualité de l'environnement. Les politiques publiques s'en inspirent, comme le Bhoutan avec son indicateur du Bonheur National Brut (BNB). Cet indicateur privilégie des critères tels que la santé physique et mentale, l'égalité des chances, la cohésion sociale ou la durabilité environnementale.

L'économie des soins ou *économie du care* en anglais, met en lumière le travail souvent invisibilisé, et majoritairement assumé par les femmes, qui permet la reproduction sociale. C'est-à-dire le soin des enfants, des personnes âgées, les tâches domestiques, . . . Des économistes féministes comme Folbre et Nelson (2000) soulignent que ce secteur, bien que vital, est sous-évalué économiquement. Intégrer le *care* dans les politiques publiques implique notamment, une meilleure rémunération des métiers du soin et une redistribution plus équitable de ces tâches. Enfin, **l'approche une seule santé** ou *One Health* en anglais, reconnaît que la santé humaine dépend de celle des écosystèmes et des animaux. Les pandémies, les résistances aux antibiotiques et les crises sanitaires liées à la pollution illustrent cette interdépendance. Promu par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), la Food and Agriculture Organization of the United Nations ou Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) et l'Organisation Mondiale de la Santé Animale (OMSA) ce concept implique, notamment, la lutte contre la déforestation, une transition agroécologique, des politiques intégrées pour prévenir les crises sanitaires futures (INRAE, 2020).

Ces modèles se complètent pour proposer des alternatives à l'économie actuelle. Leur mise en œuvre nécessite une transformation profonde des indicateurs de richesse, des politiques publiques et des comportements individuels. En les combinant il devient possible d'envisager un équilibre véritablement durable. De plus, les concepts alternatifs présentés ici ne constituent pas une liste exhaustive ; d'autres approches complémentaires existent, bien que non développées dans le cadre de cette analyse.

1.4 La décroissance

La décroissance s'inscrit dans une critique radicale de la croissance économique comme finalité politique et sociale. Cette présentation de la décroissance s'appuie sur le livre *Guérir du mal de l'infini* de Y.M. Abraham publié en 2019. Alors que le PIB reste l'indicateur dominant de performance des économies modernes, la décroissance remet en question son pouvoir explicatif du bien-être et sa soutenabilité écologique. En effet, comme l'ont montré des auteurs tels que Georgescu-Roegen (1971) ou Latouche (2007), la croissance illimitée est incompatible avec la finitude des ressources naturelles et les capacités de régénération des écosystèmes. Les externalités négatives cumulées telles que les émissions de gaz à effet de serre (GES), l'érosion de la biodiversité ou l'extractivisme destructeur sont la conséquence logique d'un système fondé sur l'accumulation matérielle. À cela s'ajoute une critique sociale : la croissance profite principalement aux plus riches, accentuant les inégalités de revenu, de pouvoir et d'accès aux ressources (Chancel, Piketty, Saez & Zucman, 2021). Enfin, la croissance est aussi critiquée pour son effet aliénant, car elle impose des normes de performance et de consommation qui déqualifient les individus, les rendent dépendants des systèmes techniques et réduisent leur rôle à celui de simples rouages dans un monde qui les dépasse.

La décroissance propose alors un projet de société alternatif, non pas fondé sur la récession, mais sur la sobriété volontaire, la justice sociale et la relocalisation des activités. Il s'agit d'opérer une réduction planifiée de la production et de la consommation dans les pays riches, afin de respecter les frontières planétaires tout en améliorant la qualité de vie pour tous. Elle repose notamment sur la réduction du temps de travail, la relocalisation des systèmes alimentaires et énergétiques,

le ralentissement des rythmes de vie et la redéfinition des besoins. Au cœur de cette pensée se trouve aussi la valorisation des communs, il s'agit de ressources partagées autogérées par des communautés (comme l'eau, les terres, les savoirs ou des infrastructures collectives). Des chercheuses comme Ostrom (2015) voient les communs comme une alternative aux modèles gérés par l'État ou le marché, en mettant de l'avant une gestion collective par les communautés. La post-croissance ou l'après-croissance, constitue un prolongement de la critique de la croissance économique infinie, en proposant un horizon au-delà de la simple diminution du PIB. Ce courant de pensée remet en question l'idée que la prospérité dépend de l'accumulation de richesses matérielles, et propose de repenser l'économie autour de la soutenabilité, de la justice sociale et de la résilience. L'économie du doughnut développée par Kate Raworth en est une illustration : elle vise une économie stabilisée, respectueuse à la fois des besoins humains fondamentaux et des limites planétaires.

Cette approche reconnaît que le système économique dominant a influencé nos façons de penser, ce qui limite les alternatives possibles. Elle souligne donc l'importance de repenser, notamment, la propriété, les droits des travailleurs et la redistribution pour assurer une transition plus juste. Inspirée par les travaux systémiques de Meadows et al. (1972), la post-croissance souligne également que cette transition ne peut pas être uniforme : dans certaines régions, la croissance reste indispensable pour répondre à des besoins essentiels, tandis que dans d'autres, plus riches, une réduction de l'empreinte écologique est incontournable.

1.5 Le féminisme

Le féminisme constitue à la fois un mouvement social, une pensée politique, et un cadre théorique critique visant à analyser et déconstruire les rapports de pouvoir entre les sexes et les genres. Il ne s'agit pas uniquement de revendiquer l'égalité entre les femmes et les hommes, mais de remettre en question l'ensemble des structures, des normes et des représentations qui produisent et reproduisent des inégalités systémiques.

On définit souvent le sexe comme une réalité biologique binaire (mâle ou femelle). Les caractéristiques biologiques et physiologiques (chromosomes, organes génitaux) sont généralement

utilisées pour classer les individus à la naissance. Cependant, cette conception simplifiée est de plus en plus remise en question par les travaux scientifiques en biologie et en médecine. En réalité, le sexe est une catégorie biologique multidimensionnelle, qui englobe plusieurs niveaux (Testard-Vaillant, 2016) : génétique, gonadique, hormonal et anatomique. Ces dimensions ne coïncident pas toujours entre elles, et peuvent donner lieu à des situations dites intersexuées, dans lesquelles un individu présente des caractéristiques biologiques qui ne correspondent pas strictement aux définitions médicales traditionnelles de « mâle » ou de « femelle ». Ainsi, le sexe n'est pas strictement binaire, mais se situe sur un continuum, les travaux de la biologiste Fausto-Sterling (2000) ont commencé à le montrer. Bien que la majorité des personnes soient classées comme mâles ou femelles à la naissance, la diversité naturelle des corps humains montre que cette binarité est une simplification, utile dans certains contextes, mais insuffisante pour rendre compte de la complexité biologique réelle. Le genre, quant à lui, désigne une construction sociale et culturelle, qui attribue des rôles, des comportements, des identités et des attentes distincts selon que l'on est perçu comme homme ou femme. Le genre est donc une notion qui organise des relations de pouvoir, bien au-delà des différences biologiques, et qui touche aussi les domaines économiques, politiques, culturels et sociaux. Il est important de préciser que si ce mémoire adopte principalement une lecture binaire des rapports de genre, en se concentrant sur les catégories « femmes » et « hommes ». Cela ne reflète en rien une volonté d'exclusion des personnes non binaires, transgenres ou intersexes. Ce choix est motivé par une volonté de clarté analytique et de cohérence avec les sources mobilisées (qui ont une approche majoritairement binaire). Il s'agit d'un choix méthodologique, et non d'un positionnement politique ou identitaire restrictif.

Historiquement, les femmes ont été effacées des récits officiels, exclues des sphères du savoir, du pouvoir et de la citoyenneté. Leur rôle dans l'histoire, dans les sciences, les arts ou la politique a souvent été invisibilisé, minimisé ou attribué à des hommes. Le féminisme naît de cette injustice structurelle et se développe par vagues successives :

- la première vague (de la fin du XVIII^{ème} au début du XX^{ème} siècle) se concentre sur les droits civils et politiques, notamment le droit à l'éducation, au travail et au vote. Elle est portée par des figures comme Olympe de Gouges (1791), Mary Wollstonecraft ou les suffragettes ;

- la deuxième vague (années 1960 à 1980) élargit le combat aux droits sociaux, sexuels et reproductifs, en mettant l'accent sur le corps, la sexualité, la famille, et la critique du patriarcat. Elle affirme que « le privé est politique » et questionne la domination masculine dans la sphère intime et domestique ;
- la troisième vague (années 1990 à aujourd’hui) introduit une perspective intersectionnelle, en analysant la manière dont le genre croise d’autres rapports de pouvoir (comme les rapports de classe, race, sexualité ou handicap). Elle critique aussi les limites du féminisme blanc et occidental, et valorise la diversité des expériences féminines ;

Aujourd’hui, les féminismes forment un ensemble de pensées et de luttes hétérogènes, mais convergentes, qui visent à construire des sociétés plus justes, égalitaires et inclusives. Le féminisme, dans sa diversité, a développé de nombreuses approches critiques pour penser les mécanismes d’oppression, d’exploitation et de domination : le patriarcat, l’assignation des rôles genrés, la division sexuelle du travail, l’invisibilisation des contributions des femmes dans l’économie, ou encore les violences systémiques. Ces outils conceptuels permettent de mieux comprendre comment les rapports de genre interagissent avec d’autres rapports de pouvoir (classe, race, colonialité...), dans une logique intersectionnelle.

1.6 Inégalités

Les inégalités constituent des disparités structurelles qui affectent les individus en fonction de critères tels que le genre, l’origine ethnique, la classe sociale, la religion ou encore le statut migratoire. Ces inégalités peuvent être économiques, sociales, culturelles ou territoriales, et se manifestent à toutes les échelles : entre pays, au sein des sociétés, entre groupes sociaux, et parfois même à l’intérieur d’un même ménage.

À l’échelle mondiale, les inégalités de richesse sont particulièrement marquées. Le *Rapport sur les inégalités mondiales* révèle que les 10 % les plus riches captent à eux seuls 52 % du revenu mondial et détiennent 76 % du patrimoine total, tandis que la moitié la plus pauvre de la population mondiale ne perçoit que 8 % des revenus et ne possède que 2 % du patrimoine

(Chancel *et al.*, 2021). Cette concentration extrême des richesses s'est accentuée ces dernières décennies. En effet, depuis 1995, les 1 % les plus riches ont accaparé 38 % de l'ensemble de la croissance du patrimoine mondial, contre seulement 2 % pour les 50 % les plus pauvres (Chancel *et al.*, 2021).

Ces inégalités ne se limitent pas aux revenus ou à la richesse : elles affectent également l'accès à la santé, à l'éducation, à la justice, aux technologies, à un environnement sain ou à la mobilité. Elles se traduisent aussi dans la répartition des impacts du changement climatique. Les populations les plus vulnérables, souvent les moins responsables des émissions de gaz à effet de serre, en subissent les conséquences les plus graves (Guivarch & Taconet (2020), Chancel *et al.* (2021)). Ainsi, les inégalités apparaissent à la fois comme un symptôme d'un déséquilibre structurel et comme un obstacle à la stabilité sociale, à la cohésion globale et à toute perspective de développement durable.

1.6.1 Inégalités de genre

Parmi ces inégalités, celles fondées sur le genre sont particulièrement tenaces et transversales. Elles touchent l'ensemble des sphères de la vie : éducation, emploi, santé, sécurité, représentation politique, droits civils et sociaux. L'égalité entre les femmes et les hommes constitue à ce titre un enjeu majeur pour l'avenir. L'ODD n°5 de l'Agenda 2030 des Nations Unies vise explicitement à « parvenir à l'égalité des sexes et autonomiser toutes les femmes et les filles » (Bodiguel (2015)). Malgré les progrès réalisés, de nombreuses discriminations persistent, tant dans les lois que dans les normes sociales et les institutions économiques.

Le rapport 2024 d'Equal Measures 2030 alerte sur le fait qu'au rythme actuel, l'égalité de genre ne serait atteinte qu'au bout d'un siècle (EM2030 (2024)). Or, ces inégalités ne relèvent pas seulement d'injustices individuelles : elles compromettent aussi le progrès collectif en limitant l'autonomie des femmes, en restreignant leur participation économique et politique, et en fragilisant la résilience sociale face aux crises.

Un domaine emblématique de ces inégalités est celui du travail non rémunéré, souvent qualifié d'« invisible ». Il s'agit du travail domestique et des soins – prise en charge des enfants, des personnes âgées, malades ou dépendantes – majoritairement assumés par les femmes. Selon le rapport mondial 2023 de l'OCDE sur l'Indice des Institutions Sociales et de l'Égalité de Genre (SIGI), les femmes réalisent en moyenne 2,6 fois plus d'heures de travail non rémunéré que les hommes (OCDE). Ce déséquilibre entrave directement leur accès à un emploi rémunéré, réduit leur autonomie financière et limite leur participation à la vie publique. Il s'est particulièrement accentué lors de la pandémie de COVID-19, qui a renforcé les charges domestiques pesant sur les femmes (ONU (2020)).

Cette problématique est centrale dans les approches écoféministes, qui analysent les liens entre oppression des femmes et destruction de la nature. Ces approches dénoncent un système capitaliste et patriarcal reposant sur la dévalorisation du travail reproductif et la surexploitation des ressources naturelles (Mies, Shiva & Rubinstein (1998), Federici (2014)). Federici montre comment le capitalisme moderne a renforcé l'invisibilisation de ce travail, en le confinant à la sphère domestique, le rendant ainsi gratuit et non reconnu. Pour les écoféministes, ce travail est pourtant indispensable au maintien de la vie et devrait être considéré comme un bien commun.

L'écoféminisme propose de revaloriser le travail de soins dans les politiques publiques, en l'intégrant dans les indicateurs économiques, comme le PIB, et en assurant une redistribution équitable des tâches domestiques. Il appelle également à une transition écologique fondée sur la justice sociale, mettant les besoins des plus vulnérables au centre des politiques de transformation.

Réduire les inégalités de genre implique donc de reconnaître la valeur du travail non rémunéré, de le redistribuer équitablement et de concevoir des politiques adaptées pour garantir une réelle égalité des chances et des conditions de vie. Cela suppose une transformation en profondeur des rapports sociaux, des institutions et des modèles économiques.

1.6.2 Indicateurs de mesure des inégalités de genre

Les inégalités de genre sont un enjeu présent dans tous les domaines (économique, social, politique, ...). Pour les quantifier et les analyser, plusieurs indicateurs ont été développés, notamment par l'ONU. Avec son Agenda 2030, mis en place en 2015, l'ONU fixe des objectifs en matière de développement durable. En tout, 169 cibles ont été fixées et regroupées en 17 objectifs qui ont pour but d'améliorer les conditions de vie sur terre sans inégalités. Ces objectifs cherchent à répondre aux enjeux sociaux et environnementaux tout en assurant une croissance économique continue. On retrouve un certain nombre d'objectifs sociaux comme l'éradication de la pauvreté et de la faim, la fin des inégalités, mais aussi environnementaux avec la protection de la biodiversité terrestre et aquatique (ONU, 2015). Parmi ces objectifs, le numéro 5, vise à atteindre « l'égalité entre les sexes et [l'autonomie] de toutes les femmes et les filles » d'ici à 2030 (Bodiguel, 2015). Cet objectif s'appuie sur différents indices d'inégalités, tel que, les discriminations, les violences, la santé reproductive, les salaires, le travail domestique.

En 2024, le rapport sur l'Indice de Genre des ODD 2024, indique que l'égalité de genre ne sera pas atteinte avant un siècle si les tendances n'accélèrent pas (EM2030, 2024). Pour mesurer ces disparités, plusieurs outils ont été créés, certains des plus reconnus sont présentés par ordre chronologique avant une comparaison de leurs limites et apports. Seul une partie des indicateurs, qui peuvent être généralisés au niveau mondial, sont présentés ici, tous les indicateurs uniquement régionaux sont exclus d'office.

1.6.2.1 Indice de Développement de Genre (IDG)

Développé par le PNUD (UNDP) en 1995, cet indicateur vient compléter l'IDH en y intégrant une dimension genrée. Il permet de mesurer spécifiquement les disparités entre femmes et hommes concernant trois aspects fondamentaux du développement humain : l'espérance de vie, l'éducation (alphabétisation et scolarisation) et le niveau de vie (revenus par habitant) (UNDP, 2024a).

L'indicateur reprend la même méthode de calcul que l'IDH, puisqu'il calcule séparément pour les femmes et pour les hommes cette dernière variable. Le calcul s'effectue, ensuite, en faisant le

ratio entre les IDH pour chacun des genres. Ainsi, l'IDG démontre le fait que le développement ne profite pas de manière égale aux hommes et aux femmes. Si l'IDG est égal ou proche de 1, cela signifie que le développement profite de manière équitable aux deux sexes. En revanche, un score plus faible indique que les femmes bénéficient moins des progrès socio-économiques (UNDP, 2025a).

1.6.2.2 Indice d'Inégalité de Genre (IIG)

Élaboré par le PNUD (UNDP), cet indicateur mesure les inégalités de genre à travers trois dimensions principales : la santé reproductive (en prenant compte de la mortalité maternelle et du taux de fertilité des adolescentes), l'autonomisation des femmes (mesuré par le taux de sièges parlementaires occupés par des femmes et la part des femmes de 25 ans et plus ayant atteint au moins un niveau d'éducation secondaire) et le statut économique (par la participation au marché du travail et le taux d'activité de la population active chez les personnes âgées de 15 ans et plus). Il reflète le « [...] manque à gagner en termes de développement économique imputable aux inégalités de genre. » (OECD, 2015). Ainsi, plus l'indicateur se rapproche de 1, plus les inégalités sont fortes, tandis qu'un score proche de 0 indique une société plus égalitaire.

1.6.2.3 Indice d'Egalité de Genre (IEG)

Introduit en 2005 par l'European Institute for Gender Equality (EIGE) l'IEG donne un score entre 0 et 100 (égalité complète entre hommes et femmes) pour évaluer l'efficacité des politiques d'égalités entre les sexes. Il s'appuie sur six domaines : le travail, l'argent, la connaissance, le temps, le pouvoir et la santé. C'est un des rares indicateurs à prendre également en compte les violences contre les femmes et les inégalités cumulatives (European Institute for Gender Equality, 2024).

1.6.2.4 Indice Mondial d'Ecart entre les Sexes (IMES)

Créé en 2006 par le Forum économique mondial, cet indicateur mesure les progrès réalisés vers l'égalité des sexes dans quatre domaines principaux : les opportunités économiques, l'éducation, la santé et la représentation politique. L'IMES évalue la parité entre hommes et femmes en utilisant un score de parité calculé comme le ratio entre la valeur d'un indicateur pour les femmes et celle pour les hommes. Un score de 1 représente une parité totale, tandis qu'un score inférieur indique un écart. Cette méthodologie de mesure s'intéresse spécifiquement aux écarts plutôt qu'aux niveaux absous des ressources ou opportunités disponibles dans chaque pays, ainsi, le classement des pays est donné en fonction de leur proximité avec l'égalité des sexes plutôt qu'avec l'autonomisation des femmes (Kali Pal, Piaget, Zahidi & Baller, 2024, p.64).

1.6.2.5 SIGI

Le SIGI est un indicateur développé par l'OCDE pour évaluer les discriminations fondées sur le genre dans les lois, normes sociales et pratiques institutionnelles à travers le monde. Contrairement à d'autres indicateurs mesurant l'égalité femmes-hommes dans l'éducation ou l'emploi, le SIGI se concentre sur les barrières structurelles telles que les restrictions légales, les violences sexistes, l'accès limité aux ressources ou les stéréotypes ancrés. Il couvre quatre dimensions clés : discrimination dans la famille, intégrité physique restreinte, accès inéquitable aux ressources et libertés civiques limitées. Les pays sont classés sur une échelle de 0 (pas de discrimination) à 1 (discrimination élevée), permettant d'identifier les progrès et les obstacles persistants (OECD, 2023).

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour répondre à la problématique déterminée dans l'introduction, à savoir, l'intégration de variables sociales dans un modèle de dynamique des systèmes. Les hypothèses et les choix méthodologiques sont donc présentés avant de détailler les méthodes utilisées.

2.1 Choix méthodologique et hypothèses

Cette partie de la méthodologie présente les choix qui ont été faits pour répondre à la problématique. Tout d'abord, comme détaillé dans la revue de littérature, il existe plusieurs modèles Terre-Monde sur lesquels l'intégration de variable sociale serait pertinente. Le choix s'est finalement porté sur le modèle World3, car ses hypothèses sont étayées par des preuves empiriques (Turner (2008); Herrington (2021)). On utilise donc la dernière version du modèle développé par le MIT soit World3-3.

Ensuite, deux approches sont envisageables pour l'intégration des notions de genre dans ce modèle. Soit introduire une variable unique reflétant les inégalités de genre, soit segmenter la population modélisée. Le choix s'est porté sur la première option, plus cohérente avec la structure de World3. Une différenciation explicite entre hommes et femmes aurait été peu pertinente sur ce modèle car il n'a pas pour objectif d'analyser ces dynamiques sociales. En effet, il ignore des aspects importants de celles-ci comme le travail de soin. Bien qu'une segmentation par sexe aurait permis une analyse plus fine des inégalités, elle aurait dévié de l'objectif principal de ce mémoire : observer des tendances globales, les dynamiques variant considérablement selon les échelles et les individus.

Enfin, il faut identifier la variable la plus pertinente à intégrer dans World3 pour représenter les inégalités de genre. Parmi les nombreux indicateurs mondiaux disponibles, l'objectif est de retenir un critère unique, afin de simplifier son implémentation. Aucun indicateur n'étant parfait, chacun présente des atouts, des limites et un champ d'application spécifique. Le tableau 2.1 récapitule pour chaque indicateur ses principaux avantages et faiblesses. Cette analyse

comparative révèle que l'IIG, bien qu'imparfait, est le plus adapté pour explorer les corrélations entre inégalités de genre et développement humain. L'IIG est donc le choix le plus cohérent pour être intégré dans World3 car il regroupe plusieurs aspects importants des inégalités de genre en un seul indicateur, facile à utiliser dans un modèle systémique.

Tableau 2.1 Comparaison des principaux indicateurs d'inégalités de genre : forces et limites

Indicateur	Forces	Limites
IMES	- comparaisons internationales - prise en compte d'un large pan de domaines (économie, éducation, santé, politique)	- ne mesure pas les inégalités absolues - absence d'intersectionnalité - données incomplètes dans certains pays - surpondération de la participation politique
IIG	- intégration de la santé reproductive et de l'autonomisation - lien avec l'IDH	- omission des violences de genre - données de santé peu fiables pour certains pays - absence de mesure des normes sociales
IDG	- compare directement l'IDH entre hommes et femmes	- ne prends pas en compte les causes structurelles des écarts - ne couvre pas d'autres dimensions que l'IDH (éducation, santé, revenu)
SIGI	- mesure les discriminations légales et sociales - tient compte des normes, attitudes et pratiques sociales	- données qualitatives difficiles à standardiser - faible prise en compte des dimensions économiques et éducatives - biais culturels possibles concernant la définition des normes sexistes

Pour rester cohérent avec le modèle World3, l'IIG a donc été choisi comme indicateur principal, car il permet de mesurer les inégalités de genre sous plusieurs aspects, contrairement à l'IDG par exemple. En effet, l'IIG « est le seul à prendre en compte le niveau d'instruction, la participation économique et politique et les questions de santé spécifiquement féminines, le seul également à tenir compte d'inégalités concomitantes au niveau national » (UNDP, 2010, p.106). De plus, comme le souligne Gaëlle Ferrant (2010), l'IIG, contrairement à d'autres indicateurs composites, repose sur une approche non compensatoire. C'est-à-dire qu'une forte inégalité dans un domaine (par exemple, la mortalité maternelle) ne peut pas être équilibrée par des performances dans un

autre (comme l'éducation). Cette caractéristique en fait un outil particulièrement adapté pour révéler les disparités structurelles persistantes, notamment dans les pays en développement où les inégalités sont souvent cumulatives. On note tout de même qu'une combinaison d'indicateurs aurait pu affiner l'analyse, mais cette option n'a pas été retenue par manque de temps. Ce qui renforce le choix de l'IIG comme outil le plus adapté pour une modélisation des inégalités de genre dans le modèle du rapport LTG.

2.2 Outils et méthode de collecte de données

La dynamique des systèmes repose sur des logiciels spécialisés permettant de construire, simuler et analyser des modèles complexes. Pour des approches qualitatives, des outils comme Causal Loop Diagrams (CLD) ou Stock and Flow Diagrams aident à visualiser les boucles de rétroaction. Pour des simulations quantitatives, plusieurs logiciels sont couramment employés :

- **DYNAMO** (DYNAmic MOdels) : il s'agit du langage utilisé pour la première version de World3, il n'est aujourd'hui plus couramment utilisé et à laissé place à d'autres options ;
- **Vensim** : qui est, de nos jours, l'un des plus utilisés, il permet une modélisation intuitive avec une interface graphique ;
- **Stella Architect** : offre une approche visuelle avec des blocs de construction (stocks, flux, convertisseurs), idéal pour des modèles de complexité moyenne à élevée ;
- **Python** (avec des librairies comme PySD, SimPy, SciPy) : permet une modélisation plus flexible et programmatique ;
- **Insightmaker** : plateforme en ligne gratuite, adaptée aux modèles simples ou aux démonstrations interactives.

World3, initialement développé avec DYNAMO, a depuis été répliqué dans Vensim, Stella et Python avec des versions open access disponibles. Le choix de l'outil dépend des besoins du projet et de la facilité de prise en main de l'interface. Avec l'installation du logiciel Vensim, un certain nombre de projets sont disponibles, dont World3-3. Ainsi, c'est sur le modèle proposé par Vensim que le présent travail a été réalisé. Pour sa simplicité et sa documentation sur le fonctionnement du modèle, ce choix était le plus pertinent.

Les données utilisées sont récoltées sur différentes sources comme la Banque mondiale, l'ONU ou l'OCDE.

L'année 2015 a été retenue comme année de référence en raison de la stabilité relative de son contexte économique (sans récession mondiale ou crise systémique) et de la généralisées disponibilité de données sociales et économiques fiables. C'est aussi une année pour laquelle les principales bases de données internationales (comme celles du PNUD, de l'OMS ou de la Banque mondiale) proposent une couverture assez homogène, ce qui facilite les comparaisons entre pays et permet de calibrer le modèle sur des données représentatives.

2.3 Intégration de l'Indice d'Inégalité entre les Genres

Cette partie détaille la construction de l'IIG d'un point de vue mathématique et de son adaptation pour l'intégrer au modèle World3.

2.3.1 Composantes de l'IIG

Comme expliqué précédemment, l'IIG développé par le PNUD (UNDP) mesure les inégalités entre les sexes en se basant sur trois dimensions clés : la santé reproductive, l'autonomisation et la participation économique. Chaque dimension est évaluée à l'aide d'indices spécifiques (détaillés dans le rapport sur le développement humain (2025)) :

- Santé reproductive :
 - Taux de mortalité maternelle : nombre de décès liés à la grossesse pour 100000 naissances ;
 - Taux de fécondité des adolescentes : nombre de naissances chez les jeunes femmes âgées de 15 à 19 ans, rapporté à 1000 femmes du même groupe d'âge.
- Autonomisation :
 - Proportion de femmes siégeant au parlement : pourcentage de sièges parlementaires détenus par des femmes dans le parlement national ;
 - Niveau d'éducation (au moins secondaire) : proportion de la population âgée de 25 ans et plus ayant accédé à un niveau d'éducation secondaire (même sans l'avoir nécessairement terminé).

- Participation économique :
 - Taux de participation au marché du travail : pourcentage des personnes âgées de 15 ans et plus qui participent au marché du travail (en travaillant ou en recherchant activement un emploi) par rapport à l'ensemble de la population en âge de travailler.

Les notes techniques de rapport sur le développement humain (2024b) détaillent le calcul de l'IIG, le tableau 2.2 résume toutes les variables mises en jeu.

Tableau 2.2 Décomposition des dimensions de l'IIG

Dimension	Indicateur	Variable	Calcul
Santé reproductive (HI)	Taux de mortalité maternelle	MMR	$\frac{10}{MMR}$
	Taux de fécondité des adolescentes	AFR	$1 - AFR$
Autonomisation (EI)	Sièges parlementaires (%)	PR	$PR/100$
	Éducation secondaire (%)	SE	$SE/100$
Participation économique (WI)	Taux d'activité	LFPR	$\frac{LFPR_{femmes} + LFPR_{hommes}}{2}$

L'IIG est ici construit comme la moyenne géométrique des trois dimensions présentées plus haut : santé reproductive, autonomisation et participation économique. Qui sont elles-mêmes basées sur les indices définis par le PNUD (2024b) (voir tableau 2.2).

La formule est donc la suivante (équation 2.1) :

$$IIG(t) = 1 - \sqrt[3]{EI(t) * HI(t) * WI(t)} \quad (2.1)$$

où :

- $EI(t)$ est l'indicateur de santé spécifique aux femmes ;
- $HI(t)$ est l'indicateur d'autonomisation ;
- $WI(t)$ est l'indicateur de participation économique relative entre les deux sexes.

Chaque sous-indicateur est normalisé entre 0 et 1, conformément aux recommandations méthodologiques du PNUD. Le complément à 1 est utilisé pour faire en sorte que $IIG = 0$

corresponde à une égalité parfaite, et $IIG = 1$ à un niveau d'inégalité maximal.

Cette structure permet d'ajouter l'IIG dans World3 comme une variable synthétique, qui peut influencer d'autres éléments du modèle, comme le travail, les dépenses sociales ou le capital social.

2.3.2 Identification des variables pertinentes dans World3

L'intégration d'une variable d'inégalité de genre sur World3 nécessite donc un certain nombre de données qui ne sont pas encore modélisées dans le modèle. L'IIG se construit selon le schéma présenté dans la figure 2.1.

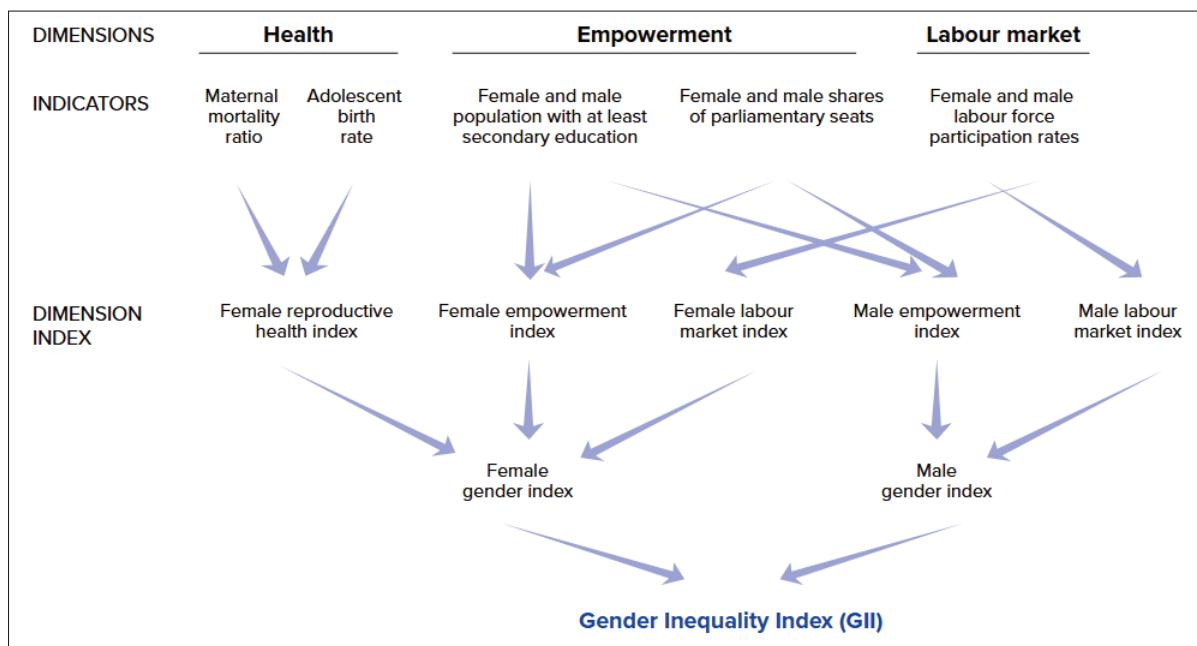


Figure 2.1 Structure de la variable IIG
Tirée de UNDP (2024b)

Aucune des données de base de la variable n'est présente sur le modèle dans sa dernière version. Il convient donc de les ajouter et de les lier aux autres variables selon qu'elles sont influencées par celles-ci dans un premier temps, puis qu'elles ont une influence sur celles-ci dans un second temps. Pour ce faire, nous nous appuyons sur des études économétriques et des revues

systémiques préalablement réalisées, afin d'identifier les causes et les conséquences de certaines variables et de mieux comprendre les interactions des systèmes.

2.3.3 Définition des relations causales

Certains facteurs influençant certaines variables ne sont pas intégrés dans le modèle World3 ; dans ces cas-là, ils sont simplement ignorés. Il est intéressant de souligner que l'absence de certains de ces facteurs reflète parfois une invisibilisation du genre au sein du modèle. Chaque indice de l'IIG est, ainsi, modélisé à travers des équations qui expriment ses relations avec les autres variables.

Lorsqu'une variable telle que la mortalité maternelle dépend de plusieurs autres, l'inférence statistique est habituellement utilisée pour étudier l'importance de chacun des facteurs. Ici, la complexité des relations entre les variables, leur interdépendance, ainsi que le manque de données empiriques pour certaines d'entre elles, rendent difficile une analyse statistique complète. De plus, bien que les statistiques permettent de vérifier des relations causales entre différentes données, l'objectif d'un modèle tel que World3 n'est pas d'avoir les équations les plus précises possibles. Ainsi, chaque relation est basée sur des études économétriques et statistiques qui ont déterminé des relations causales, mais ces liens sont simplement mis en corrélation sur le modèle. La méthodologie suivie est semblable à celle qu'ont suivie les auteurs du rapport LTG : « quantifier approximativement la relation de cause à effet à partir de ce que nous savons des faits physiques, biologiques et économiques qui les sous-tendent » (traduction libre, Meadows *et al.*, 1974, p.61). C'est-à-dire que la formalisation des équations suit le processus suivant :

- pour chaque variable de l'IIG, identification des principaux déterminants socio-économiques ;
- quantification de l'impact de chacun de ces déterminants séparément ;
- construction d'une équation basée sur les taux de variation et les interactions avec les autres variables.

En cohérence avec la structure de World3, ces variables sont souvent modélisées sous forme de stocks et flux. Cette approche permet de représenter des phénomènes qui évoluent dans le temps, comme l'augmentation du niveau d'éducation ou la mortalité, grâce à des boucles de rétroaction.

Par exemple, l'éducation secondaire des femmes peut être modélisée comme un stock qui croît en fonction d'un flux d'accès à l'éducation, lui-même influencé par des facteurs sociaux et économiques (tels que le revenu familial ou le taux de fécondité adolescente). Cette méthode stock-flux, caractéristique de la dynamique des systèmes, permet ainsi d'inscrire chaque variable dans un cadre temporel et interactif cohérent avec la logique de World3.

Enfin, les données de référence de la population utilisées dans le modèle correspondent, dans la plupart des cas, aux niveaux préindustriels, c'est-à-dire à une époque où les services d'éducation, de santé et d'approvisionnement alimentaire étaient proches du niveau de subsistance (Meadows *et al.*, 1974). Chaque section suivante détaille donc le calcul d'un paramètre de l'IIG en suivant cette méthode.

2.3.3.1 Taux de mortalité maternelle

La Classification internationale des maladies Onzième édition (CIM-11) définit le décès maternel comme « [...] le décès d'une femme pendant sa grossesse ou dans les 42 jours suivant une interruption de grossesse, quels que soient la durée et le siège de la grossesse, de toute cause liée ou aggravée par la grossesse ou sa prise en charge, mais non de causes accidentelles ou fortuites » (Organisation mondiale de la santé, 2022, p.303). Sur cette base, le taux de mortalité maternelle est défini comme « le nombre de décès maternels au cours d'une période donnée pour 100 000 femmes en âge de procréer, ou le nombre d'années où les femmes sont exposées à ces risques, au cours de la même période » (Ronsmans & Graham, 2006, traduction libre).

À l'échelle internationale, la mortalité maternelle reste un défi crucial en matière de santé publique. Un rapport du Guttmacher Institute (2020) souligne que la mise à disposition universelle de contraceptifs modernes et de soins essentiels pour les femmes enceintes et leurs nouveau-nés pourrait réduire les décès maternels de 62 %. Ce constat met en évidence le rôle central que joue la planification familiale dans l'amélioration de la santé maternelle.

Néanmoins, de nombreuses barrières continuent de limiter l'accès des femmes à des services de santé reproductive de qualité. Ces obstacles incluent notamment la pauvreté, les inégalités de genre, l'éducation, des pratiques traditionnelles dangereuses (mutilations génitales féminines) et

les mariages précoces. Dans de nombreuses régions en développement, ces réalités culturelles et sociales affectent de manière significative la santé des mères et de leurs nouveau-nés. Les données les plus récentes viennent appuyer cette situation préoccupante : selon l'OMS, plus de 90 % des décès maternels en 2023 sont survenus dans des pays à revenu faible ou intermédiaire inférieur (selon la classification de la banque mondiale) (WHO, UNICEF, UNFPA, Group & Division, 2025). Le rapport note aussi que la majorité de ces décès auraient pu être évités avec des soins appropriés (WHO *et al.*, 2025, p.9). Par ailleurs, d'après le Fonds des Nations Unies pour l'Enfance (UNICEF) et l'OMS (2024), ce sont surtout les femmes issues de milieux pauvres et isolés qui subissent les plus fortes inégalités d'accès à des services de santé adaptés.

Dans ce cadre, il apparaît indispensable d'examiner les multiples facteurs à l'origine de cette mortalité, qu'ils soient d'ordre personnel, culturel, sanitaire ou socio-économique afin de mieux orienter les politiques de prévention et garantir à chaque femme le droit à une grossesse et un accouchement en toute sécurité. De nombreuses études ont été réalisées dans cet objectif. On observe en effet que la mortalité maternelle ne dépend pas uniquement de la richesse d'un pays (Ronmans & Graham (2006) ; Roser & Ritchie (2013)). Bien qu'il existe une forte corrélation entre revenu et mortalité maternelle, certains pays en croissance économique n'ont pas réduit ce taux, ceci souligne l'importance d'autres facteurs comme l'accès aux soins et la nutrition (Roser & Ritchie, 2013). Le tableau 2.3 détaille les principaux déterminants de la mortalité maternelle identifiés dans la littérature. Les déterminants médicaux directs (hémorragies, infections. . .), c'est-à-dire les causes finales de la mortalité, ne sont pas étudiés ici, étant donné qu'il n'est pas possible d'agir directement sur elles, mais plutôt sur leur prise en charge et leur prévention.

La mortalité maternelle peut être abordée sous deux angles complémentaires : soit comme une sous-composante du taux de mortalité des femmes en âge de procréer (15 à 44 ans), soit comme un indice synthétique reflétant à la fois la qualité des soins de santé et l'émancipation des femmes dans une société. Dans le cadre de ce travail, c'est cette seconde approche qui a été retenue, car elle permet d'intégrer le taux de mortalité maternelle (MMR) sans modifier en profondeur la structure démographique du modèle World3.

Tableau 2.3 Déterminants de la mortalité maternelle selon différentes catégories

Catégorie	Déterminants	Sources
Systèmes de santé	Soins de mauvaise qualité	Hamal, Dieleman, De Brouwere & de Cock Buning (2020), Souza <i>et al.</i> (2024), WHO <i>et al.</i> (2025), Cresswell <i>et al.</i> (2025)
	Pénurie de personnel qualifié	Tajvar, Hajizadeh & Zalvand (2022), Souza <i>et al.</i> (2024), WHO <i>et al.</i> (2025)
Inégalités socio-économiques	Faible éducation maternelle	(Hamal <i>et al.</i> (2020), Tajvar <i>et al.</i> (2022), Ward, Atun, King, Dmello & Goldie (2024), Souza <i>et al.</i> (2024), WHO <i>et al.</i> (2025))
	Pauvreté des ménages	Ronsmans & Graham (2006), Hamal <i>et al.</i> (2020), Tajvar <i>et al.</i> (2022), Souza <i>et al.</i> (2024), WHO <i>et al.</i> (2025)
	Zones rurales éloignées	Ronsmans & Graham (2006), Hamal <i>et al.</i> (2020), Tajvar <i>et al.</i> (2022), Ward <i>et al.</i> (2024)
	Disponibilité alimentaire	Sajedinejad, Majdzadeh, Vedadhir, Tabatabaei & Mohammad (2015), Hamal <i>et al.</i> (2020), Barla (2022)
Genre et normes sociales	Inégalités de genre	Hamal <i>et al.</i> (2020), Souza <i>et al.</i> (2024), WHO <i>et al.</i> (2025)
Contexte politique et crises	Conflits et instabilité	Souza <i>et al.</i> (2024), WHO <i>et al.</i> (2025)
	Changements climatiques	Veenema, Hoepner & Geer (2023), Souza <i>et al.</i> (2024)
Facteurs médicaux	Âge maternel extrême	Hamal <i>et al.</i> (2020), Tajvar <i>et al.</i> (2022), WHO <i>et al.</i> (2025)
	Maladies sous-jacentes	Souza <i>et al.</i> (2024), WHO <i>et al.</i> (2025)
	Nombre de grossesses élevé	Hamal <i>et al.</i> (2020), Tajvar <i>et al.</i> (2022), WHO <i>et al.</i> (2025)
Conditions médicales	Complications (césariennes,...)	Hamal <i>et al.</i> (2020), Tajvar <i>et al.</i> (2022)

En effet, dans World3, les indices de santé reproductive ne sont pas représentés de manière explicite. Le seul levier en lien avec la reproduction est le contrôle des naissances, qui répond de manière endogène au taux de fertilité global, mais non à des objectifs de santé maternelle.

Or, dans la réalité, la réduction de la mortalité maternelle n'est que rarement un objectif central de ces politiques, elle résulte plutôt d'avancées en matière d'accès aux soins, de planification familiale, de réduction des inégalités sociales et d'éducation des femmes. Plusieurs déterminants du MMR identifiés précédemment ne sont pas modélisables directement dans World3. Cela justifie l'approche retenue ici, qui consiste à représenter cette mortalité comme une variable dépendant d'indices plus structurels, tels que les dépenses en santé et le niveau d'éducation des femmes, déjà présents dans le modèle.

Deux dimensions ont été retenues comme déterminants principaux : les dépenses de santé par habitant (EHSPC) et le ratio d'éducation secondaire entre les sexes (SER). La variable MMR est ainsi représentée dans le modèle par l'équation 2.2 suivante, où chaque facteur est intégré sous forme de multiplicateur agissant sur un taux de base (*MMRN*) :

$$MMR = MMRN * MMRMHS * MMRMSER \quad (2.2)$$

Où :

- *MMRN* le taux normal de mortalité maternelle ;
- *MMRMHS* le multiplicateur de la mortalité maternelle due aux dépenses en santé ;
- *MMRMSER* le multiplicateur de la mortalité maternelle due à l'éducation.

La mortalité maternelle de base correspond, ici, à une donnée arbitraire qui indique le taux de décès des mères dans une population sans accès à des soins de santé, sans moyen de contraception et avec des niveaux de vie sans excès. Cette donnée est basée sur des recherches historiques, les plus vieilles statistiques sur ce taux de mortalité datent du XVIII^{ème} siècle, en Suède, où on compte 1205 décès maternels pour 100 000 naissances vivantes (Högberg & Wall, 1986). Un chiffre représentatif des taux mondiaux avant les progrès de la médecine moderne et confirmé par des estimations dans d'autres régions du monde comme l'Angleterre (Reid, 2024). Ce nombre reflète les risques auxquels les femmes étaient exposées lors de l'accouchement, principalement à cause d'hémorragies, d'infections et de complications obstétricales, souvent aggravées par le manque de connaissances médicales.

Relation avec les dépenses de santé : Une première régression a été menée entre le MMR et l’indice de dépenses en santé EHSPC, mesuré en dollars constants par an et par habitant. Les données empiriques indiquent une relation logarithmique décroissante, comme illustrée sur la figure 2.2. À mesure que les dépenses augmentent, le MMR diminue fortement, surtout à faible niveau de départ, jusqu’à atteindre un plateau dans les pays à haut revenu. Cette relation est conforme à la littérature, qui souligne que les premiers gains en santé maternelle proviennent d’investissements de base dans les infrastructures de soins, la formation du personnel et l’accès aux équipements médicaux (Souza *et al.*, 2024; WHO *et al.*, 2025).

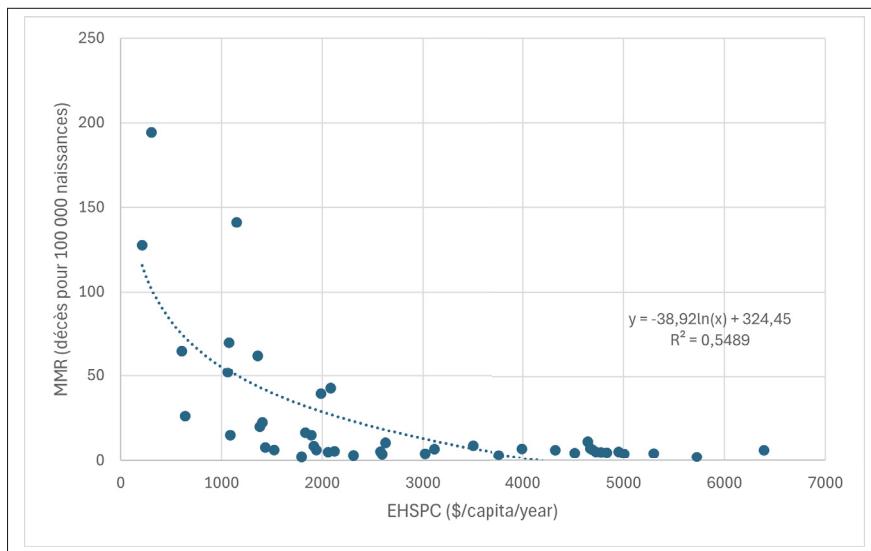


Figure 2.2 Relation pour différents pays entre la mortalité maternelle et les dépenses de santé par habitant (EHSPC) pour l'année 2015

La relation logarithmique est ici assez claire, ainsi le multiplicateur du ratio de la mortalité maternelle par les dépenses en santé suit cette tendance. La figure 2.3 représente l'évolution de ce multiplicateur selon les dépenses en santé.

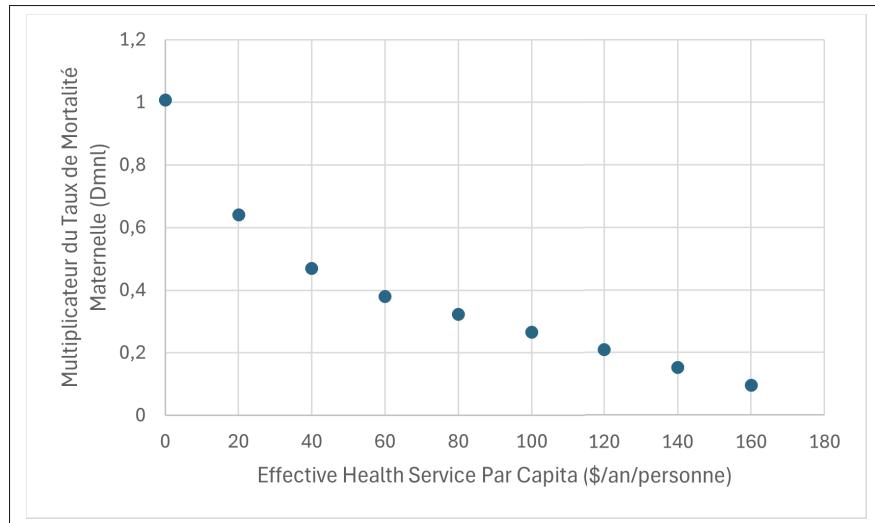


Figure 2.3 Multiplicateur de la mortalité maternelle par les dépenses en santé

Lien avec les inégalités d'accès à l'éducation : Un second facteur explicatif réside dans l'écart d'accès à l'éducation secondaire entre les femmes et les hommes (*SER*). Les inégalités éducatives limitent la capacité des femmes à accéder à des informations sur la santé reproductive, à différer les grossesses ou à demander des soins en cas de complications. La figure 2.4 illustre cette relation : plus le ratio femmes/hommes en éducation secondaire se rapproche de l'égalité, plus la mortalité maternelle diminue. Ainsi, pour le multiplicateur du ratio de la mortalité maternelle par l'écart en éducation, une relation linéaire décroissante a été estimée. Les données de ce multiplicateur sont détaillées dans la figure suivante (2.5)

Calibrage historique : Dans le scénario de base, le ratio de mortalité maternelle suit une trajectoire globalement cohérente avec la tendance historique observée entre 1985 et 2020 (voir figure 2.6). On observe une diminution progressive du nombre de décès maternels pour 100 000 naissances vivantes, atteignant un plancher autour des années 2020, avant une remontée dans la seconde moitié du XXI^{ème} siècle. Bien que les valeurs exactes diffèrent quelque peu entre le modèle et les données empiriques, les ordres de grandeur restent comparables.

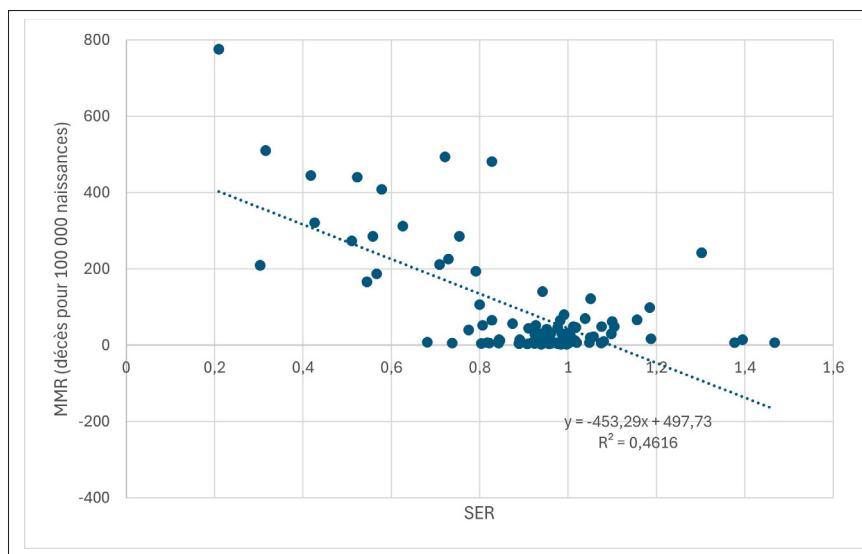


Figure 2.4 Relation pour différents pays entre la mortalité maternelle et le ratio femmes/hommes en éducation secondaire pour l'année 2015

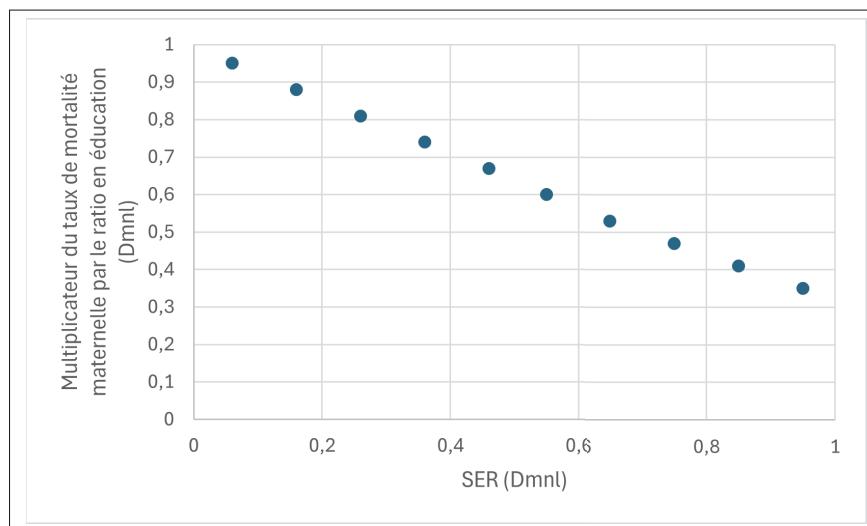


Figure 2.5 Multiplicateur de la mortalité maternelle par le ratio femmes/hommes en éducation secondaire (SER)

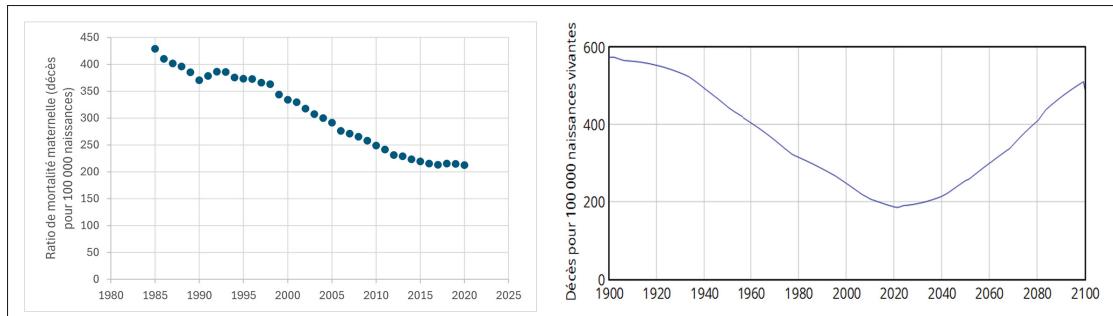


Figure 2.6 A droite : Évolution de la mortalité maternelle dans le monde (1985-2020). A gauche : Évolution de la mortalité maternelle dans le scénario 1

2.3.3.2 Taux de fécondité des adolescentes

La fécondité des adolescentes est un indice démographique et de santé publique qui mesure le nombre de naissances vivantes chez les jeunes femmes âgées de 15 à 19 ans pour une période donnée. L'AFR, correspond ainsi au nombre de naissances pour 1000 femmes dans cette tranche d'âge. Cet indice est particulièrement utilisé dans les politiques de santé reproductive pour évaluer les conditions d'accès à l'éducation et aux services de planification familiale.

Les grossesses précoces représentent un enjeu majeur en matière de santé, d'équité et de développement humain. D'après le Fonds des Nations Unies pour la population (2022), environ 21 millions d'adolescentes tombent enceintes chaque année dans les pays en développement, et près de la moitié de ces grossesses ne sont pas planifiées. La fécondité adolescente est ainsi à la croisée de plusieurs dynamiques structurelles : pauvreté, inégalités de genre, normes sociales patriarcales, mariage précoce et accès restreint à l'éducation ou aux soins médicaux.

Plusieurs déterminants interdépendants influencent la fécondité des adolescentes. Le tableau 2.4 récapitule les principaux facteurs identifiés dans la littérature scientifique :

Le rapport conjoint de l'OMS et de l'UNICEF (2025) indique que les adolescentes vivant dans des environnements cumulant pauvreté, isolement géographique et discriminations sont les plus exposées aux grossesses précoces. Ces contextes défavorables se traduisent par un accès réduit à l'information, à la contraception moderne et aux services de santé, renforçant les risques sanitaires et sociaux associés.

Tableau 2.4 Déterminants de la fécondité des adolescentes

Catégorie	Déterminants identifiés
Accès à l'éducation	Faible scolarisation des filles, abandon scolaire lié au genre (Moumen, 2023)
Services de santé	Accès limité à la contraception, absence de services adaptés aux jeunes (Woog, Singh, Browne & Philbin, 2015)
Normes sociales et mariages précoce	Mariage avant 18 ans, injonctions sociales à la maternité précoce (Bank (2023), OMS (2024))
Pauvreté et marginalisation	Revenus faibles, zones rurales isolées, absence de perspectives économiques (OMS, 2024)

Depuis la fin des années 1990, la moyenne mondiale de fécondité des adolescentes a connu une diminution régulière. Comme illustré à la figure 2.7, l'AFR mondial est passé d'environ 65 naissances pour 1000 adolescentes en 2000 à 42 en 2022. Cette baisse s'explique en partie par l'augmentation de la scolarisation des filles, la diffusion de la contraception et les politiques publiques de prévention. Toutefois, les écarts entre pays restent importants.

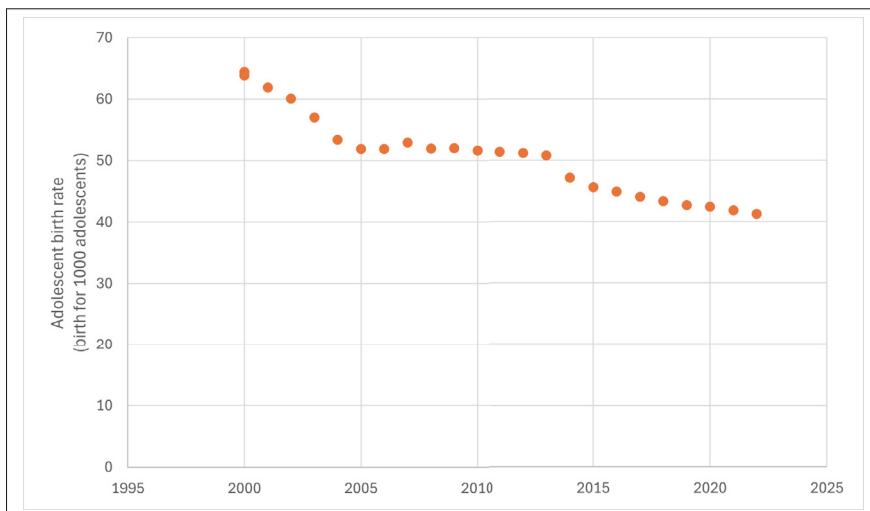


Figure 2.7 Évolution de la fécondité des adolescentes dans le monde (2000-2022)

Ainsi, la fécondité adolescente est représentée dans le modèle par une équation simplifiée (voir équation 2.3) mais cohérente avec les dynamiques structurelles modélisables :

$$AFR = AFRN * AFRMSE * AFRMHS \quad (2.3)$$

où :

- $AFRN$ est le taux de base de fécondité adolescente ;
- $AFRMSE$ est un multiplicateur reflétant l'effet du ratio femme/homme en éducation secondaire (SER) sur la réduction de la fécondité adolescente ;
- $AFRMHS$ est un multiplicateur lié aux dépenses de santé par habitant, traduisant l'effet de l'accès aux soins et à la contraception sur la baisse de l'AFR.

Cette formulation permet d'intégrer les principaux leviers de réduction de l'AFR dans une dynamique cohérente avec le reste du modèle.

Dans cette modélisation, le taux de base $AFRN$ est fixé à 200 naissances pour 1000 adolescentes, en référence à des contextes extrêmes de précarité sanitaire et sociale. Ce choix s'inscrit dans la logique de World3, où les taux de base sont généralement définis pour représenter des situations de référence fortement dégradées (absence d'éducation, de services de santé reproductive, pauvreté généralisée). L'objectif est de permettre ensuite aux multiplicateurs de traduire les effets positifs du développement et des politiques publiques.

Aucune donnée systématique datant d'avant les années 2000 n'a été identifiée. Cette valeur est néanmoins cohérente avec ce que la littérature historique met en évidence pour certaines régions du monde. Des travaux consacrés à l'Afrique subsaharienne montrent que, dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, les taux de fécondité adolescente dépassaient régulièrement les 180 à 200 naissances pour 1000 adolescentes, en particulier dans des contextes marqués par une faible scolarisation féminine et l'absence de services de santé reproductive adaptés (Garbett, Perelli-Harris & Neal (2021), Bledsoe & Cohen (1993)).

Ainsi, en fixant ce taux de base élevé, le modèle peut générer de manière cohérente une réduction crédible de l'AFR en fonction de l'amélioration des déterminants comme l'éducation (SER) et les services de santé ($EHSPC$). Il est cependant, possible que ce taux soit plus élevé, en effet, dans certaines situations, l'AFR réel peut être supérieur à la référence. Ce cas de figure est, à priori, rare, mais modélisé pour assurer la flexibilité de la dynamique du modèle. C'est pourquoi

les multiplicateurs, détaillés dans le paragraphe suivant peuvent dépasser 1 dans les premières valeurs des courbes.

Inégalités d'éducation : Parmi les facteurs les plus corrélés à la fertilité des adolescentes, le ratio d'éducation secondaire entre femmes et hommes (*SER*) joue un rôle central. Comme illustré à la figure 2.8, une forte inégalité d'accès à l'éducation secondaire en défaveur des filles est associée à des taux élevés de grossesse adolescente. La relation suit une courbe exponentiellement décroissante, ce qui suggère qu'une amélioration, même faible, de la parité en éducation peut entraîner une diminution significative de l'AFR.

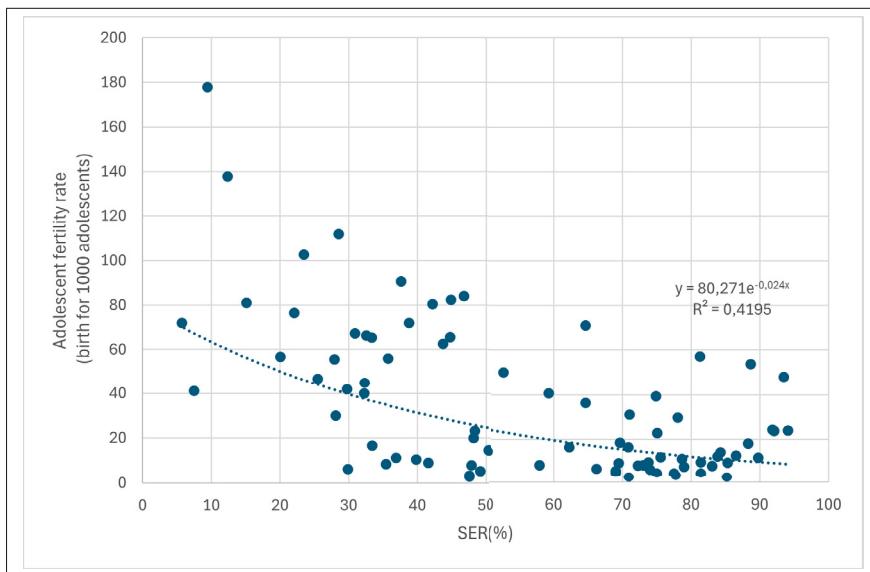


Figure 2.8 Fécondité des adolescentes selon le ratio femme/homme en éducation secondaire pour différents pays pour l'année 2015

La figure 2.9 montre la relation entre le ratio femme/homme en éducation secondaire (*SER*) et le multiplicateur associé *AFRM SER*. On observe bien que plus on se rapproche de la parité dans l'accès à l'éducation, plus le multiplicateur diminue.

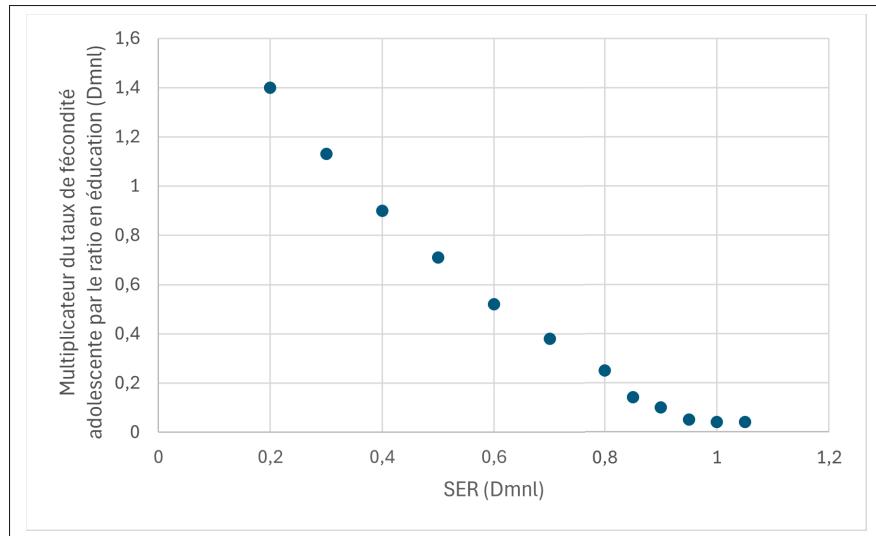


Figure 2.9 Multiplicateur de la fécondité adolescente par le ratio d'éducation secondaire femme/homme (AFRM SER)

Services de santé : Un second déterminant important du taux de grossesse adolescente est l'accès aux services de santé, en particulier aux soins reproductifs. La figure 2.10 montre la relation inverse entre les dépenses de santé par habitant et l'AFR : les pays investissant davantage dans la santé présentent généralement une fécondité adolescente plus faible.

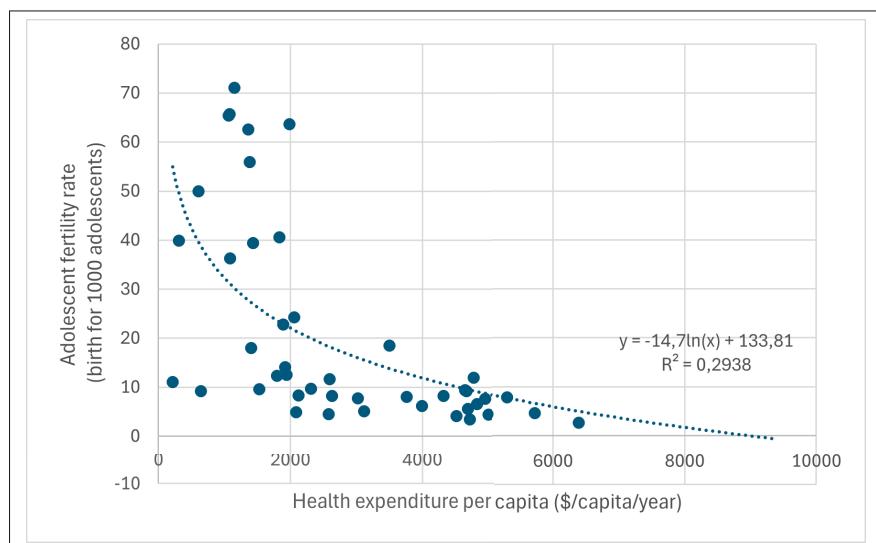


Figure 2.10 Fécondité des adolescentes selon les dépenses de santé par habitant pour différents pays pour l'année 2015

La figure 2.11 illustre le multiplicateur de la fécondité adolescente de base en fonction des dépenses de santé par habitant (*Afrmhs*). Elle montre que l'impact des premières dépenses est significatif, mais que les rendements deviennent progressivement décroissants. Le multiplicateur tend à se stabiliser autour de valeurs basses, ce qui reflète une saturation dans les effets des dépenses en santé sur la fécondité adolescente.

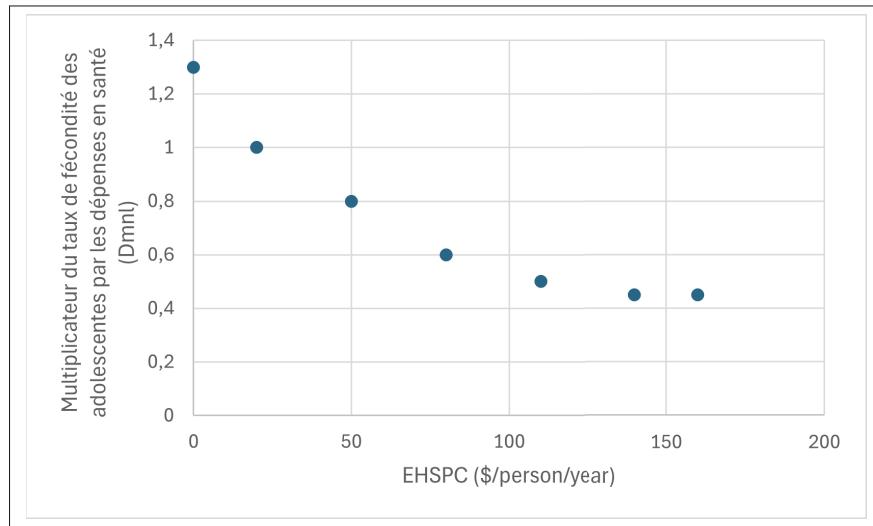


Figure 2.11 Multiplicateur de la fécondité adolescente selon les dépenses de santé par habitant (*Afrmhs*)

Indicateur de santé

Finalement, l'indicateur de santé propre à l'IIG (HI (Dimensionless (Dmnl))) est intégré dans World3 avec l'équation 2.4.

$$HI = \left(\sqrt{\frac{10}{MMR} * \frac{1}{AFR}} + 1 \right) * \frac{1}{2} \quad (2.4)$$

Pour le scénario de base, on obtient la courbe suivante (figure 2.12) :

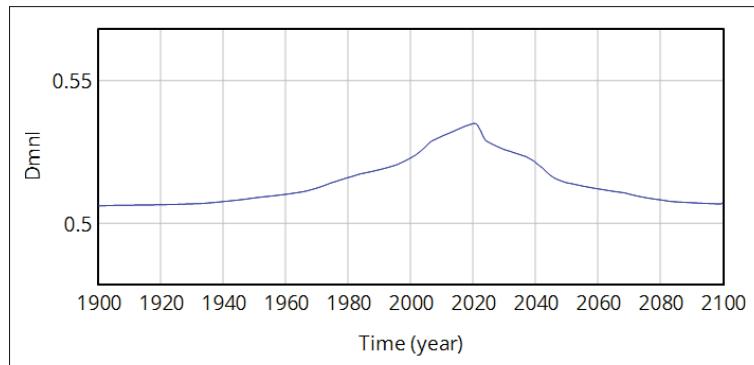


Figure 2.12 Indicateur de santé simulé par le scénario 1

La tendance depuis les années 2000 correspond à ce qu'on peut calculer dans la réalité (figure 2.13). Une légère augmentation de l'indicateur jusque dans les années 2020.

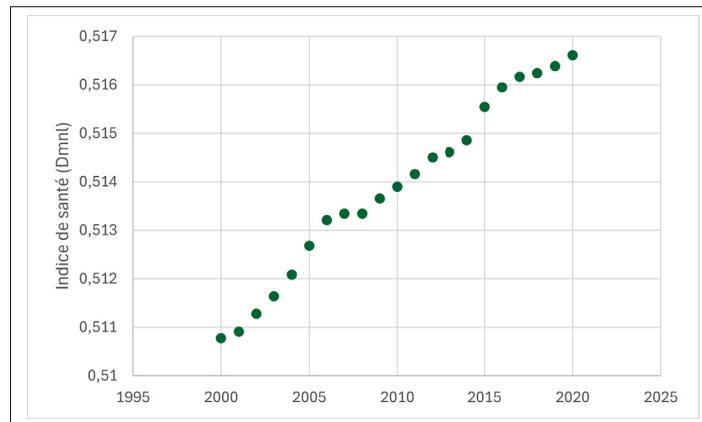


Figure 2.13 Calcul de l'indicateur de santé au niveau mondial avec les données empiriques

2.3.3.3 Sièges parlementaires

La représentation politique des femmes constitue un indice fondamental de l'égalité des genres dans les sphères décisionnelles. Selon l'Union interparlementaire (UIP), elle se mesure par la part des sièges occupés par des femmes dans les chambres basses ou uniques des parlements nationaux (IPU, 2024). Cet indice est mobilisé par le PNUD (UNDP) dans le calcul de l'Indice d'inégalités de genre (IIG), dans la dimension d'autonomisation des femmes.

Malgré des progrès constants au cours des dernières décennies, les femmes demeurent sous-représentées dans les institutions législatives à l'échelle mondiale. La figure 2.14 illustre cette évolution depuis la fin des années 1990. En 1997, les femmes n'occupaient en moyenne que 12 % des sièges parlementaires. En 2024, cette proportion atteint 26,9 %, soit une multiplication par plus de deux en 25 ans. Cette progression traduit des avancées institutionnelles (quotas, campagnes de sensibilisation, mobilisation féministe), mais reste insuffisante au regard de la parité.

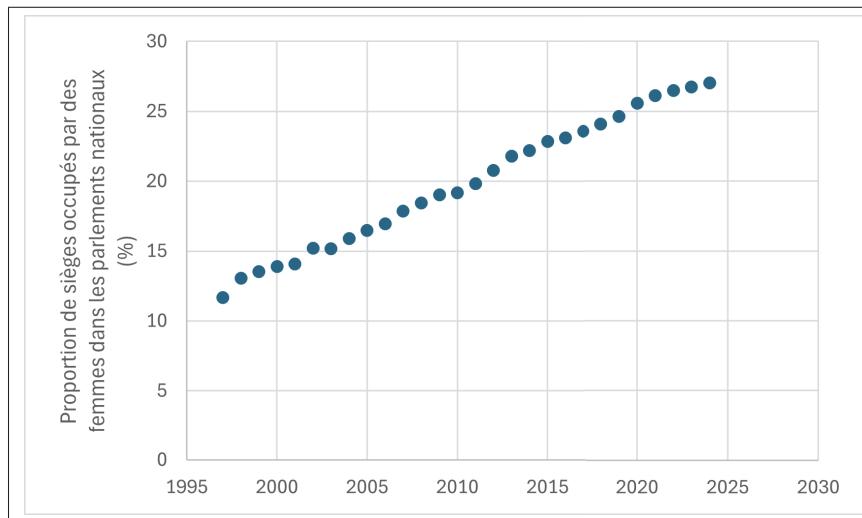


Figure 2.14 Évolution de la part des femmes dans les parlements nationaux (1997 à 2024)

Déterminants de la représentation féminine : De nombreuses études ont cherché à identifier les facteurs expliquant les écarts de représentation entre pays. Trois catégories principales ressortent :

- déterminants politiques : Les systèmes électoraux de type proportionnel sont généralement plus favorables à la représentation féminine que les systèmes majoritaires. De même, les partis progressistes tendent à présenter davantage de femmes (Kenworthy & Malami, 1999). L'ancienneté du droit de vote pour les femmes joue également un rôle ;
- déterminants socio-économiques : Le niveau d'éducation des femmes, leur insertion dans le marché du travail ou encore leur autonomie économique sont corrélés positivement à leur représentation politique (Bravo-Ortega, Eterovic & Paredes, 2020) ;
- déterminants culturels : Les normes de genre, stéréotypes sexistes et attitudes à l'égard des femmes en politique constituent des freins majeurs à l'égalité de représentation (Kenworthy & Malami, 1999).

Dans World3, seule une partie de ces déterminants est représentée. Le seul indice utilisé ici est donc la part des femmes dans la population active. Ce choix repose tout d'abord sur la disponibilité des données dans le modèle et aussi sur l'idée que plus les femmes sont intégrées dans la sphère économique, plus leur visibilité, leur influence et leur pouvoir politique sont susceptibles de croître. C'est-à-dire que la sphère professionnelle est un levier d'émancipation vers la sphère décisionnelle.

Le taux de représentation des femmes dans les parlements (*WRP*) suit donc l'équation 2.5 suivante :

$$WRP = WRPN * WRPMLFPR \quad (2.5)$$

où :

- *WRPN* est le taux de base de représentation féminine au sein des parlements ;
- *WRPMLFPR* est un multiplicateur reflétant l'effet de la participation économique des femmes (*LFPR*) sur leur présence dans les sphères décisionnelles.

Dans cette modélisation, le taux de base *WRPN* est fixé à 3 % de femmes parlementaires, ce qui correspond à l'ordre de grandeur observé dans les sociétés occidentales fortement industrialisées après la Seconde Guerre mondiale. Par exemple, lors de l'élection britannique en 1979, 19 femmes furent élues à la Chambre des communes, ce qui représente exactement 3 % des sièges totaux à cette époque (Barton, Audickas, Cracknell & Tunnicliffe, 2022). De façon plus large, les données historiques de l'UIP montrent qu'entre 1945 et les années 1970, la proportion de femmes élues dans la plupart des parlements nationaux est restée inférieure à 5 % (IPU, 2019). Le choix de ce seuil permet ainsi de refléter la réalité institutionnelle des pays structurés selon le modèle occidentalisé du XX^{ème} siècle, où la représentation politique des femmes a été longtemps marginale.

La relation empirique pour un ensemble de pays pour l'année 2015 entre la proportion des sièges parlementaires occupés par des femmes selon leur représentation dans la population active est présenté dans la figure 2.15. Bien que la corrélation soit modeste, une tendance positive est observable. Une approximation linéaire a donc été retenue pour formaliser cette tendance et permettre son intégration au sein du modèle. Le multiplicateur utilisé pour simuler l'effet de la proportion des femmes dans la population active sur la part des femmes au parlement a été construit à partir de cette régression. La relation captée permet de rendre compte des inégalités persistantes : une augmentation de la présence des femmes dans l'économie formelle ne se traduit pas automatiquement par une représentation politique équivalente, mais en crée les conditions.

Calibrage historique : Dans le scénario de base (scénario 1, BAU), les ordres de grandeur et la tendance de la proportion de femmes dans les parlements correspondent à ce qu'on observe historiquement entre 1997 et 2024 (figure 2.16).

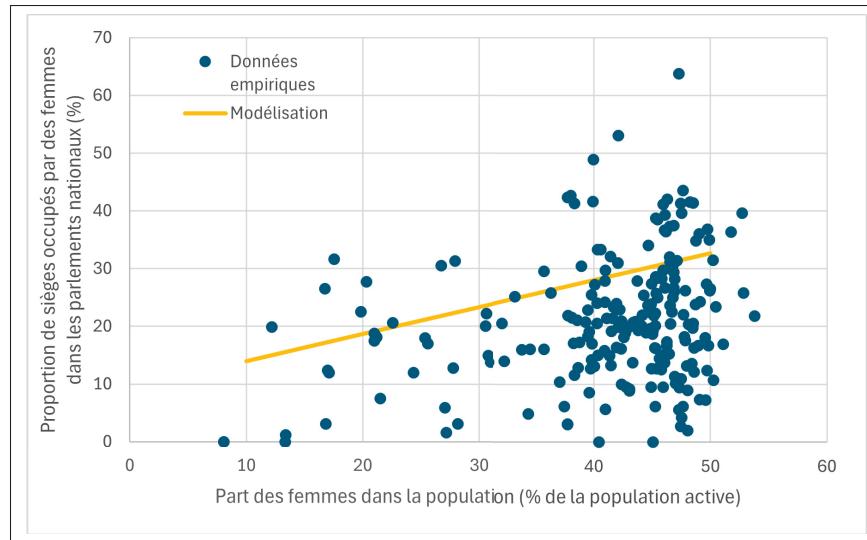


Figure 2.15 Proportion de sièges occupés par des femmes selon la part des femmes dans la population active (données de 2015)

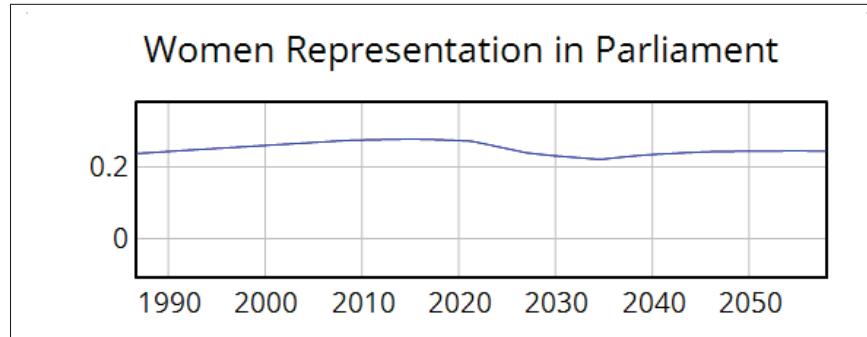


Figure 2.16 Évolution de la part des femmes dans les parlements nationaux dans le scénario 1

2.3.3.4 Éducation secondaire

L'éducation secondaire est définie par la Classification Internationale Type de l'Éducation (CITE) de l'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) comme « le niveau d'enseignement qui suit l'école primaire et prépare aux études supérieures ou à l'insertion professionnelle, généralement dispensé entre les âges de 12 et 18 ans » (ISU, 2013). Dans ce mémoire, nous considérons le taux d'éducation secondaire comme la proportion

d'adultes âgés de 25 ans et plus ayant complété au moins le premier cycle du secondaire (Bank, 2024). Cette limite d'âge repose sur l'hypothèse que les individus de plus de 25 ans ne poursuivent plus d'études secondaires, ce qui permet de fixer leur niveau d'éducation dans le temps.

De nombreuses recherches soulignent l'importance de l'éducation secondaire, en particulier pour les femmes. Elle constitue un déterminant clé de leur autonomisation et de leur accès à des services de santé essentiels. Furuta et Salway (2006) montrent que les femmes ayant complété ce niveau d'enseignement sont plus susceptibles de bénéficier de soins prénataux et d'accoucher avec l'assistance de personnel qualifié. Kidman et Heymann (2018) démontrent également qu'une année supplémentaire d'éducation secondaire réduit significativement le risque de grossesse chez les adolescentes, un facteur majeur de mortalité maternelle dans les pays à faible revenu. L'éducation secondaire influence donc directement les trajectoires de vie des femmes et leur santé reproductive.

Afin de refléter les inégalités d'accès à l'éducation entre les sexes, on introduit le ratio de complétion de l'éducation secondaire entre femmes et hommes (*SER*). Ce dernier est calculé comme la proportion de femmes ayant terminé le secondaire divisée par celle des hommes, permettant ainsi de mettre en évidence les inégalités d'accès à l'éducation selon le genre. Si dans certains pays les femmes sont désormais plus nombreuses à compléter le secondaire, la tendance globale reste défavorable aux filles, en particulier dans les pays où l'éducation masculine est elle-même faible (Evans, Akmal & Jakiela, 2021). Cette persistance des inégalités s'explique par de nombreux facteurs socio-économiques. Notamment, le revenu familial, qui facilite l'accès à l'éducation en couvrant les coûts directs et en réduisant le besoin de faire travailler les jeunes filles, que ce soit au sein du foyer ou dans la société (mondiale, 2018). La qualité des services éducatifs et l'accessibilité des infrastructures jouent également un rôle clé (GEM Report UNESCO, 2015). Et plus largement, les freins culturels et sociaux, tels que la prévalence des grossesses précoces, les mariages précoces ou encore les normes patriarcales, entravent eux la scolarisation des adolescentes (Women, 2018). Ces dynamiques sont confirmées par plusieurs études empiriques : en Inde, Singh et Mukherjee (2018) estiment que les tâches domestiques expliquent 36 % de l'écart éducatif entre filles et garçons. Otieno et al. (2024)

soulignent la persistance des barrières structurelles liées aux attentes sociales, tandis qu’Ostby et al. (2016) montrent que les normes culturelles, notamment dans les pays musulmans ou multiethniques, jouent un rôle plus déterminant que la seule capacité institutionnelle de l’État. Ainsi, le ratio *SER* dépend principalement du taux d’éducation secondaire global, des investissements en éducation, des revenus familiaux et de variables spécifiques aux adolescentes comme le taux de fécondité.

Niveau d’éducation : Le niveau global d’éducation secondaire des adultes dépend d’un ensemble de facteurs structurels et sociaux. Le tableau 2.5 récapitule les principaux déterminants identifiés dans la littérature :

Tableau 2.5 Déterminants du pourcentage de population adulte avec un niveau d’éducation secondaire

Catégorie	Déterminants
Économie des ménages	Faible revenu familial (Bank, 2024)
Normes sociales & mariage précoce	Mariages d’enfants (15–18 ans) et stéréotypes de genre (Wodon, 2014)
Accès géographique	Éloignement des écoles secondaires, infrastructure insuffisante (UNESCO, 2019)
Qualité de l’éducation	Manque d’enseignants formés, mauvaises conditions, absence de sanitaires adaptés (UNESCO, 2016)
Crises & instabilité	Conflits, catastrophes, déplacements forcés (Jarry, 2022)
Politiques publiques	Coûts scolaires, absence de soutien spécifique aux filles (Group, 2018)

Parmi ces déterminants, seuls l’économie des ménages et l’accès géographique sont déjà présents sur World3. À l’inverse, les normes sociales et les mariages précoces, la qualité de l’éducation, les crises et les politiques publiques ne sont pas modélisés sur le modèle. Pour faciliter la modélisation, les politiques publiques, la qualité de l’éducation et l’accès géographique sont regroupés sous les dépenses en éducation. Ainsi, la proportion d’adultes ayant complété le secondaire est modélisée selon l’équation 2.6 suivante :

$$SE = SEN * SEMES * SEMFI \quad (2.6)$$

où :

- SEN est la valeur de base ;
- $SEMES$ est un multiplicateur basé sur les dépenses publiques en éducation par habitant ;
- $SEMF1$ est un multiplicateur dépendant du revenu moyen des familles.

Pour déterminer le taux de base de la variable SE , nous avons retenu l'année 1900 comme point de référence, en l'absence de données systématiques antérieures. Une seule étude rétrospective couvrant 11 pays entre 1900 et 2010 propose une estimation moyenne de seulement 2 % de la population adulte âgée de 25 ans et plus ayant complété un niveau d'enseignement secondaire à cette date, correspondant à un niveau d'éducation très faible (Lab, 2017). Cette proportion reflète un contexte historique marqué par un investissement public quasi inexistant dans l'éducation : avant 1913, les dépenses éducatives représentaient généralement moins de 1 % du PIB dans la plupart des pays. Ce taux a progressivement augmenté au fil du XX^{ème} siècle, atteignant entre 1 % et 5 % du PIB selon les pays dès les années 1960 (Roser & Ortiz-Ospina, 2016). Ainsi, avec ces données, la valeur initiale utilisée pour la modélisation, notée SEN , est fixée à 2 %.

Dépenses en éducation : En étudiant la relation entre les dépenses par habitant dans les services d'éducation (ESAPC) et la production totale de services par habitant (SOPC), nous observons une courbe en S (figure 2.17), identique à la courbe des dépenses en santé.

Cette courbe qui reflète la tendance générale des dépenses en services par habitant, est incluse dans le modèle pour représenter l'augmentation des allocations aux services d'éducation par habitant (ESAPC) en fonction de la production totale de services par habitant (SOPC). Ainsi, dans le modèle mondial, les allocations aux services d'éducation par habitant sont supposées varier aux environs de 12 % de la production totale de services par habitant. La relation est tracée dans la figure 2.18.

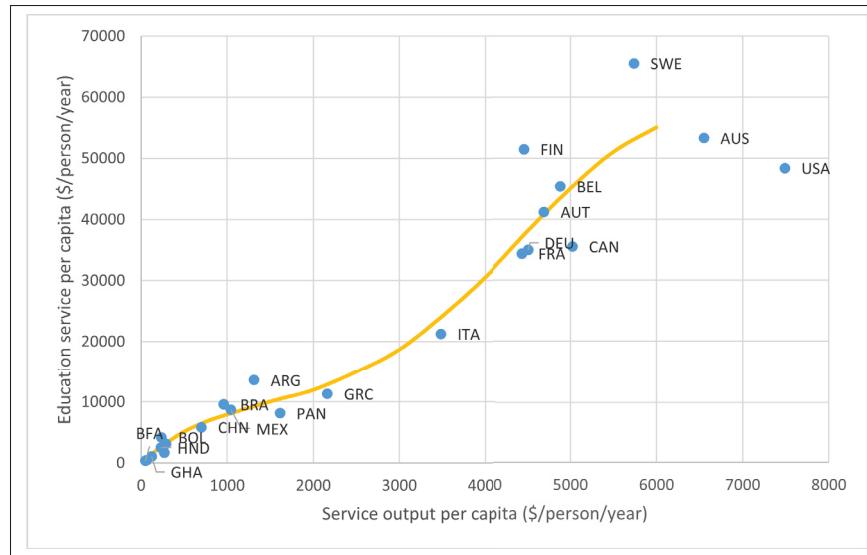


Figure 2.17 Dépenses en éducation par personne versus part des services par personnes dans le PIB pour l'année 2015

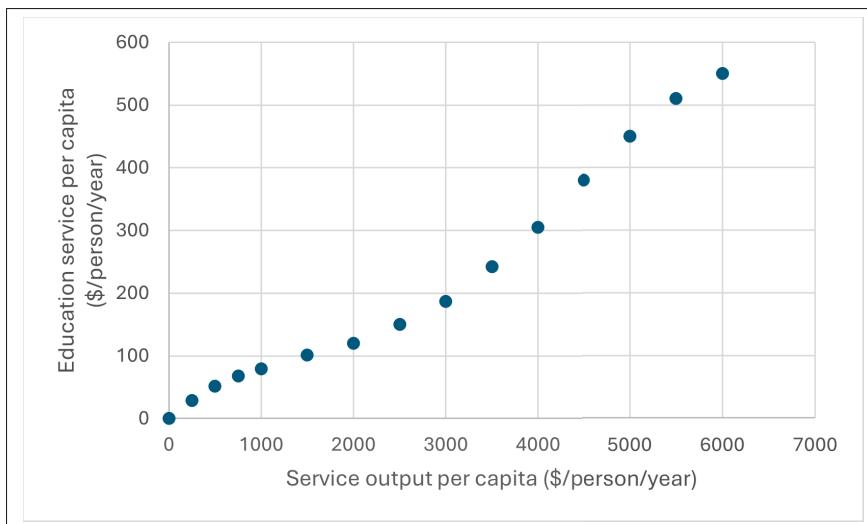


Figure 2.18 Allocations de services d'éducation par habitant sur Vensim

De la même manière que dans le domaine de la santé, les effets des dépenses en éducation ne sont pas immédiats. Les montants investis aujourd’hui dans les infrastructures, la formation des enseignants ou les programmes éducatifs mettent plusieurs années avant de produire des résultats tangibles sur le niveau d’éducation. Ce délai est estimé à 15 ans dans le cadre de ce

mémoire, correspondant au temps nécessaire pour que les élèves bénéficient pleinement des améliorations apportées. Il est donc essentiel d'en tenir compte pour évaluer l'efficacité des politiques éducatives.

On cherche maintenant, à quantifier l'effet des dépenses en éducation sur l'élévation du niveau d'éducation secondaire dans la population. La figure 2.19 illustre, pour différents pays pour l'année 2015, la relation entre les dépenses annuelles en services éducatifs par personne et la proportion de la population ayant atteint au moins le niveau secondaire. La forme logarithmique de la courbe obtenue indique que les premiers investissements produisent des gains rapides et significatifs en matière d'éducation. Cependant, au fur et à mesure que les dépenses augmentent, les gains supplémentaires diminuent : chaque dollar supplémentaire investi génère des effets moindres, notamment dans les pays ayant déjà atteint un niveau élevé de scolarisation. Ce phénomène de rendements décroissants traduit des contextes où les infrastructures éducatives sont déjà largement disponibles.

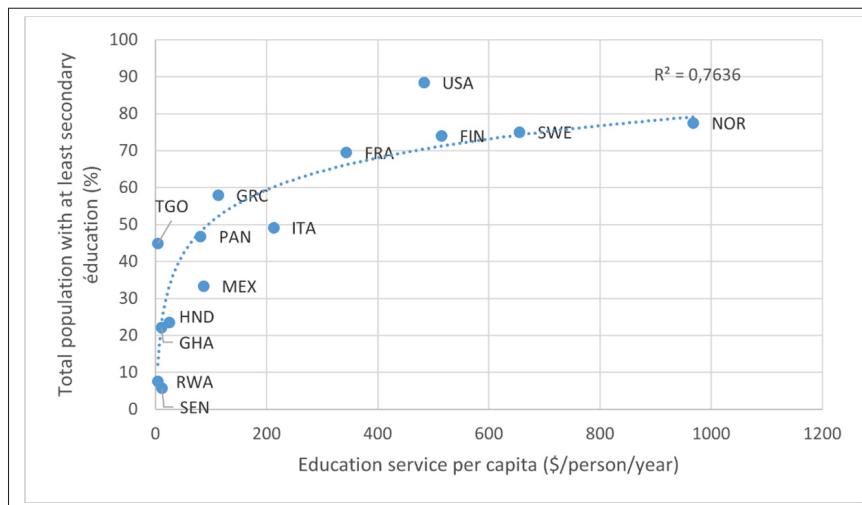


Figure 2.19 Dépenses en éducation par personne selon la part de la population ayant atteint un niveau d'éducation secondaire pour l'année 2015 d'après les données de la banque mondiale

Par ailleurs, la taille de la population semble jouer un rôle déterminant dans cette relation : les pays à forte densité démographique peuvent rencontrer des obstacles structurels (capacités d'accueil, ressources humaines, logistiques) limitant l'impact des investissements, même si

ceux-ci sont importants.

Le multiplicateur associé à cette relation, représentant l'effet des services éducatifs sur le taux d'éducation secondaire, est représenté dans la figure 2.20. On voit que le multiplicateur augmente fortement quand les dépenses sont faibles, puis se stabilise peu à peu, ce qui montre qu'il est important de bien répartir les ressources éducatives pour en tirer le meilleur effet.

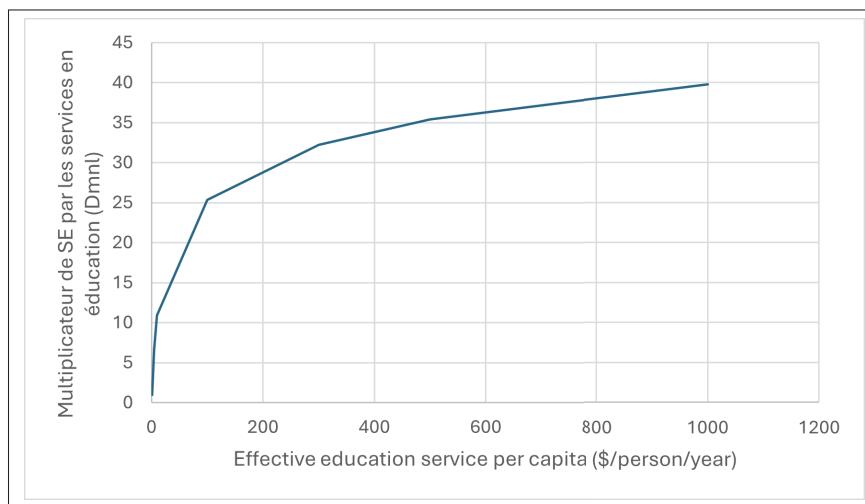


Figure 2.20 Multiplicateur du taux d'éducation secondaire par les services en éducation

Un second facteur déterminant du niveau d'éducation dans une population est le revenu des familles. La figure 2.21 illustre la relation entre le revenu médian quotidien par personne et la part de la population ayant atteint au moins le niveau d'enseignement secondaire. On observe une corrélation positive et globalement linéaire : les pays disposant de revenus médians plus élevés présentent des taux d'éducation secondaire nettement supérieurs. Cette relation reflète le rôle important des ressources économiques familiales dans la capacité à financer la scolarisation des enfants. Ainsi, plus les revenus sont élevés, plus les familles sont en mesure de prolonger la durée de scolarisation de leurs enfants.

Même si cette corrélation n'est pas parfaitement déterministe, d'autres facteurs, comme les normes sociales, les politiques publiques ou les infrastructures éducatives locales peuvent influencer cette relation, elle reste statistiquement significative et validée par de nombreuses études empiriques. Dans le modèle, cette relation est intégrée sous la forme d'un multiplicateur

appliqué au taux d'accès à l'enseignement secondaire, représenté dans la figure 2.22.

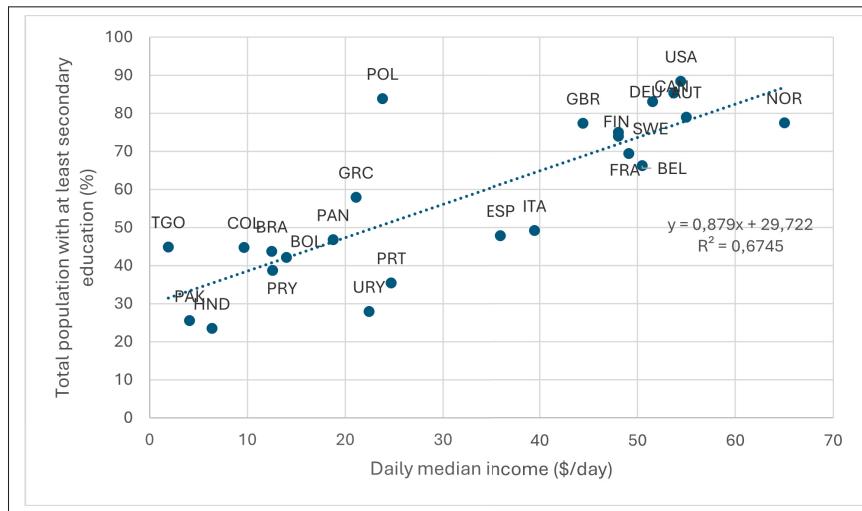


Figure 2.21 Revenu médian par personne versus part de la population ayant atteint un niveau d'éducation secondaire pour l'année 2015

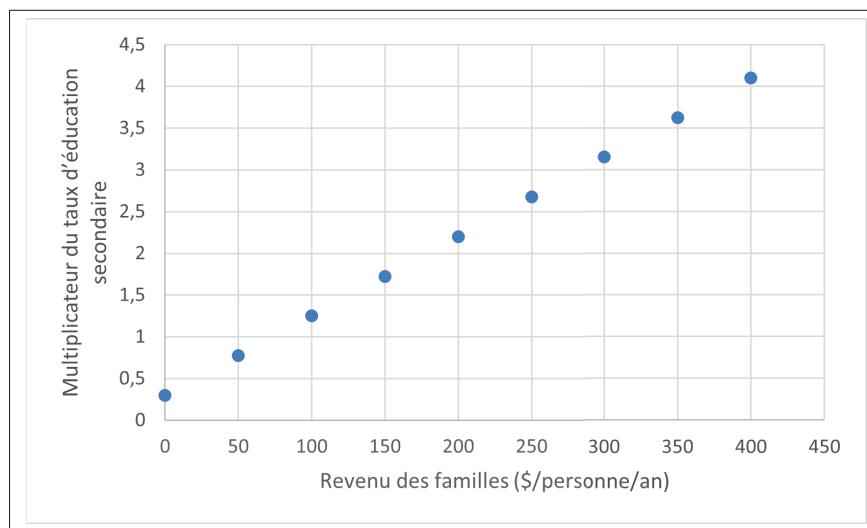


Figure 2.22 Multiplicateur du taux d'éducation secondaire par les revenus des familles

Dans World3, le revenu des familles n'est pas explicitement modélisé. Cependant, la production industrielle par habitant (*Industrial Output per Capita*) est utilisée comme indice indirect des capacités économiques disponibles à l'échelle individuelle. Ce choix permet de relier les revenus

des familles à l'évolution de l'économie globale, et d'en refléter les effets sur l'éducation.

Toutes les variables étant désormais modélisées, on obtient le taux global de la population ayant atteint le niveau d'éducation secondaire. Celui-ci peut être converti en effectif absolu en l'appliquant à la population âgée de 25 ans et plus (tranche d'âge retenue ici comme représentative d'un parcours éducatif terminé). Ce calcul permet d'estimer le nombre total de personnes disposant d'un niveau d'éducation secondaire. En distinguant les hommes et les femmes au sein de cette population, on peut ensuite mesurer l'écart d'accès à l'éducation secondaire entre les genres (*SER*).

Ratio femme/homme en éducation secondaire : Afin de représenter les inégalités d'accès à l'éducation entre les sexes, on introduit dans le modèle la variable *SER*, correspondant au ratio de compléion de l'éducation secondaire entre femmes et hommes. Ce ratio est défini comme la proportion de femmes ayant atteint ce niveau d'éducation divisée par la proportion d'hommes. Il permet ainsi de rendre compte des déséquilibres éducatifs entre les genres, qu'ils soient en faveur des hommes ou des femmes.

Comme évoqué précédemment, ce ratio est principalement influencé par deux éléments : le niveau global d'éducation de la population et le taux de fécondité des adolescentes, qui constitue un obstacle majeur à la scolarisation des filles dans de nombreux contextes.

Cependant, le taux de fécondité des adolescentes est ici mobilisé comme indice des barrières spécifiques que rencontrent les jeunes filles dans l'accès à l'éducation, en lien avec les normes sociales, les mariages précoces ou les inégalités économiques. Son utilité réside dans sa capacité à mettre en évidence les inégalités d'accès à l'éducation entre les filles et les garçons. Dans le cadre de ce modèle, cette variable n'a, finalement, pas été retenue comme variable explicative directe du ratio d'éducation. En effet, le calibrage du *SER* repose sur le niveau global d'éducation secondaire dans la population adulte, une variable qui intègre déjà, de manière implicite, les inégalités structurelles entre les sexes. À mesure que le taux global d'accès à l'éducation progresse, les écarts entre hommes et femmes tendent à se réduire, comme l'illustre la relation empirique observée dans la figure 2.23. Intégrer le taux de fertilité des adolescentes en plus de cette tendance aurait introduit une redondance et possiblement une boucle de rétroaction

circulaire, puisqu'il est lui-même influencé par le niveau d'éducation des filles. Ainsi, ses effets sont déjà en partie pris en compte dans la dynamique globale du modèle, et l'ajouter directement risquerait de le compliquer inutilement sans vraiment améliorer sa précision.

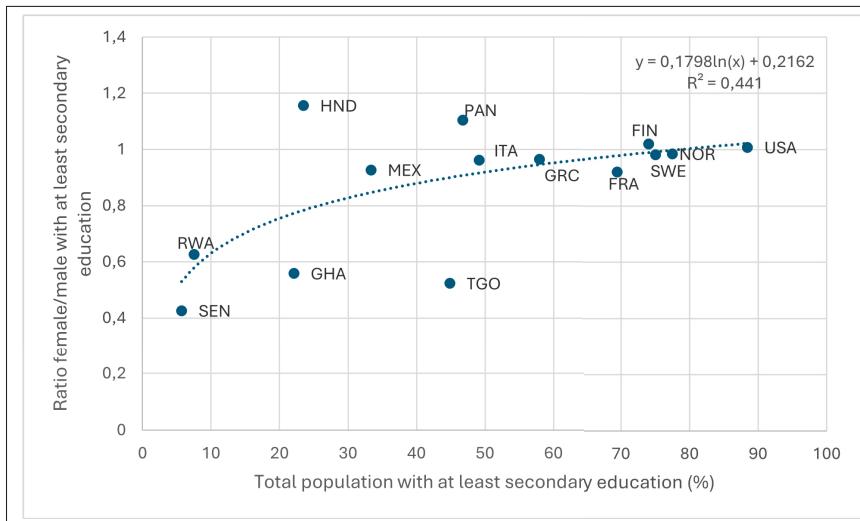


Figure 2.23 Ratio femme/homme de 25 ans et plus ayant une éducation secondaire selon le taux global de la population de 25 ans et plus ayant atteint ce niveau

Le lien empirique entre le taux global d'éducation secondaire et le ratio *SER* a, ainsi, été étudié à partir de données internationales (figure 2.23). Il en ressort une tendance claire : à mesure que la part d'adultes ayant accédé à l'éducation secondaire augmente, la parité tend à s'améliorer, jusqu'à atteindre un point où les femmes sont, en moyenne, plus nombreuses que les hommes à avoir complété le secondaire. Toutefois, l'écart maximal en faveur des femmes reste plus limité que l'écart observé historiquement en leur défaveur. Par exemple, en 2015, les ratios variaient de 0,2 à 1,5 selon les pays, selon les données de la Banque mondiale.

À partir de cette relation, une table de correspondance a été construite pour traduire le taux global d'éducation secondaire (*SE*) en ratio femme/homme (*SER*) dans le modèle. Cette table, illustrée à la figure 2.24, permet de refléter la dynamique d'évolution vers l'égalité éducative. Elle intègre la tendance selon laquelle les inégalités de genre dans l'accès à l'éducation disparaissent progressivement lorsque l'ensemble de la population bénéficie de meilleures opportunités éducatives.

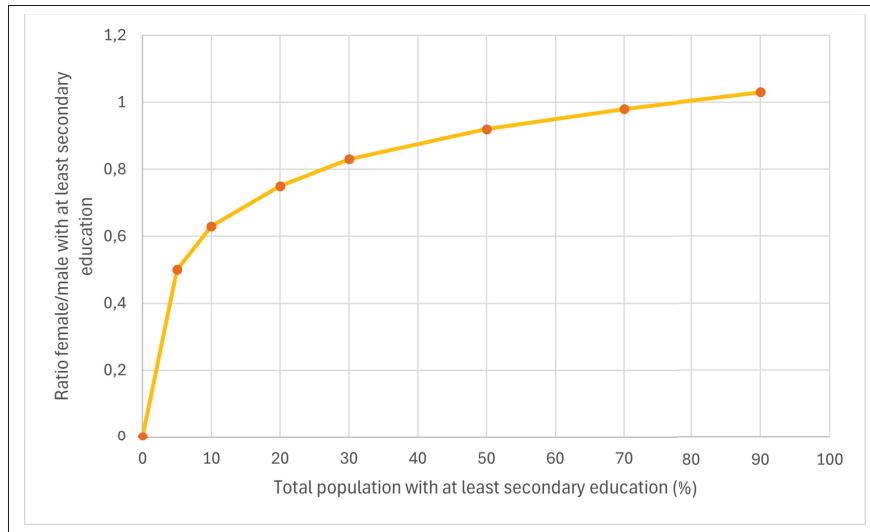


Figure 2.24 Multiplicateur du ratio femme/homme d'éducation secondaire par le taux global d'éducation

Calibrage historique :

Dans le scénario de base (scénario 1, BAU) le taux mondial d'éducation secondaire parmi les adultes de 25 ans et plus suit une trajectoire globalement cohérente avec les données empiriques disponibles entre 1970 et 2020 (voir figure 2.25). On observe une progression régulière du pourcentage de la population ayant atteint au moins ce niveau d'éducation, avec un pic atteint au début du XXI^{ème} siècle, suivi d'une diminution progressive. Bien que la forme exacte de la courbe soit différente des données empiriques, notamment par une montée plus linéaire, les ordres de grandeur simulés restent réalistes jusqu'en 2025. Le modèle permet donc de capturer la tendance structurelle sur le long terme.

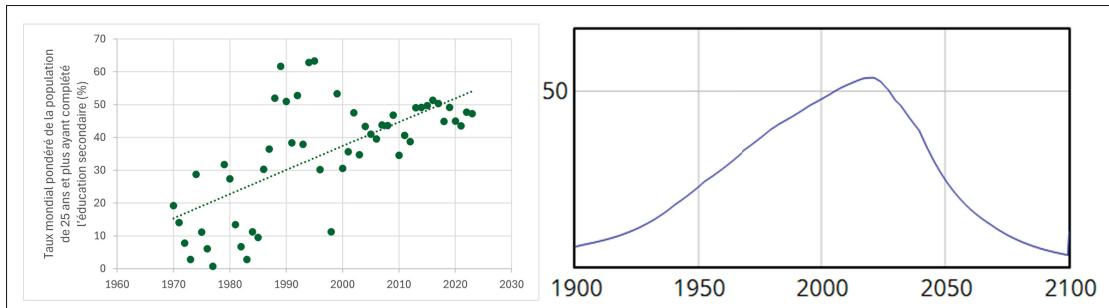


Figure 2.25 A droite : Évolution du taux global d'éducation secondaire dans le monde (1970-2023). A gauche : Évolution du taux global d'éducation secondaire dans le scénario 1

Le ratio mondial femmes/hommes ayant complété l'éducation secondaire parmi les 25 ans et plus reproduit également une dynamique globalement compatible avec les données historiques sur la période de 1970 à 2020 (voir figure 2.26). Dans le scénario de base, le ratio augmente régulièrement depuis les années 1950, ce qui reflète un rattrapage progressif des femmes en matière d'éducation. Il atteint un maximum proche de l'égalité autour de 2020, puis baisse légèrement dans la seconde moitié du siècle. Cette évolution correspond à une tendance observable dans plusieurs régions du monde, bien que les données empiriques présentent une plus grande variabilité à travers le temps et les régions. Comme pour le taux global, les valeurs exactes simulées diffèrent des données, mais en conservent les ordres de grandeur et les tendances.

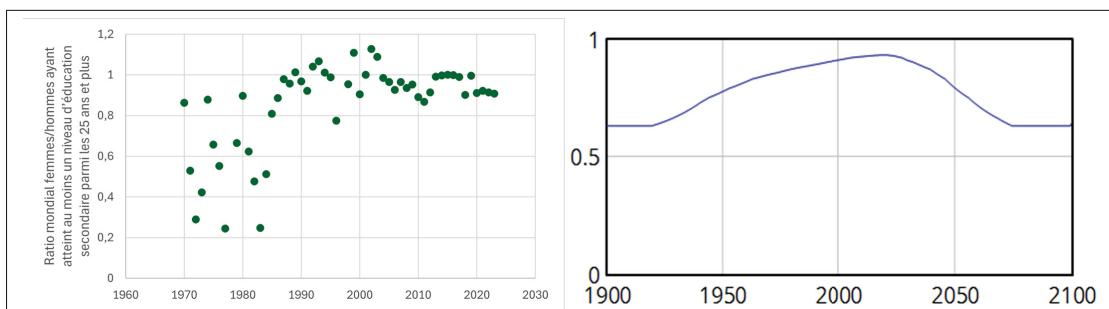


Figure 2.26 A droite : Évolution du ratio femmes/hommes ayant atteint un niveau d'éducation secondaire (1970-2023). A gauche : Évolution du ratio femmes/hommes ayant atteint un niveau d'éducation secondaire dans le scénario 1

Indicateur d'autonomisation

Afin de construire la composante d'autonomisation de l'IIG, on utilise la formule du PNUD présenté par l'équation 2.7.

$$EI = \frac{1}{2} * (\sqrt{WRP * SE_F} + \sqrt{MRP * SE_M}) \quad (2.7)$$

où :

- WRP et MRP représentent la part des sièges parlementaires respectivement détenue par des femmes et par des hommes ;
- SE_F et SE_M la population respectivement femmes et hommes ayant au moins un niveau d'étude secondaire.

Dans World3, pour reconstituer les taux d'achèvement d'étude secondaire selon le genre, on utilise le taux de la population adulte globale (SE) et le ratio femme/homme (SER). On suppose que la répartition dans la population est égale entre les genres, soit 50 % de femmes et 50 % d'hommes. Cette hypothèse simplificatrice est souvent utilisée dans les études démographiques, elle repose sur le constat que la répartition entre les femmes et les hommes reste globalement équilibrée, quel que soit l'âge ou la période considérée (DESA, 2024). On a donc les formules présentées dans l'équation 2.8.

$$SE_F = \frac{2 * SE * SER}{100 * (SER + 1)} \text{ et } SE_M = \frac{2 * SE}{100 * (SER + 1)} \quad (2.8)$$

avec :

- SE le taux de la population adulte globale ayant atteint un niveau d'éducation secondaire ;
- SER le ratio femme/homme de la population adulte ayant atteint un niveau d'éducation secondaire.

2.3.3.5 Taux d'activité

La participation des femmes au marché du travail est un indice central de leur autonomie économique, de leur pouvoir décisionnel au sein des ménages, et par extension, de leur capacité à influencer les sphères politiques, sociales et institutionnelles. Elle constitue un levier fondamental de transformation structurelle vers plus d'égalité de genre. Dans la littérature économique, elle est généralement mesurée par la part des femmes âgées de 15 à 64 ans présentes dans la population active.

La forme de cette participation n'est cependant pas linéaire au cours du développement économique. Comme le montre Goldin (1994), la courbe de la participation économique des femmes mariées suit une trajectoire en « V » :

1. Dans les économies agricoles, le travail informel familial (fermes, artisanat) génère une forte implication féminine ;
2. Cette participation diminue avec la transition industrielle, où le salariat masculin devient dominant, souvent accompagné de normes sociales qui limitent les femmes ;
3. Elle remonte ensuite dans les économies tertiarisées et éduquées, lorsque les femmes accèdent à des emplois qualifiés et à des politiques publiques de conciliation travail et famille.

En plus de cette spécificité, la littérature empirique identifie plusieurs facteurs influençant le taux de participation des femmes. Le tableau 2.6 en présente une synthèse. Dans cette section, nous avons choisi de modéliser non pas le taux absolu de participation des femmes au marché du travail, mais le ratio femmes/hommes de participation (*LFPR*). Ce choix méthodologique présente plusieurs avantages. D'une part, cette approche permet de représenter les disparités de genre sans redondance avec la variable déjà existante dans World3 pour la force de travail totale (*LFP*). D'autre part, cette modélisation reste fidèle à l'approche exploratoire du modèle, en s'appuyant sur des relations empiriques robustes tout en offrant une certaine flexibilité pour simuler différentes trajectoires sociales.

Tableau 2.6 Déterminants de la participation des femmes à la force de travail

Catégorie	Déterminants clés	Références
Économiques	PIB par habitant (positif), taux de chômage (effet ambigu)	(Taşseven, Altaş & Ün, 2016)
Éducatifs	Niveau d'éducation, notamment tertiaire	(Ejaz, 2007; Man, Abdul Rahman & Arsal, 2021)
Politiques sociales	Congé parental payé, crèches subventionnées	(Jaumotte, 2004)
Démographiques	Statut matrimonial, structure familiale	(Ejaz, 2007; Man <i>et al.</i> , 2021)
Fertilité	Effet ambivalent selon le contexte socio-économique	(Taşseven <i>et al.</i> , 2016)

Parmi les variables explicatives du *LFPR*, l'éducation secondaire des femmes représente un facteur structurant. Une scolarisation plus longue favorise l'accès à des emplois rémunérés et réduit la dépendance économique. De plus, les politiques publiques d'aide à la conciliation travail et famille (congés, garde d'enfants) permettent d'augmenter significativement la participation féminine dans les pays développés (Jaumotte, 2004).

La variable de la force de travail globale (*LFP*) est déjà présente dans World3, modélisée par :

$$LF = (P_2 + P_3) * LFPF \quad (2.9)$$

où P_2 et P_3 désignent respectivement les populations âgées de 15 à 44 ans et 45 à 64 ans, et $LFPF = 0,75$ est la fraction standard de participation.

Dans notre modèle, c'est le rapport entre les taux de participation des femmes et des hommes à la population active (*LFPR*) qui est modélisé comme une variable dynamique. Ce ratio permet de saisir les inégalités d'accès au marché du travail entre les sexes, indépendamment des dynamiques démographiques générales ou du taux absolu de participation.

$$LFPR = LFPRN * LFPRMSE * LFRMIO * LFPRMLF \quad (2.10)$$

où :

- $LFPRN$ est un ratio de base ;
- $LFPRMSE$ est un multiplicateur croissant en fonction du ratio d'éducation secondaire femmes/hommes ;
- $LFRMIO$ est un multiplicateur capturant les effets du développement industriel ;
- $LFPRMLF$ est un multiplicateur associé à la proportion de la population en âge de travailler effectivement active.

Le taux de base $LFPRN$, représentant le ratio femmes/hommes dans la participation à la population active est ici fixé à 0,5. Un tel ratio indique que le taux de participation des femmes est deux fois plus faible que celui des hommes, ce qui correspond à une situation encore fréquente dans plusieurs pays à faible développement humain. Par exemple, au cours des années 2000, des pays comme le Pakistan, l'Égypte, ou le Yémen ont enregistré des ratios femmes/hommes en dessous de 0,5, en lien avec des normes sociales contraignantes et un faible accès à l'éducation (ILOSTAT, 2013). Cette valeur sert donc de référence pour simuler l'impact des politiques éducatives et économiques sur la réduction des inégalités de genre dans le marché du travail.

Parmi les variables explicatives du $LFPR$, l'éducation secondaire des femmes constitue un levier central. De nombreuses études confirment que plus les filles atteignent un niveau scolaire équivalent à celui des garçons, plus elles ont de chances d'entrer sur le marché du travail (Jaumotte, 2004; Taşseven *et al.*, 2016). Ce lien est représenté dans la figure 2.27, bien qu'il soit entaché d'une dispersion importante. Le multiplicateur $LFPRMSE$, présenté en figure 2.28, est modélisé de manière croissante : à mesure que le ratio SER augmente, le $LFPR$ s'élève également, traduisant une amélioration de la parité dans la participation économique.

La relation entre développement économique et participation féminine est plus complexe. Comme l'a montré Goldin (1994), cette relation suit une courbe en U : dans les sociétés agricoles ou artisanales, les femmes sont fortement impliquées dans les activités productives. Cette participation décline avec l'industrialisation, avant de réaugmenter dans les économies de services. Ce schéma est reproduit dans la table d'équivalence du multiplicateur $LFRMIO$ (figure 2.29), basé sur le capital industriel par habitant (*IOPC*).

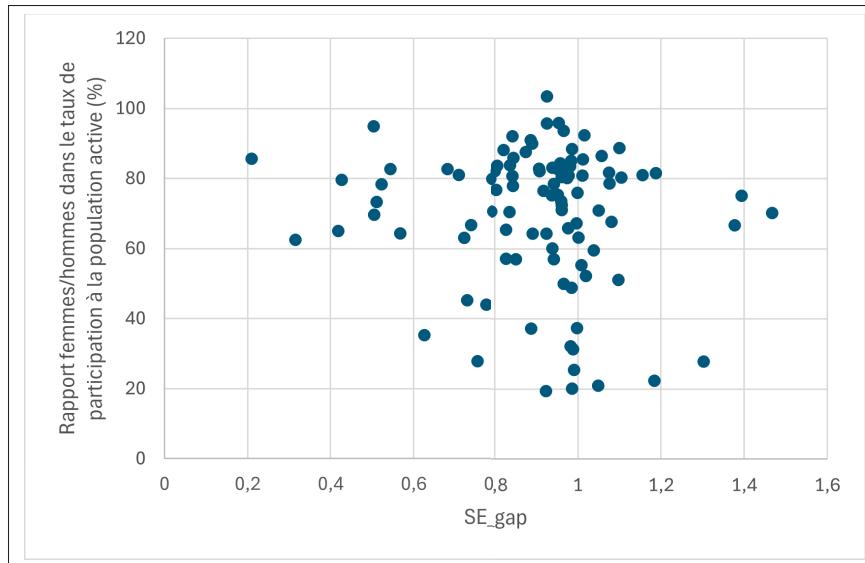


Figure 2.27 Corrélation entre *SER* et le ratio femmes/hommes de participation à la population active

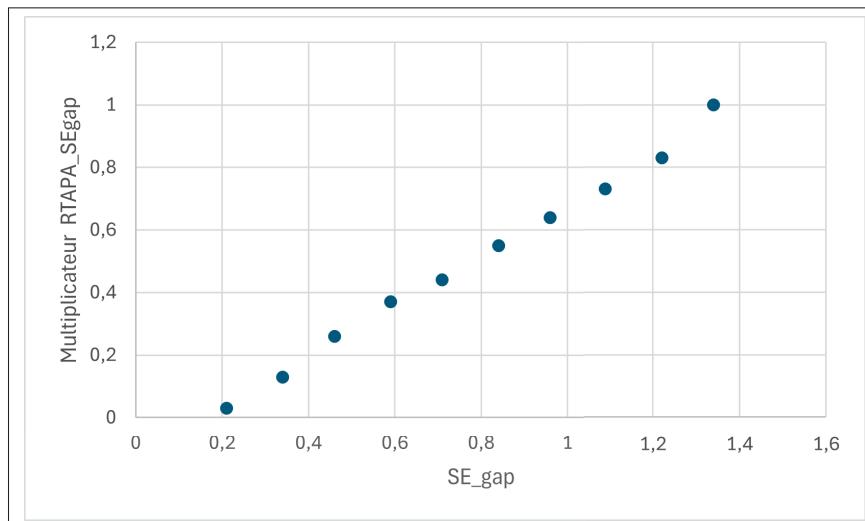


Figure 2.28 Table d'équivalence du multiplicateur *LFPRMSE*_{*SER*} selon le ratio d'éducation secondaire femmes/hommes

Enfin, la part de la population effectivement active constitue un indice structurel important. Une plus grande participation globale au marché du travail est souvent corrélée à une meilleure inclusion des femmes. Comme illustré par la figure 2.30, les pays ayant une proportion élevée de

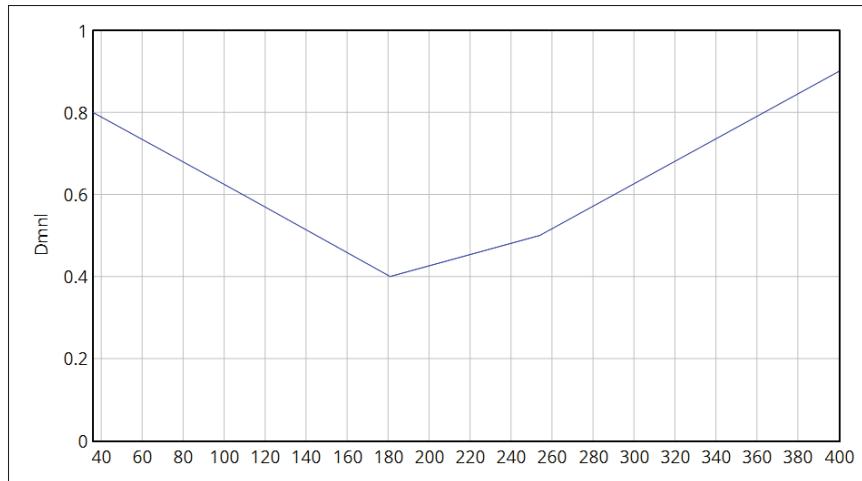


Figure 2.29 Table d'équivalence du multiplicateur *LFRMIO* selon le capital industriel par habitant

population active présentent en général un ratio femmes/hommes plus équilibré. Le multiplicateur *LFRMLF*, visualisé en figure 2.31, croît donc en fonction de cette proportion.

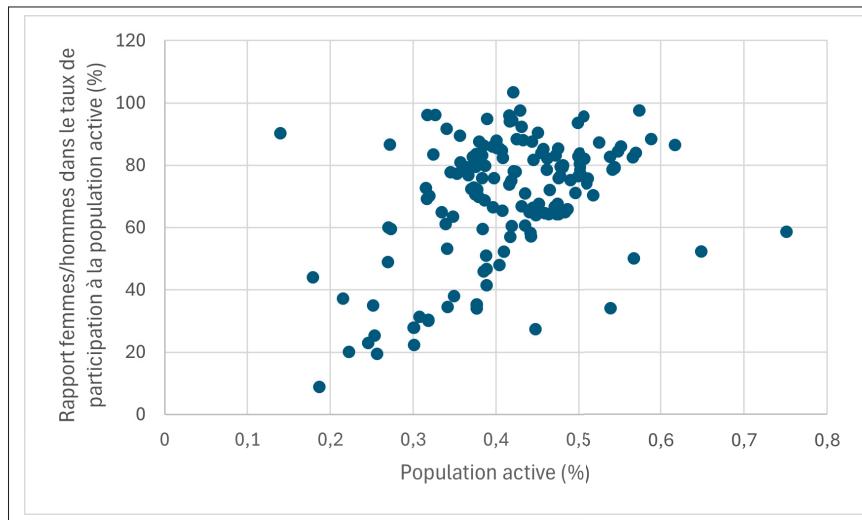


Figure 2.30 Corrélation entre la part de la population active et le ratio femmes/hommes de participation

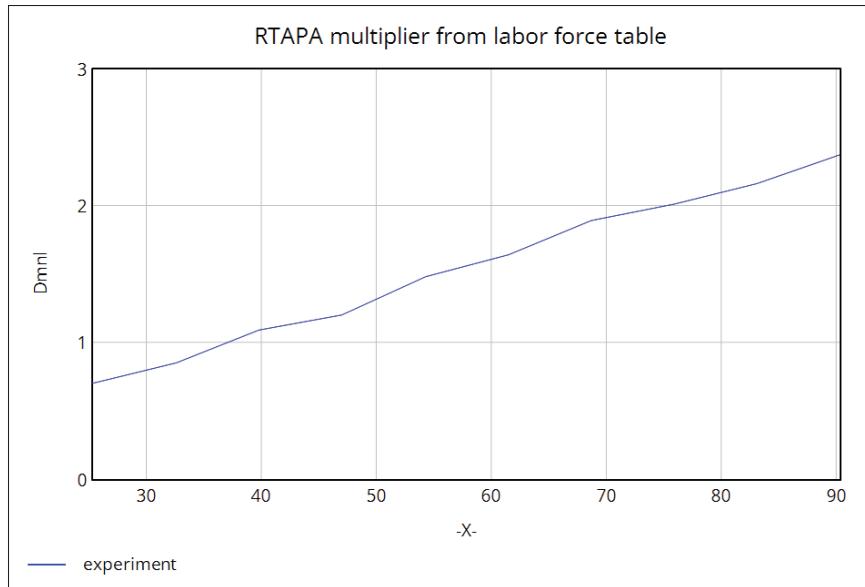


Figure 2.31 Table d'équivalence du multiplicateur $LFRMLF$ selon la proportion de population active

2.3.4 Calcul de l'IIG

Conformément à la méthodologie du PNUD, l'IIG est calculé à partir de trois dimensions : la santé reproductive, l'autonomisation et la participation économique. Chaque dimension repose sur un sous-indicateur composite construit à partir des variables intégrées dans le modèle.

L'indicateur de santé (HI) est mesurée à partir de la mortalité maternelle (MMR) et de la fécondité adolescente (AFR). Ces deux indices sont normalisés de manière inverse, plus ils sont élevés, plus la situation est défavorable (voir équation 2.4).

La formulation retenue pour modéliser la santé reproductive permet de refléter le fait que les améliorations initiales en santé reproductive produisent des effets marqués qui diminuent progressivement au fur et à mesure que les indices s'améliorent.

L'indicateur d'autonomisation (EI) est évaluée à partir de deux éléments : la représentation des femmes au parlement (WRP) et leur accès à l'éducation secondaire (SE_F), mis en perspective avec celui des hommes (SE_M). L'indicateur est défini comme la moyenne des contributions féminine et masculine (voir équation 2.7). Cette formulation permet de refléter la complémentarité des rôles politiques et éducatifs dans la réduction des inégalités d'autonomisation. Elle accorde

plus de poids aux configurations équilibrées.

Participation économique (WI) est mesurée à partir du ratio femmes/hommes de participation à la population active (*LFR*), utilisé comme indice de l'égalité d'accès au marché du travail. Celui-ci est défini par la relation suivante :

$$WI = LFR \quad (2.11)$$

Le PNUD utilise la moyenne arithmétique des taux de participation à la population active des femmes et des hommes. Cette donnée étant plus complexe à intégrer dans le modèle World3 on utilise le ratio *LFR*. Ce choix est cohérent avec la logique générale de l'indicateur car il ne varie qu'entre 0 et 1 et augmente avec l'égalité économique entre les genres. Une valeur de 1 signifie une parité parfaite, tandis qu'une valeur plus faible reflète un désavantage pour les femmes.

Calcul final de l'IIG : comme détaillé dans la section 2.3.1, le calcul de l'IIG par le PNUD utilise une moyenne géométrique (voir équation 2.1). La valeur finale de l'IIG est donc comprise entre 0 (égalité parfaite) et 1 (inégalités maximales). Cette structure permet de suivre l'évolution dynamique des inégalités de genre selon différents scénarios socio-économiques. Un schéma récapitulatif de l'architecture de l'IIG est présenté en Annexe II.

Ce calcul permet de refléter le niveau de désavantage cumulé subi par les femmes dans les trois dimensions analysées. Plus la valeur de l'indicateur est proche de 1, plus les inégalités sont fortes. L'ensemble des variables nécessaires au calcul de l'IIG sont mises à jour annuellement dans le modèle Vensim, ce qui permet d'observer l'évolution dynamique de l'indicateur selon différents scénarios.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus à partir de la modélisation de l'IIG dans World3, en réponse à la problématique d'intégration d'indicateurs sociaux dans un modèle de dynamique des systèmes. L'évolution de l'IIG et de ses composantes (santé, autonomisation, participation économique) est analysée pour différents scénarios prospectifs. Seuls les scénarios les plus pertinents sont présentés dans cette section.

3.1 Présentation des scénarios

Afin d'analyser l'évolution des dynamiques systémiques dans différents contextes, nous retenons ici les quatre scénarios du modèle World3 ayant fait l'objet de vérifications empiriques. C'est-à-dire, BAU, BAU2, CT et SW. Ces scénarios sont issus des mises à jour successives du rapport *Limits to Growth*.

- **BAU (Business As Usual)** : Ce scénario correspond à une poursuite des tendances actuelles sans changement majeur dans les politiques environnementales ou sociales. Les investissements dans la technologie, la santé ou l'éducation restent constants. Dans le modèle World3, aucune amélioration significative des facteurs technologiques ou des comportements collectifs n'est introduite. Ce scénario reproduit généralement une trajectoire de dépassement des limites planétaires suivie d'un effondrement au cours du XXI^{ème} siècle ;
- **BAU2 (Business As Usual 2)** : Variante du scénario Business As Usual, celui-ci explore l'hypothèse d'une abondance accrue en ressources naturelles. Il ne repose sur aucune amélioration technologique ou sociale particulière, mais suppose que le stock initial de ressources non renouvelables est doublé. Cette modification retarde temporairement les effets de rareté sans modifier les dynamiques fondamentales du système ;
- **CT (Contrôle Technologique)** : Ce scénario suppose une réponse technosolutioniste à la crise environnementale, avec un déploiement massif de technologies de réduction de la pollution, d'augmentation de la productivité agricole et de préservation des ressources. Il

implique également un renforcement de la gouvernance mondiale. Dans le modèle, cela se traduit par une hausse importante de l'efficacité des investissements en dépollution, une réduction du délai technologique, et une amélioration accélérée du rendement des terres et de l'efficience des ressources ;

- **SW (Stabilized World)** : Ce scénario repose sur la mise en œuvre rapide et coordonnée de politiques environnementales et sociales visant à stabiliser les trajectoires démographiques et économiques mondiales. Pour cela, des limites sont fixées à la production industrielle. Ce scénario combine aussi des investissements soutenus dans les technologies propres, une meilleure efficacité dans l'usage des ressources, un contrôle volontaire de la natalité et un accès élargi aux soins. Dans le modèle World3, ce scénario est représenté par des améliorations simultanées des multiplicateurs liés au rendement agricole, à la dépollution, à l'efficacité d'utilisation des ressources, ainsi qu'à des progrès sociaux comme la réduction de la fécondité. Il s'agit du seul scénario parmi les quatre où l'effondrement est évité à long terme, au prix d'un changement systémique anticipé.

Les détails techniques de chacun des scénarios est donné par le tableau en Annexe III.

Scénario additionnel centré sur l'IIG : Afin d'examiner le rôle actif que pourrait jouer l'égalité de genre dans la stabilisation des trajectoires socio-environnementales, un cinquième scénario, **IIG+**, a été conçu. Celui-ci part de l'idée qu'une réduction structurelle des inégalités de genre peut, à elle seule, devenir un levier de transformation du système, même sans transition technologique. Contrairement aux autres scénarios, l'IIG+ introduit des boucles de rétroaction dynamiques : à mesure que les politiques sociales favorisent l'accès des femmes à l'éducation secondaire, à la santé reproductive, au marché du travail et aux instances politiques, l'indice d'inégalité de genre (*IIG*) diminue. Cette amélioration agit à son tour sur le système, en influençant directement des variables telles que la fécondité désirée ou la productivité industrielle. Le scénario IIG+ explore si une transition sociale vers plus d'égalité entre les genres peut à elle seule influencer positivement la trajectoire globale, sans dépendre de la croissance ou des avancées technologiques.

Rétroaction sur la fécondité : De nombreuses études montrent que la réduction des inégalités de genre (grâce à l'amélioration de l'éducation des filles, leur accès aux soins reproductifs et leur participation économique) est fortement corrélée à une baisse du taux de fécondité. Ce lien s'explique par :

- l'élévation du coût d'opportunité des enfants pour les femmes instruites et actives (Adhikari, Lutz & Kebede (2024), Kim (2023));
- un meilleur accès à l'information et aux services de contraception (Adhikari *et al.* (2024), Kim (2023));
- une plus grande capacité décisionnelle des femmes sur leur santé reproductive (Doepke, Hannusch, Kindermann & Tertilt, 2023).

Rétroaction sur la productivité économique : L'amélioration de l'égalité de genre permet également une meilleure mobilisation du capital humain, une réduction des inefficacités économiques, et une diversification des compétences dans le marché du travail. Cela a un effet positif sur :

- le PIB par habitant ;
- la production industrielle ;
- la résilience économique face aux chocs.

Ces effets sont documentés à la fois au niveau microéconomique (entreprises) et macroéconomique (pays et régions) (Klasen & Lamanna (2009), Cuberes & Teignier (2016), Bertay, Dordevic & Sever (2020)).

Rétroaction sur les politiques sociales : Les rétroactions entre la représentation politique des femmes et l'orientation des politiques publiques, notamment en matière de santé, d'éducation ou de redistribution, sont bien documentées dans la littérature. Mais ces effets dépendent fortement des contextes institutionnels, culturels et géopolitiques, et ne relèvent pas de mécanismes systématiques observables à l'échelle globale. C'est pourquoi ces rétroactions n'ont pas été intégrées. Le modèle se concentre ainsi sur des liens plus robustes et universels.

Dans World3, ces rétroactions sont modélisées à l'aide de fonctions de lissage et de tables de correspondance pour garder la logique de construction du modèle. Le scénario **IIG+** permet, dans un premier temps, de tester si une amélioration structurelle de l'IIG à travers ses effets rétroactifs sur la fécondité désirée et la productivité économique peut, à elle seule, induire une trajectoire plus soutenable, sans recourir à une croissance technologique accélérée. Dans un second temps, ce scénario intègre également des objectifs d'égalité de genre explicites, tels que l'atteinte de la parité politique d'ici 2050.

Cette approche en deux temps permet de distinguer ce que l'égalité de genre peut changer par elle-même, et ce que des politiques peuvent apporter en plus.

3.2 Trajectoires des simulations

Les résultats complets des quatre scénarios de base sont présentés dans l'Annexe IV.

3.2.1 Scénario 1 : BAU

La figure 3.1 présente les résultats de ce scénario. On observe une phase de légère amélioration de l'IIG (en noir) jusqu'aux environs de 2030, principalement portée par la hausse continue de l'indicateur d'autonomisation (en rouge). Toutefois, à partir de 2040, cette tendance s'inverse : l'IIG augmente à nouveau, illustrant ainsi un recul de l'égalité de genre.

Cette dégradation s'explique essentiellement par la chute marquée de l'indicateur de participation économique (en bleu), qui décroît fortement dès que la production industrielle et les services par habitant commencent à s'effondrer. Cette contraction économique fait diminuer les opportunités d'emploi, ce qui affecte plus durement les femmes. L'indicateur de santé (en vert), quant à lui, demeure relativement stable. Ainsi, en l'absence de politiques ciblées, les tensions systémiques du modèle finissent par entraver les progrès réalisés en matière d'égalité de genre.

Ce scénario montre que, sans leviers structurels, les progrès en matière d'égalité de genre restent précaires. L'évolution de l'IIG n'est pas le signe d'un progrès continu, mais celui d'un équilibre fragile, facilement remis en cause par le déclin économique.

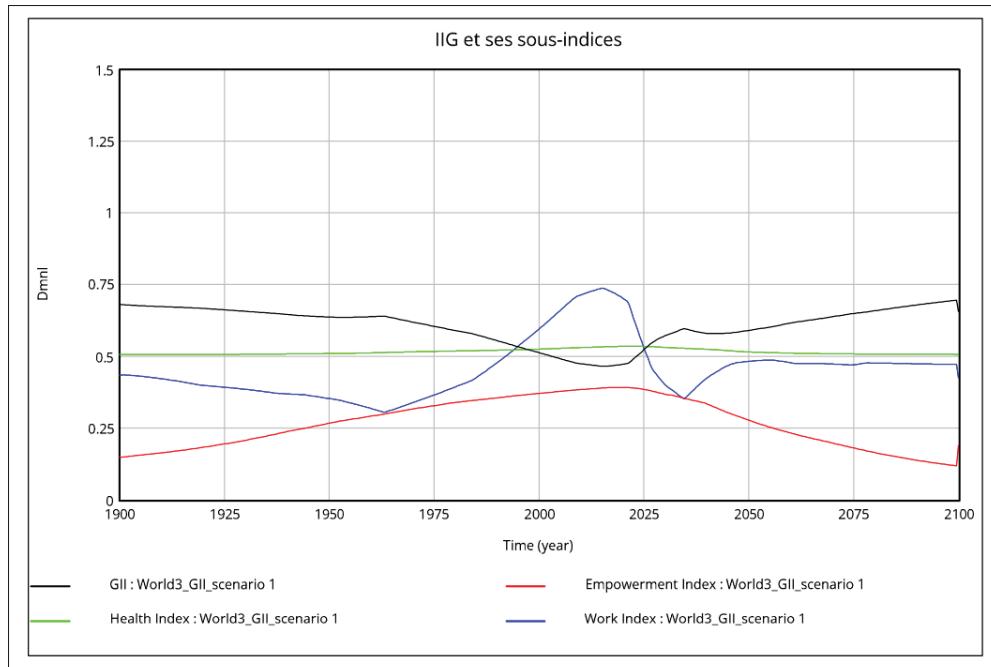


Figure 3.1 Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans le scénario BAU

3.2.2 Scénario 2 : BAU2

La trajectoire de l'IIG dans ce scénario suit initialement une dynamique similaire à celle du scénario BAU, avec une baisse modérée jusqu’aux années 2000. Cependant, à partir de 2030, les trajectoires divergent : alors que le scénario BAU voit un retournement rapide de tendance, dans le scénario 2, l'IIG continue de décroître plus durablement, porté par une amélioration marquée et soutenue des sous-indicateurs d’autonomisation et de participation économique (voir figure 3.2). L’indicateur global d’inégalité de genre, poursuit sa baisse jusqu’aux alentours de 2040, mais cette amélioration ne se prolonge pas, l’IIG repart à la hausse. Pourtant, les sous-indicateurs d’autonomisation et de participation économique s’améliorent nettement durant la première moitié du siècle, atteignant des niveaux élevés et relativement stables entre 2040 et 2080. L’indicateur de santé augmente plus lentement mais reste à un niveau modéré et stable. La baisse initiale de l'IIG est possible grâce aux progrès réalisés en éducation et en emploi, mais ces avancées sont progressivement freinées par le ralentissement économique global observé

après 2050. Comme dans le scénario 1, la dégradation des conditions matérielles de vie (figure IV-2 en Annexe) entraîne un repli de l'indicateur de travail à la fin du siècle, notamment à cause de la chute de la production industrielle et des services. Ainsi, l'IIG repart à la hausse, malgré des sous-indicateurs encore relativement favorables.

Bien que la trajectoire soit légèrement meilleure que celle du scénario 1 jusqu'en 2080, l'égalité de genre complète n'est jamais atteinte, et les indicateurs repartent à la hausse à long terme, montrant que les progrès réalisés dépendent fortement des dynamiques économiques du modèle.

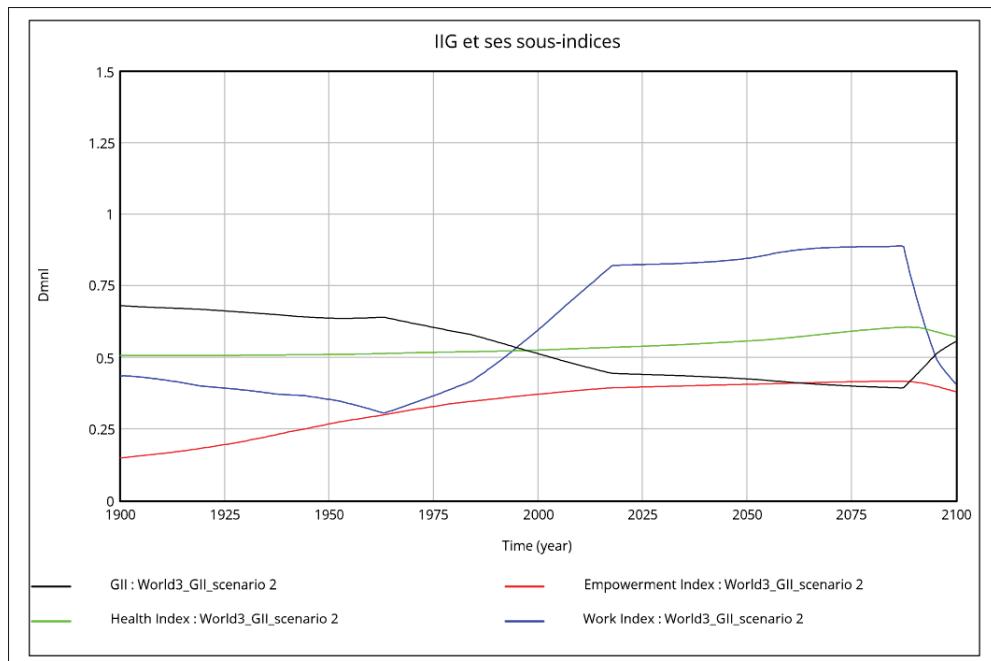


Figure 3.2 Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans le scénario BAU2

3.2.3 Scénario 3 : CT

Les résultats présentés en figure 3.3 montrent une baisse progressive de l'indicateur global d'inégalité de genre entre 2000 et 2040. L'indicateur de santé reste élevé tout au long du siècle, soutenu par meilleure résilience des systèmes de soins face aux dégradations environnementales. L'indicateur d'autonomisation progresse rapidement jusqu'en 2050, sous l'effet d'un accès plus important à l'éducation secondaire et de l'amélioration des conditions politiques. Cette

progression plafonne ensuite, notamment car l'indicateur de participation économique des femmes stagne vers cette même période.

L'IIG ne descend jamais sous 0,4 et remonte légèrement à la fin du siècle. Ce scénario met en évidence que, même dans un contexte d'efficacité technologique accrue, l'égalité de genre n'est pas une conséquence automatique : en l'absence de politiques sociales ciblées, les progrès atteignent un seuil. Le scénario 6 montre donc les limites d'une stratégie centrée uniquement sur l'innovation et la maîtrise technologique sans transformation sociale explicite.

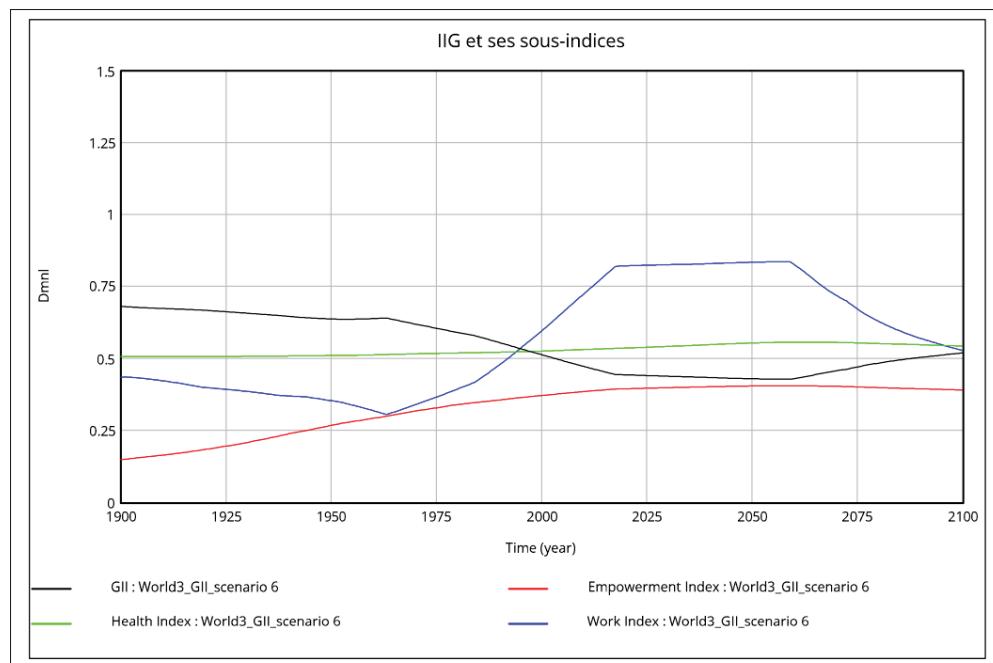


Figure 3.3 Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans le scénario CT

3.2.4 Scénario 4 : SW

Les résultats du scénario SW (figure 3.4) montrent une amélioration modérée mais continue de l'indice d'inégalité de genre, qui atteint un palier autour de 0,45 à la fin du siècle. Cette évolution résulte de la combinaison de conditions économiques relativement favorables et d'un système de santé robuste, sans pour autant intégrer des politiques en faveur de l'égalité. L'indicateur de santé reste élevé et progresse légèrement. L'indicateur d'autonomisation s'améliore jusqu'en

2050 puis se stabilise. L'indicateur de participation économique, quant à lui, croît fortement avant de plafonner également à partir de 2050.

Dans ce scénario, la stabilité de l'économie permet de préserver les avancées sociales, mais celles-ci demeurent limitées : sans mesures structurelles, l'égalité de genre stagne sans jamais être atteinte.

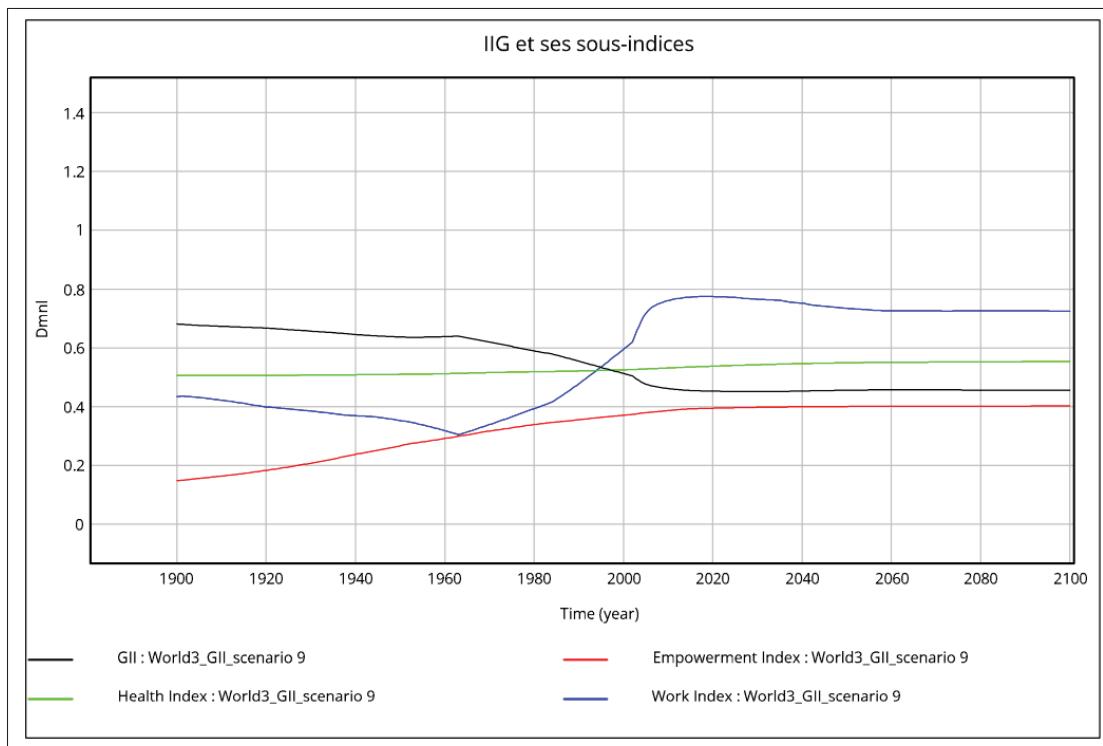


Figure 3.4 Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans le scénario SW

3.2.5 Scénario 5 : IIG+

3.2.5.1 Avec boucles de rétroactions

Scénario de base (BAU) : L'intégration des effets de l'éducation relative (SER) sur la fécondité, et de la participation économique des femmes sur la productivité industrielle, modifient les trajectoires du modèle. Comme le montre la figure 3.5, l'implémentation de ces rétroactions dans le scénario IIG+ engendre initialement une amélioration significative des sous-indicateurs

de l'IIG. Cette dynamique se traduit par une baisse de l'indicateur global d'inégalités de genre jusqu'aux environs de 2040.

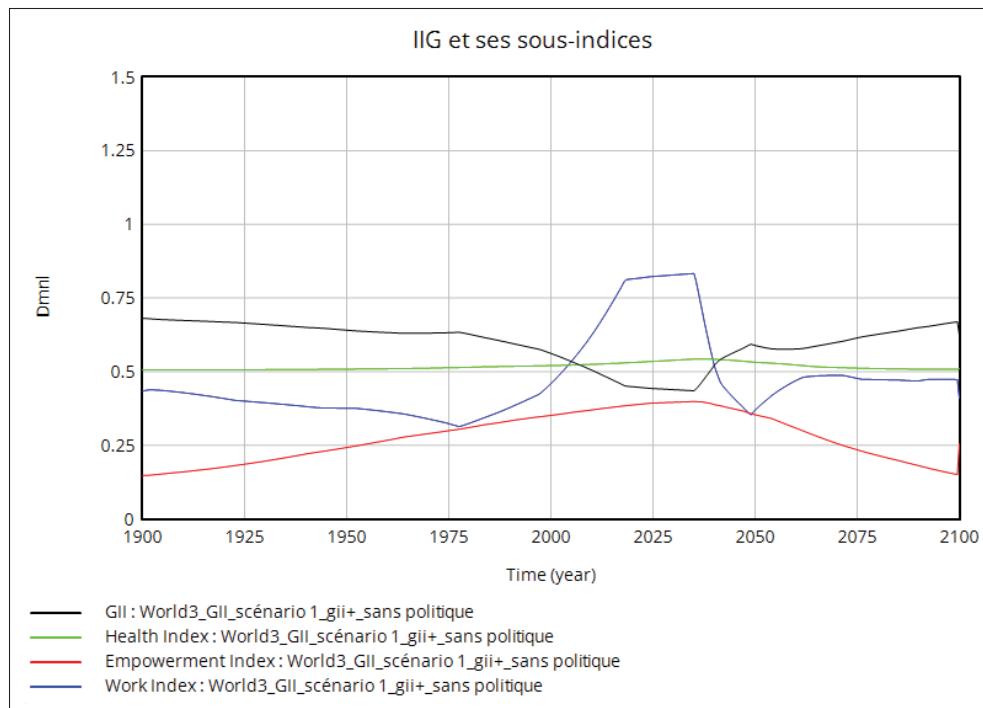


Figure 3.5 Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans l'étape 1 du scénario IIG+ avec les hypothèses de BAU

Cependant, cette progression sociale s'accompagne d'une accélération de la croissance économique et de la consommation de ressources (voir figure IV-5). L'augmentation de la productivité industrielle due à l'émancipation économique des femmes fait augmenter la production globale, entraînant alors une hausse de la consommation de biens, des services et de la nourriture par habitant. Ces améliorations se traduisent également par un accroissement du bien-être humain (Human Welfare Index) (visible en annexe figure IV-5).

Ces dynamiques positives augmentent la pression sur les ressources naturelles, ce qui entraîne une forte hausse de l'empreinte écologique humaine jusqu'à un pic vers 2040, avant un effondrement du système (voir figure IV-5). L'épuisement rapide des ressources et la dégradation des écosystèmes provoquent ensuite une chute du niveau de vie et du bien-être. Cette dégradation

fait aussi augmenter l'IIG après 2040, ce qui montre que l'égalité de genre recule dans un contexte de crise mondiale.

Ce scénario met donc en évidence les limites d'une amélioration de l'égalité de genre portée exclusivement par la croissance industrielle. Sans limites environnementales claires, les rétroactions qui favorisent l'égalité peuvent accélérer la dégradation du système global. Ces résultats montrent qu'il est essentiel de lier les politiques sociales en faveur de l'égalité avec des politiques écologiques fortes, pour que les progrès en matière d'égalité ne soient pas annulés par une trajectoire de développement non durable.

Scénario SW : Sous un scénario qui permet d'atteindre un monde stabilisé, les boucles de rétroaction liées à l'égalité de genre s'intègrent dans une dynamique plus soutenable à long terme (voir figure 3.6). Grâce à l'introduction des politiques environnementales, le système parvient à contenir la pression exercée sur les écosystèmes. L'inégalité de genre décroît de manière plus marquée à partir de l'an 2000 et atteint un niveau plus bas que dans le scénario de base (autour de 0,36 contre 0,43). Ceci est dû à une représentation plus importante des femmes sur le marché du travail.

Cette trajectoire ne permet cependant pas d'atteindre l'égalité de genre d'ici la fin du siècle, car le ralentissement progressif de la production industrielle freine la diminution de l'IIG (voir la figure IV-6 en Annexe). Ainsi, en l'absence de politiques sociales et de normes adaptées, l'égalité des genres ne semble pas pouvoir être atteinte.

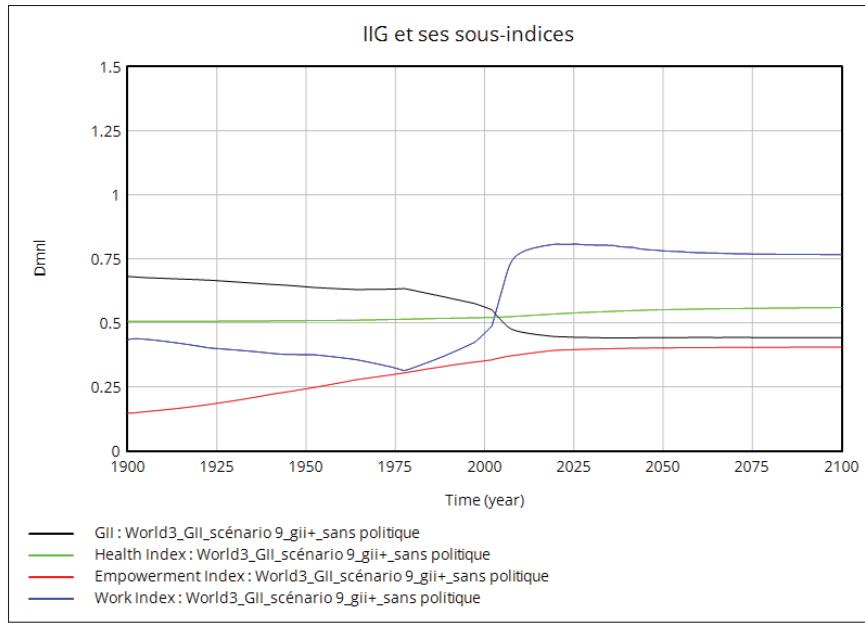


Figure 3.6 Évolution de l'IIG et de ses sous-indicateurs dans l'étape 1 du scénario IIG+ avec les hypothèses de SW

Le scénario SW montre que l'égalité de genre contribue à stabiliser le système, mais seulement si elle s'accompagne de politiques de transition écologique. À l'inverse, dans le scénario de base, les progrès en matière d'égalité peuvent accélérer l'effondrement. Autrement dit, l'égalité seule ne suffit pas : sans mesures pour encadrer son impact, elle peut aggraver les déséquilibres au lieu de les corriger.

Les résultats montrent, également, que l'égalité de genre ne peut pas être atteinte sans politiques volontaires ou sans changements structurels. Dans tous les scénarios, même ceux qui prévoient des avancées technologiques ou une transition écologique, les inégalités de genre finissent par se stabiliser à un niveau intermédiaire si rien n'est fait pour les réduire activement. L'émancipation des femmes ne se produit pas automatiquement avec le développement économique ou la soutenabilité environnementale. Pour qu'un monde soutenable soit aussi plus juste, il est donc essentiel d'intégrer la justice sociale et l'égalité de genre au même niveau que les enjeux écologiques.

3.2.5.2 Avec politique pour l'égalité des genres

Afin de simuler une trajectoire cohérente avec un objectif d'égalité de genre d'ici 2050, plusieurs politiques ont été introduites dans le modèle à travers des modifications des tables de correspondance.

Tout d'abord, la parité dans l'accès à l'éducation secondaire a été simulée en ajustant la table reliant les services éducatifs au taux d'éducation secondaire, de façon à garantir qu'au moins 70 % de la population atteigne ce niveau de formation. Puis, la table modélisant le ratio femmes/hommes dans l'éducation secondaire a été modifiée pour tendre vers un équilibre de 1 d'ici à 2050.

Ensuite, la participation des femmes au marché du travail a été encouragée par une révision de la table *LFPRMLT*, afin de tendre vers une répartition équitable (50/50) entre les sexes.

La représentation politique des femmes a également été modélisée par une adaptation des tables associées à leur taux de participation, visant une parité à moyen terme.

Pour l'indicateur de santé, la réduction du taux de mortalité maternelle sous les 10 décès pour 100 000 naissances a été intégrée via une hausse du rendement des services de santé. Enfin, la baisse de la fécondité adolescente a été poursuivie en ajoutant un multiplicateur spécifique, appliqué à partir de 2025, pour accélérer la transition démographique chez les jeunes femmes.

Ces politiques simulées correspondent à des objectifs ambitieux, mais cohérents avec les recommandations formulées par l'initiative Equal Measures 2030 (EM2030, 2024). Cette dernière insiste sur la nécessité d'atteindre la parité dans l'éducation secondaire dès 2030, considérée comme une condition essentielle pour progresser vers l'égalité des genres. Dans la modélisation, cet objectif a été repoussé en 2050 pour avoir une trajectoire plus réaliste. Le rapport souligne aussi que sans quotas ou autres mesures fortes, la parité politique est difficile à atteindre. Il recommande donc de mettre en place des mécanismes obligatoires pour garantir une représentation équitable des femmes dans les instances décisionnelles. Les politiques simulées ici s'inscrivent donc dans cette logique de transformation structurelle : elles visent à tester l'effet de leviers ciblés et progressifs (éducation, santé reproductive, représentation politique, participation économique), et à en évaluer le potentiel de changement systémique. En ajoutant

ces dynamiques dans le modèle, on peut voir dans quelle mesure des politiques en faveur de l'égalité peuvent réellement contribuer à construire un futur plus juste et durable.

En visant la parité d'ici 2050, les résultats des scénarios IIG+ montrent que la combinaison de boucles de rétroaction entre égalité de genre et dynamiques économiques, avec des politiques ciblées, permet d'améliorer de manière importante les sous-indicateurs de l'IIG. Dans les deux scénarios BAU et SW, l'indice d'inégalités de genre chute, atteignant presque 0,25 (voir figures 3.7 et 3.8). Cette baisse importante de l'IIG témoigne de l'efficacité des politiques, même dans des contextes structurellement différents.

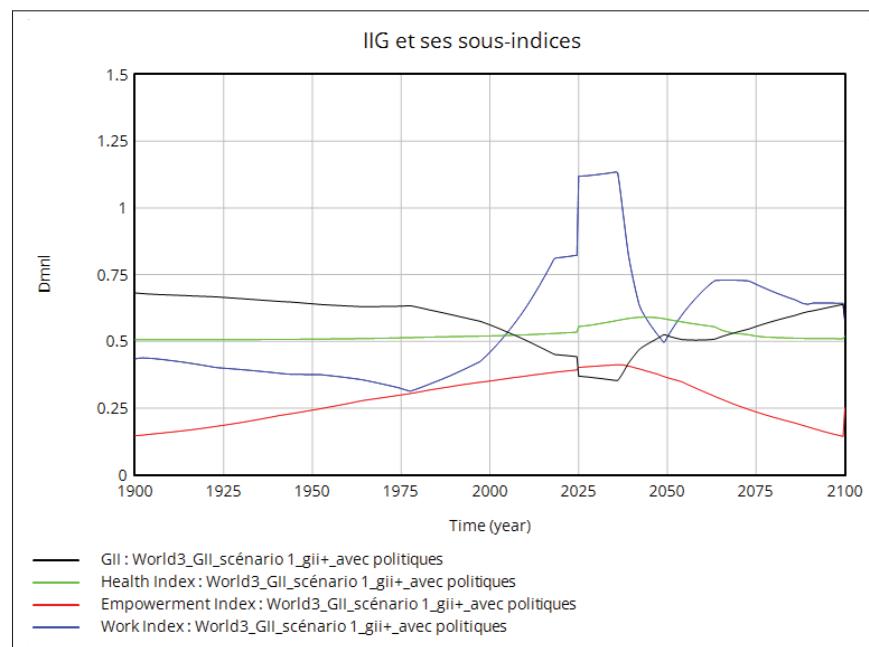


Figure 3.7 Évolution de l'indice d'inégalité de genre et de ses sous-indicateurs dans l'étape 2 du scénario IIG+ avec les hypothèses de BAU

Dans le scénario SW, les progrès vers l'égalité se font dans un contexte écologique maîtrisé. Ainsi, la consommation reste dans les limites acceptables et la pression sur les ressources diminue, ce qui permet de préserver un bon niveau de bien-être humain tout en respectant les limites planétaires (figure IV-8 en Annexe IV). À l'inverse, dans le scénario BAU, la trajectoire conduit, de nouveau, à un effondrement, mais les politiques en faveur de l'égalité de genre permettent d'atténuer les impacts sociaux (figure IV-7 en Annexe IV). On observe que l'indice

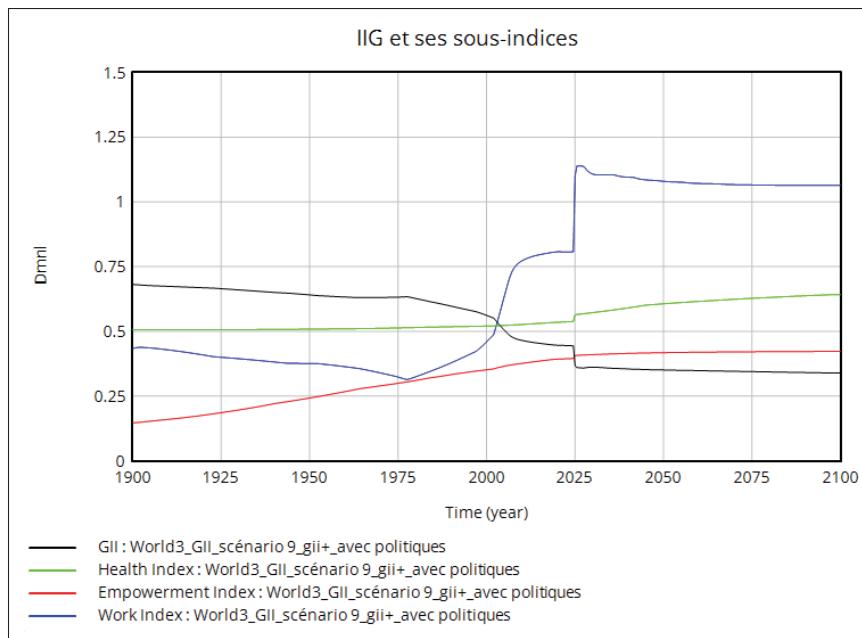


Figure 3.8 Évolution de l'indice d'inégalité de genre et de ses sous-indicateurs dans l'étape 2 du scénario IIG+ avec les hypothèses de SW

de bien-être humain (Human Welfare Index) chute dans ce cas, mais la baisse est moins marquée que lorsqu'aucun cadre social n'est mis en place.

3.3 Synthèse

Ces résultats montrent que, même si les politiques pour l'égalité ne suffisent pas à elles seules à assurer la soutenabilité environnementale, elles jouent un rôle important pour renforcer la stabilité sociale, améliorer le bien-être et soutenir l'économie. À l'inverse, on voit que sans mesures spécifiques, même les scénarios avec une forte croissance ou une bonne stabilité dans le temps n'atteignent jamais une égalité de genre complète. L'émancipation ne peut donc pas être considérée comme une simple conséquence du développement : elle doit être un objectif politique à part entière.

Finalement, ces simulations montrent que des politiques ambitieuses en faveur de l'égalité peuvent améliorer les indices sociaux de manière significative et contribuer à la stabilisation du

système. Mais leur efficacité dépend fortement du contexte dans lequel elles sont mises en place. En effet, sans transformation parallèle des modes de production, de consommation et de gestion des ressources, ces progrès sociaux restent fragiles. L'égalité de genre ne suffit pas, à elle seule, pour assurer la soutenabilité, mais elle reste un levier important qu'il ne faut pas négliger.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Ce chapitre examine les limites du modèle World3 mis à jour avec l'indice d'inégalité de genre et propose des pistes pour une modélisation plus inclusive. D'abord, les simplifications liées à l'intégration de l'IIG dans World3 sont analysées. Ensuite, les impacts sociaux de la croissance économique sont discutés, ainsi que la nécessité de réorienter les modèles vers la décroissance. Enfin, des pistes pour de futures recherches sont proposées.

4.1 **Limites de la modélisation actuelle**

Bien que le modèle World3 mis à jour avec l'IIG permette de mieux représenter certaines dimensions sociales plusieurs limites importantes doivent être soulignées. Tout d'abord, la représentation des inégalités de genre est très simplifiée. Elle repose sur une distinction binaire femmes et hommes et sur des indicateurs agrégés. Ces choix permettent, certes, des comparaisons internationales cohérentes mais ils ne suffisent pas à refléter la complexité des rapports sociaux de genre. En effet, ceux-ci sont plus complexes et très dépendants du contexte. Or, de par sa construction dans World3, l'IIG ne permet pas de rendre compte des inégalités intersectionnelles (liées à la classe, à la race, à la géographie ...) ni des dynamiques spécifiques à certains contextes culturels ou politiques. On peut également ajouter que le modèle ne prend pas non plus en compte les formes de domination ou de violence systémiques, qui jouent un rôle central dans la reproduction des inégalités.

Ensuite, plusieurs rétroactions intégrées reposent sur des hypothèses simplificatrices. Certaines relations sont modélisées à l'aide de tables de correspondance calibrées à partir de données internationales, parfois incomplètes. Ces calibrages permettent de représenter les grandes tendances observées, mais ils ne reflètent pas la multitude de trajectoires historiques ni la complexité des liens entre les variables. De plus, comme les rétroactions n'ont été activées qu'à partir de 2025 pour ne pas perturber les trajectoires du modèle, cela a eu pour conséquence d'atténuer certains effets dans les premières années.

Le modèle reste également centré sur une logique macroéconomique dans laquelle l'activité

productive est assimilée au travail rémunéré. Cela laisse de côté une grande partie de l'économie, comme le travail domestique non rémunéré ou les soins informels, qui sont en grande partie assurés par les femmes. Le fait d'ignorer cette part du travail limite le modèle, car cela efface un élément essentiel du fonctionnement des sociétés. L'égalité est alors surtout vue comme un ratrappage dans les domaines visibles comme le travail, l'éducation ou la santé, sans remettre en question l'organisation économique actuelle.

Enfin, la modélisation reste basée sur les choix et les limites du modèle World3, qui impose une certaine façon de représenter le monde. De plus, l'architecture du modèle rend difficile l'ajout de nouvelles variables sociales ou de boucles de rétroaction complexes, sans devoir modifier en profondeur sa structure. Cela limite les possibilités d'explorer d'autres trajectoires basées sur des principes comme la décroissance, la solidarité ou la justice sociale, pourtant au cœur des approches féministes et écoféministes sur lesquelles ce mémoire s'appuie.

Ces limites ne remettent pas en question l'intérêt de la démarche, mais montrent qu'il faut voir ce travail comme une première exploration. L'objectif n'est pas de représenter parfaitement toutes les inégalités de genre, mais d'ouvrir la voie à une modélisation plus inclusive, qui relie mieux les dimensions sociales, écologiques et économiques.

4.2 La décroissance et le travail invisible

Cette section examine le modèle World3 à travers une lecture critique des modèles traditionnels de croissance économique. Critiques notamment émisent par les perspectives de décroissance et de post-croissance. Elle met ensuite en évidence l'un des manquements majeurs de ces modèles, souligné par les théories écoféministes : la question du travail de soin (Mies *et al.*, 1998).

4.2.1 La décroissance

Le modèle World3 a donc été l'un des premiers à aborder de manière systématique les interactions entre la croissance économique, les ressources naturelles et l'environnement. Le modèle a mis en évidence les limites physiques de la Terre en termes de ressources finies et de capacités d'absorption des déchets, démontrant que la croissance économique infinie dans un

monde aux ressources limitées n'est pas durable. World3 a souligné que, dans un contexte de croissance exponentielle des populations et de la consommation, les contraintes imposées par les ressources naturelles et les capacités de régénération de la planète sont inévitables (il est donc nécessaire de les intégrer dans les projections économiques). Dans cette perspective, la croissance économique, telle qu'elle est formulée dans les discours dominants, apparaît comme intrinsèquement destructrice de l'environnement. Elle repose sur une conception utilitariste de la nature, perçue comme un stock de ressources exploitables. La poursuite d'une telle croissance implique mécaniquement une augmentation des extractions de matières premières, une augmentation des pollutions et des émissions de gaz à effet de serre, et une dégradation continue des écosystèmes. Cette logique de croissance matérielle continue est de plus en plus remise en question, notamment par les approches issues de la décroissance, qui cherchent à concilier durabilité écologique, bien-être social et justice économique.

Dans cette mise à jour du modèle World3, quelques implications sociales de la croissance économique sont mises à jour. Malgré les promesses portées par l'économie classique, selon laquelle la croissance générerait mécaniquement une réduction de la pauvreté et des inégalités, les données empiriques et les scénarios du modèle tendent à montrer l'inverse. La croissance ne garantit pas une répartition équitable de ses bénéfices. Bien au contraire, elle s'accompagne souvent d'un renforcement des inégalités économiques, notamment à travers une concentration croissante de la richesse (Chancel *et al.*, 2021). Dans un tel contexte, l'égalité entre les genres reste inatteignable, en partie, car le système repose sur l'exploitation d'un travail invisible, non rémunéré et largement assumé par les femmes (non modélisé dans le cadre de ce mémoire).

Ainsi, World3 contribue à démontrer qu'une promesse forte de l'économie classique, que plus de croissance signifie plus de prospérité pour tous, est largement illusoire. Le système économique repose sur une logique d'exploitation multidimensionnelle : exploitation des ressources naturelles, des écosystèmes, de la main-d'œuvre, et des groupes sociaux marginalisés. Cette logique d'extraction permanente alimente non seulement la crise écologique, mais aussi une crise sociale profonde, marquée par la montée des inégalités et la précarisation croissante d'une part significative de la population mondiale. Face à ces constats, les modèles de décroissance proposent une réorientation complète des objectifs économiques, plutôt que de

viser une augmentation constante du PIB, ils prônent une réduction planifiée de la consommation matérielle, la redistribution des richesses. . . Ces modèles cherchent à renforcer la résilience sociale et écologique, en rompant avec l'idée que le bien-être dépend d'une accumulation sans fin.

Le modèle World3 a montré, à travers ses projections, que la croissance économique infinie est physiquement et écologiquement impossible. Il a également mis en lumière que, telle qu'elle est conçue dans le cadre de l'économie classique, cette croissance mène inévitablement à une surexploitation des ressources naturelles et humaines, aggravant les inégalités sociales et environnementales. Le passage à un modèle de décroissance semble donc indispensable pour repenser les fondements mêmes de l'économie et redéfinir le lien entre croissance, pauvreté, inégalités et durabilité environnementale.

4.2.2 Le travail invisible

Le travail invisible, ou non rémunéré, est un concept central des approches féministes et écoféministes, et représente un des angles morts majeurs des modèles systémiques comme World3. Il englobe l'ensemble des activités nécessaires à la reproduction quotidienne et générationnelle de la société : soins apportés aux enfants ou aux personnes âgées, gestion du foyer, alimentation, soutien émotionnel, planification familiale, . . . Ce sont des tâches indispensables au fonctionnement des sociétés, mais historiquement absentes des indicateurs économiques classiques, comme le PIB.

Ce travail est en grande majorité réalisé par des femmes, ce qui en fait aussi un révélateur des inégalités de genre persistantes. Pourtant, comme le soulignent de nombreuses autrices féministes (tel que Federici (2014)), ce travail de reproduction sociale est la condition même de possibilité du système productif : sans lui, il n'y a ni main-d'œuvre, ni consommation, ni croissance. En ce sens, son invisibilisation dans les modèles économiques et systémiques révèle un biais structurel dans la modélisation.

Dans World3 (comme dans l'économie actuelle), aucune variable ne prend en compte le travail invisible. Le modèle se concentre sur les stocks de population, de capital, de ressources ou

de pollution, mais ignore complètement la sphère domestique et reproductive. Cette absence suppose implicitement que les dynamiques de soutien à la population sont automatiques, gratuites et illimitées, ce qui est évidemment faux. Cela peut conduire à sous-estimer certains seuils de rupture du système, notamment en matière de santé ou de démographie ou à ignorer des leviers d'action.

Aujourd’hui encore, ces inégalités sont très marquées. Selon ONU Femmes (2021), les femmes réalisent en moyenne trois fois plus de travail domestique et de soins non rémunérés que les hommes. Ce travail représente, ainsi, entre 20 % et 60 % du temps de travail total, selon les contextes nationaux. En 2019, au Canada, la valeur économique du travail ménager non rémunéré était estimée entre 516,9 milliards de dollars et 860,2 milliards de dollars, soit entre 25,2 % et 37,2 % du PIB nominal, selon une étude de Statistique Canada (Gouvernement du Canada, 2022). L’intégrer dans les modèles permettrait, donc, non seulement de mieux représenter la réalité, mais aussi d’évaluer plus finement l’impact des politiques sociales.

Du point de vue écoféministe, il existe un lien fort entre exploitation du travail reproductif et exploitation des ressources naturelles. Dans les deux cas, on retrouve une logique extractiviste, qui repose sur l’idée que certaines ressources sont gratuites, inépuisables ou sans valeur propre : l’eau, les forêts, le temps des femmes, les soins... En ignorant ces dimensions, World3 reconduit en partie cette logique.

Enfin, dans une perspective de décroissance, ce travail invisible prend une importance encore plus grande. Si l’on s’éloigne d’un modèle fondé sur la croissance matérielle, alors les activités de soin, de lien social et de reproduction deviennent centrales pour maintenir des sociétés viables et vivables. Cette reconnaissance du travail invisible fait d’ailleurs partie des propositions de réflexions des mouvements de décroissance. Reconnaître le rôle systémique du travail invisible semble donc être une étape clé pour construire des modèles plus justes et plus soutenables.

4.3 Approche des modèles de dynamiques des systèmes globaux sous l’angle du genre

Cette dernière section de la discussion propose d’élargir l’analyse en mobilisant une lecture féministe des modèles systémiques et en offrant des pistes pour des recherches futures. L’objectif

est de remettre en question les choix de modélisation actuels et d'envisager des alternatives plus inclusives et représentatives des dynamiques sociales réelles.

4.3.1 Taxonomie du sous-système socio-culturel

La couche socio-culturelle des systèmes monde est souvent la moins développée dans les modèles de dynamique des systèmes. Pour tenter de combler cette lacune, le mémoire propose une structuration de cette couche en trois niveaux : la famille, la société et les institutions. Chacun de ces niveaux comporte ses propres dynamiques et boucles de rétroaction, qui influencent directement ou indirectement la soutenabilité à long terme. Une explication plus détaillée de cette taxonomie est disponible en Annexe VII.

4.3.2 Apports d'une lecture féministe des systèmes dynamiques

Les modèles systémiques mondiaux comme World3 reproduisent une vision simplifiée et globale du monde, où les rapports sociaux, notamment les rapports de genre, sont souvent invisibilisés. Une lecture féministe de la dynamique des systèmes propose de mettre en lumière ces angles morts en identifiant les rôles différenciés, les rapports de pouvoir et les contributions non monétarisées mais essentielles au fonctionnement de nos sociétés.

Cette grille de lecture permet, entre autres, de requalifier certaines boucles de rétroaction comme relevant du soin ou des dynamiques de domination. Elle est présentée de manière détaillée en Annexe V.

4.3.3 Esquisse d'un nouveau modèle

À terme, l'intégration des dimensions sociales nécessite un changement d'architecture des modèles. Une simple adaptation de World3 montre rapidement ses limites, surtout pour représenter les rétroactions sociales complexes ou la diversité des trajectoires individuelles.

4.3.4 Nouvel indicateur écoféministe de soutenabilité

En plus des indicateurs traditionnels comme l'IDH ou l'IIG, il serait pertinent de développer un indicateur composite inspiré des approches écoféministes. Cet indicateur viserait à mieux refléter la soutenabilité équitable, en intégrant des dimensions sociales (égalité, soins, éducation) ainsi que des critères environnementaux et temporels.

Ce nouvel indicateur, dont une première formulation mathématique est proposée en Annexe VI, permettrait d'évaluer la robustesse d'un scénario à la fois en termes d'équité et de résilience écologique. Il pourra aussi servir d'exemple pour de futurs travaux de simulation ou d'évaluation des politiques publiques.

CONCLUSION

Ce mémoire s'inscrit dans un contexte de remise en question des modèles économiques traditionnels face aux défis écologiques, sociaux et démographiques contemporains. Alors que les frontières planétaires sont aujourd’hui largement reconnues, les modèles prospectifs comme World3 ont permis de démontrer les trajectoires d’effondrement possibles liées à une croissance illimitée. Pourtant, ces modèles, bien qu’innovants, présentent des angles morts importants, notamment en ce qui concerne les inégalités sociales et de genre.

C'est précisément pour combler ce manque que ce travail a cherché à intégrer des variables liées aux inégalités de genre dans le modèle World3. L'objectif était double : d'une part, enrichir la compréhension des dynamiques systémiques en tenant compte de dimensions sociales fondamentales ; d'autre part, évaluer dans quelle mesure des politiques sociales centrées sur l'émancipation des femmes peuvent influencer les trajectoires globales de soutenabilité.

Les résultats des différents scénarios montrent que les inégalités de genre dépendent fortement des choix politiques, technologiques et sociaux. Ils révèlent que l'égalité de genre ne se réduit pas automatiquement avec le développement : dans la plupart des scénarios, elle stagne voir se dégrade. Sauf dans le scénario IIG+, qui propose des politiques ciblées, où on observe qu'une amélioration simultanée de l'accès à l'éducation, à la santé reproductive et au marché du travail des femmes permet de réduire significativement l'IIG. Ces progrès sociaux contribuent à la stabilisation du système global, mais seulement s'ils sont accompagnés d'une transition écologique cohérente, c'est à dire entre autres une limitation de la production industrielle.

En intégrant ces dimensions dans World3, ce travail montre l'intérêt d'une approche féministe des modèles systémiques. Il permet de rendre visibles des aspects jusqu'à présent ignorés. Cependant, cette modélisation reste partielle et nécessite des prolongements. Comme la prise en

compte du travail invisible, des dynamiques intersectionnelles, des conflits sociaux

Ainsi, ce mémoire ne vise pas à produire un modèle prédictif exhaustif, mais à poser les bases d'une réflexion pour repenser les outils de modélisation en intégrant les enjeux de genre. Intégrer ces inégalités dans les modèles systémiques n'est pas simplement une question de méthode, mais une étape clé pour penser une transition systémique. C'est-à-dire une transition globale à la fois écologique, sociale et économique.

ANNEXE I

DIAGRAMME DYNAMO DE WORLD3

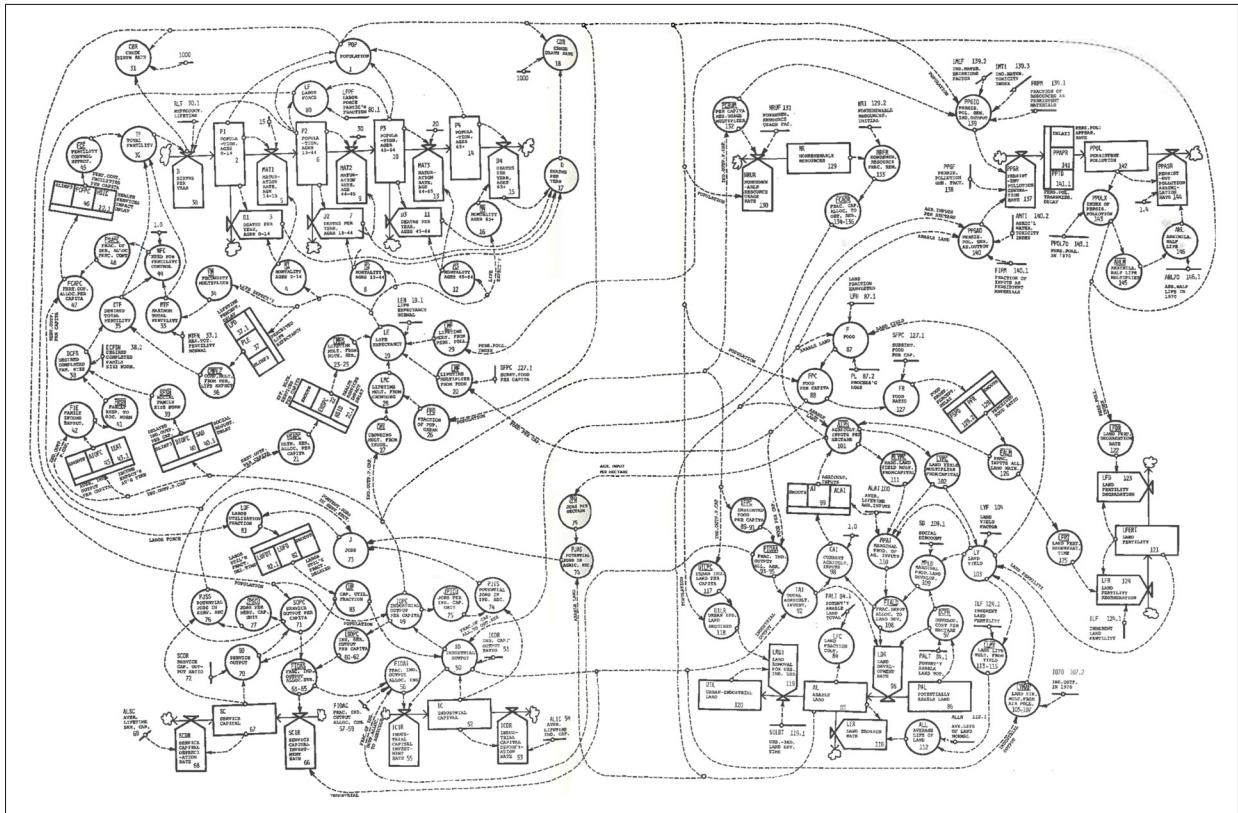
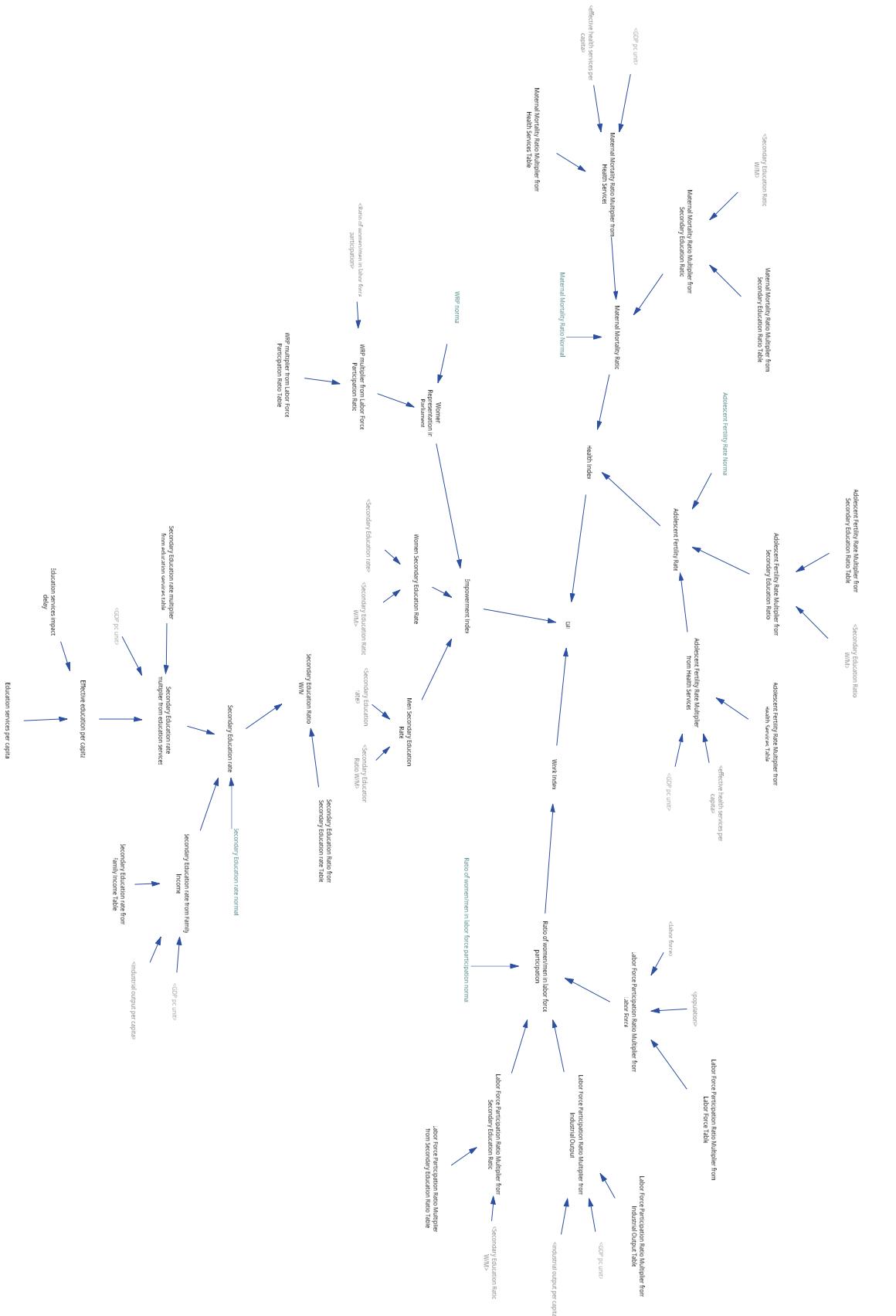


Figure-A I-1 Diagramme DYNAMO de World3
Tirée de Meadows *et al.*, (1974)

ANNEXE II

DIAGRAMME DE L'IIG SUR WORLD3 SUR VENSIM



ANNEXE III

PRINCIPAUX CHANGEMENTS DANS LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Tableau-A III-1 Principales variables modifiées selon les scénarios

Variable modifiée	Nom dans le modèle Vensim	BAU	BAU2	CT	SW
Stock initial de ressources non renouvelables	Initial Nonrenewable Resources	2×10^{12}	4×10^{12}	3×10^{12}	2×10^{12}
Rendement agricole (multiplicateur)	Land Yield Factor 2	1.0	1.0	1.5	1.2
Part du capital alloué à la dépollution	Frac Cap Pollution	0.05	0.05	0.10	0.07
Efficacité des investissements en dépollution	Pollution Control Efficiency	0.5	0.5	0.8	0.6
Efficacité d'utilisation des ressources	Resource Use Factor	1.0	1.0	1.5	1.3
Contrôle de la population	Population Control	/	/	/	Politique de limitation des naissances (2 enfants/famille)
Niveau de vie matériel	Standard of Living	Modéré	Modéré	Modéré avec consommation modérée	Modéré avec consommation rationnelle
Technologies de contrôle de pollution	Pollution Control Technologies	Basique	Basique	Avancé	De pointe, hautement efficaces
Technologies de gestion des ressources	Resource Management Technologies	Standard	Standard	Avancé avec optimisations	Technologies de pointe, maximisation de l'efficacité
Protection contre l'érosion des sols	Soil Erosion Protection	/	/	Avancée	/

ANNEXE IV

RÉSULTAT DES SCÉNARIOS DE WORLD3 AVEC L'IIG

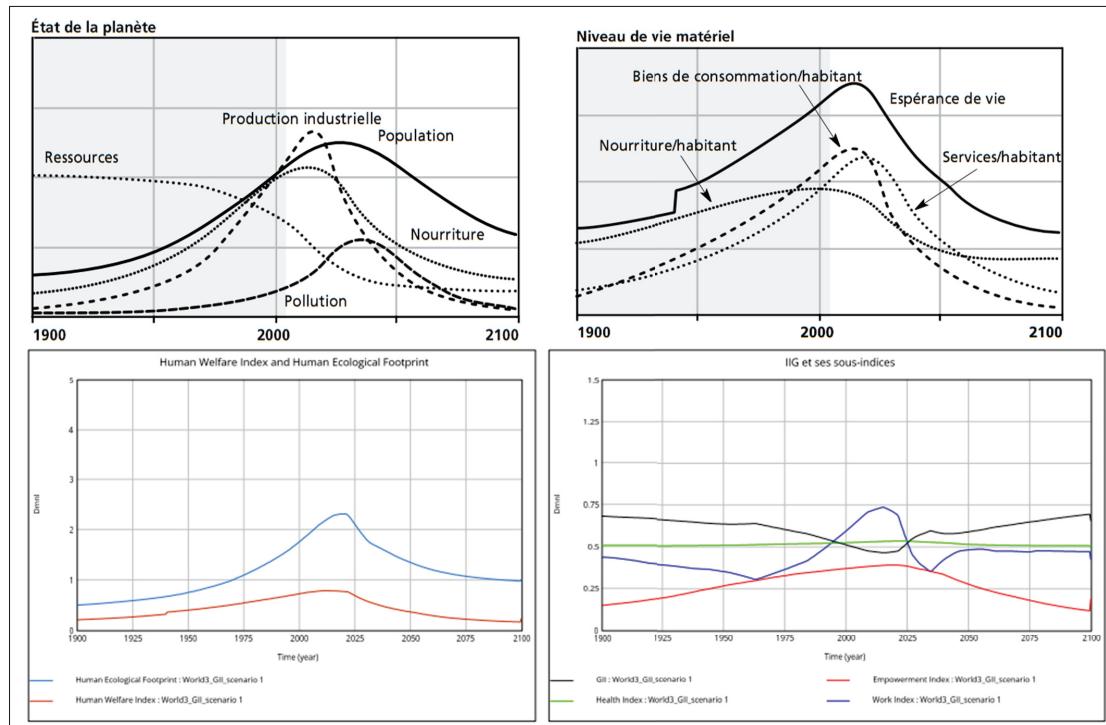


Figure-A IV-1 Résultats du scénario 1 (BAU)

Tirée de Meadows *et al.* (2013) et des simulations sur Vensim

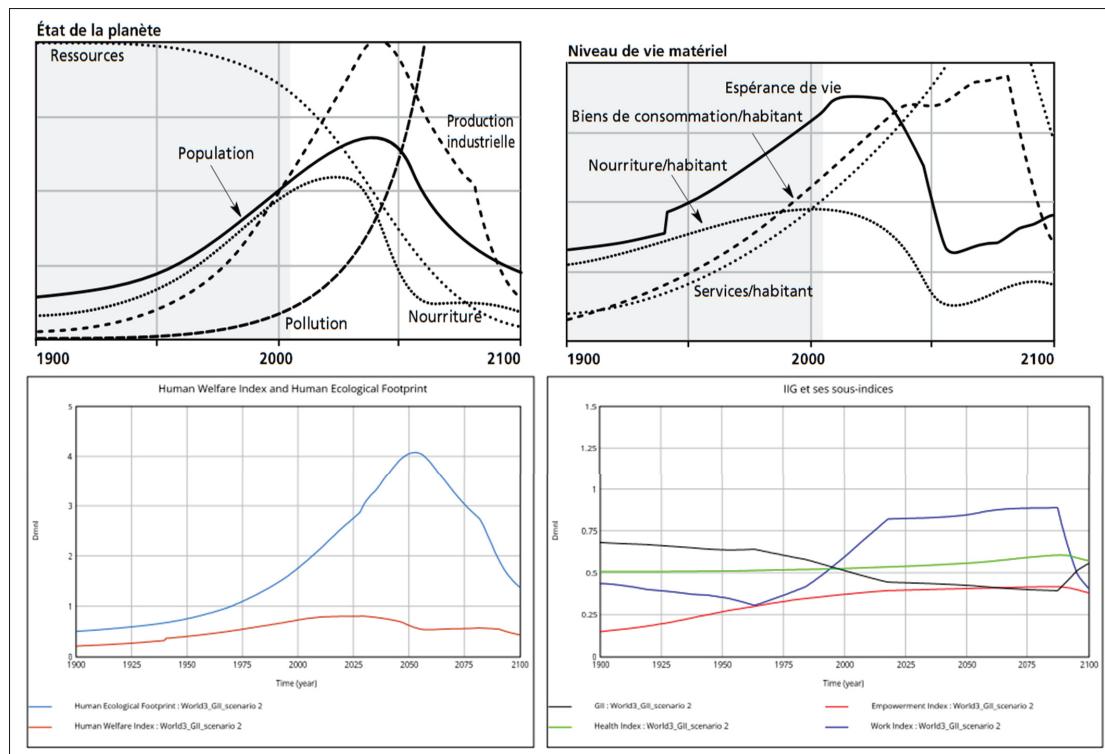


Figure-A IV-2 Résultats du scénario 2 (BAU2)
Tirée de Meadows *et al.* (2013) et des simulations sur Vensim

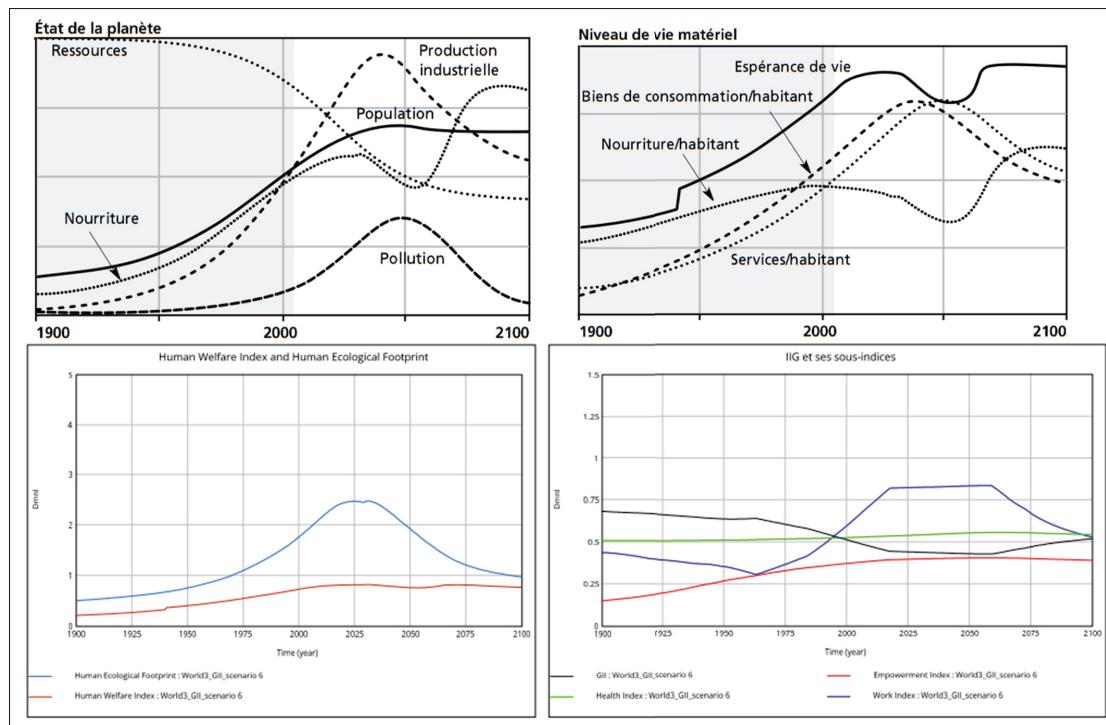


Figure-A IV-3 Résultats du scénario 6 (CT)
Tirée de Meadows *et al.* (2013) et des simulations sur Vensim

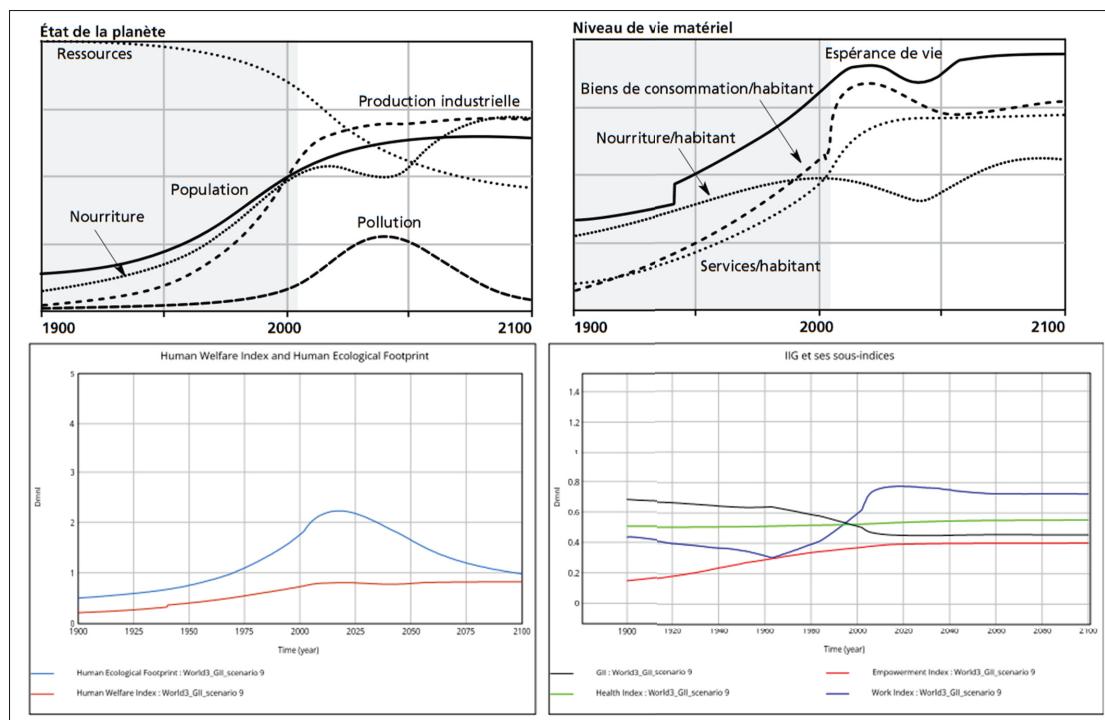


Figure-A IV-4 Résultats du scénario 9 (SW)
Tirée de Meadows *et al.* (2013) et des simulations sur Vensim

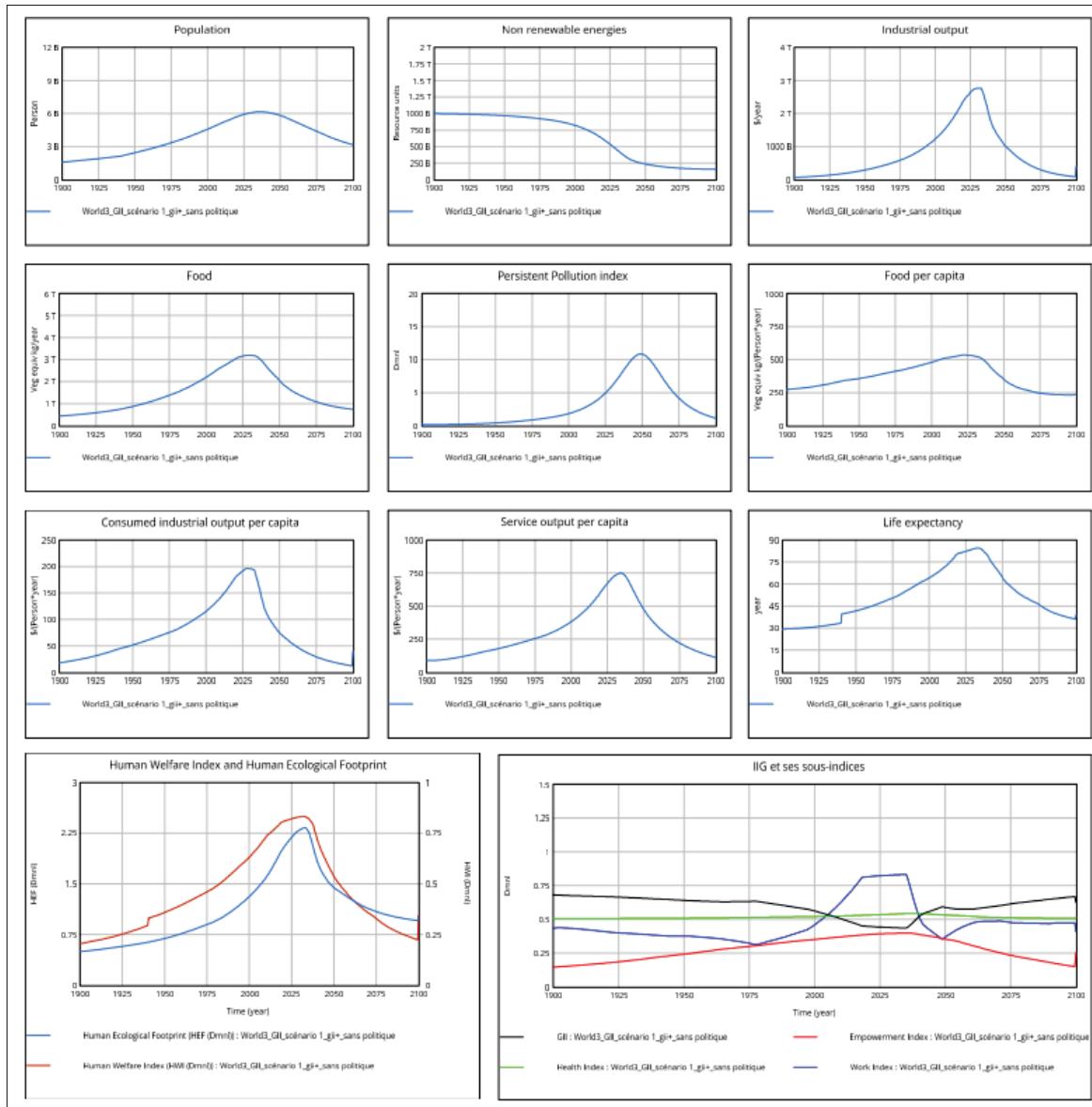


Figure-A IV-5 Résultats du scénario IIG+ sans politiques ciblées avec les hypothèses du scénario 1

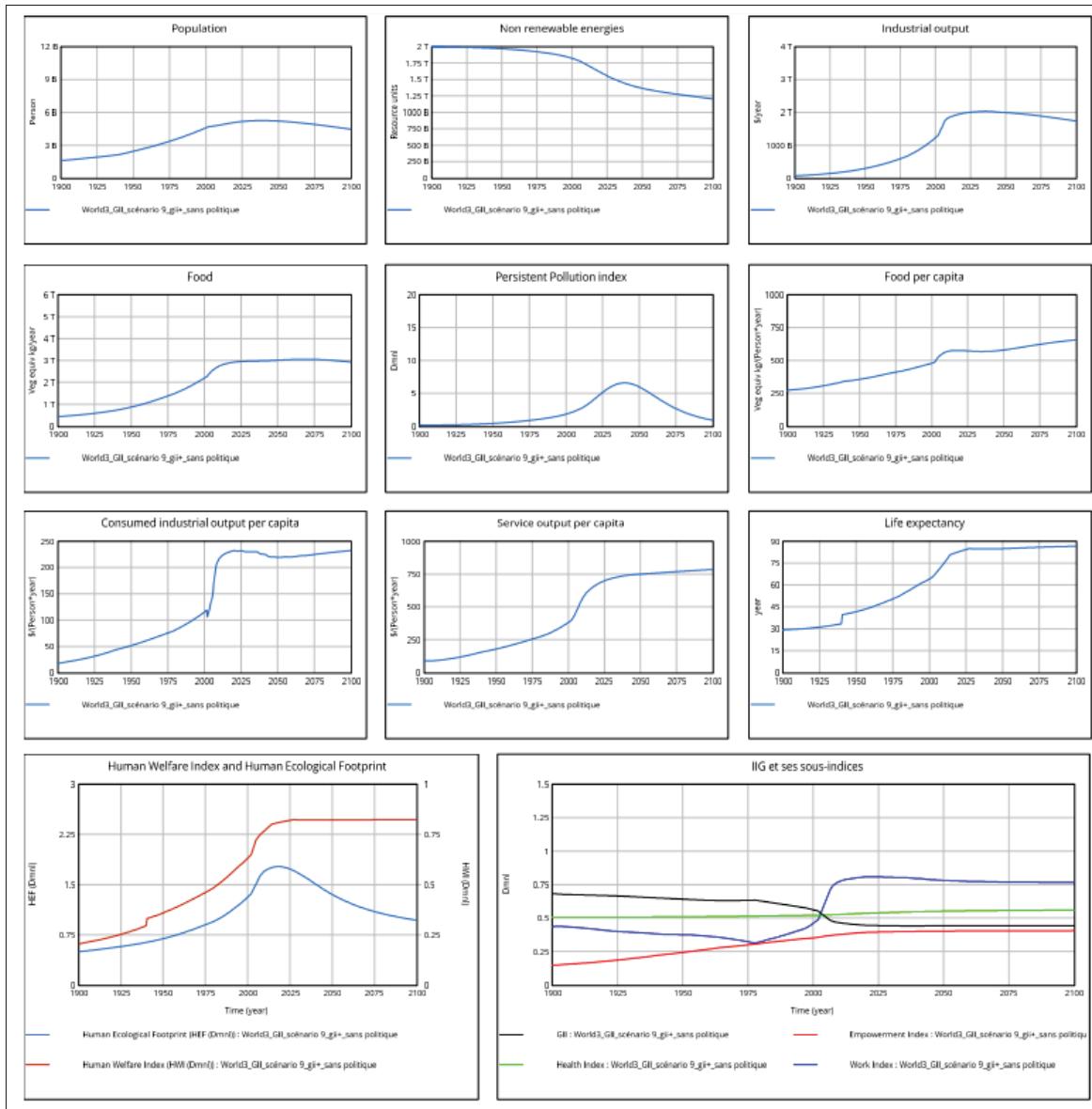


Figure-A IV-6 Résultats du scénario IIG+ sans politiques ciblées avec les hypothèses du scénario 9

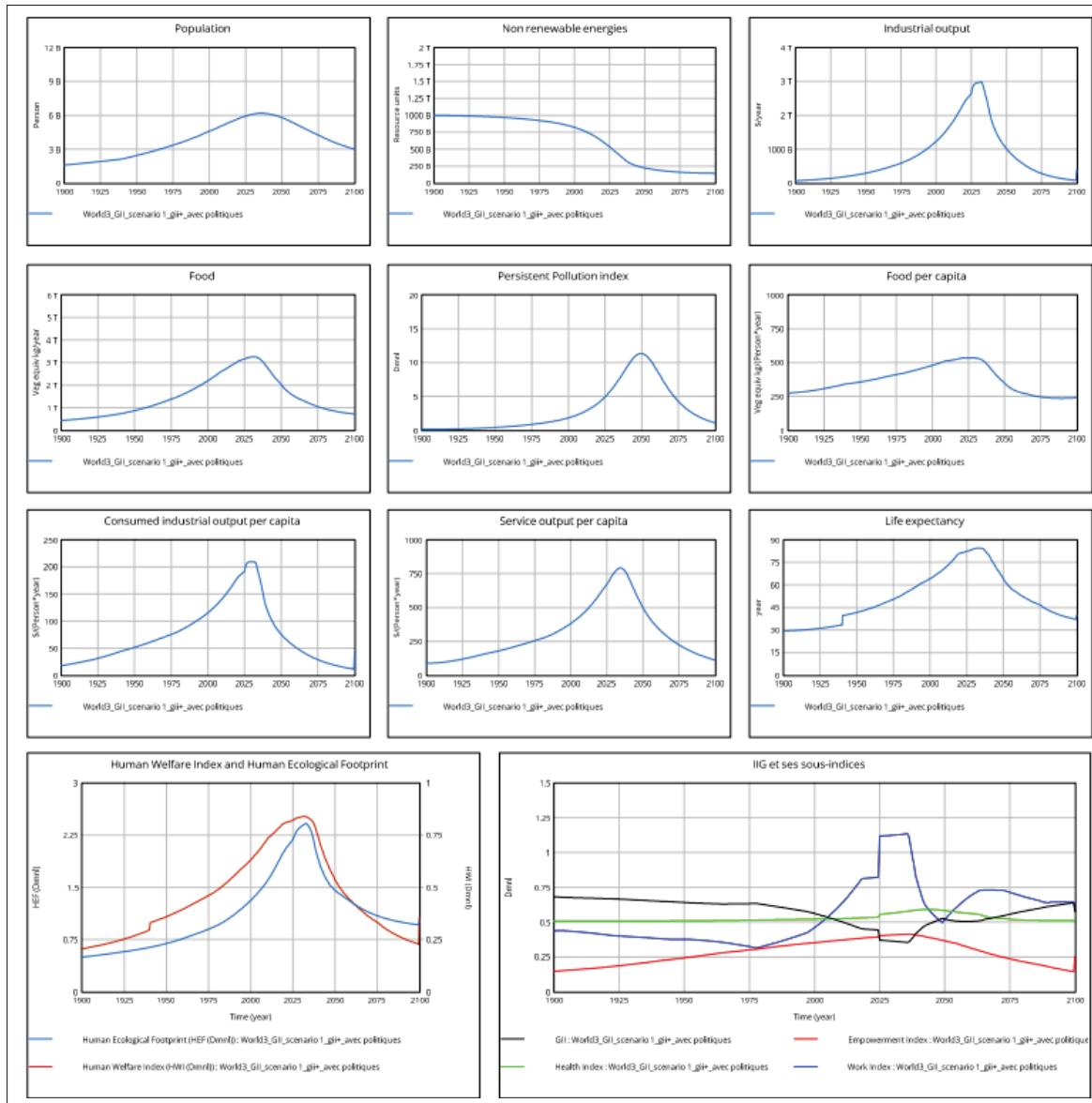


Figure-A IV-7 Résultats du scénario IIG+ avec les hypothèses du scénario 1

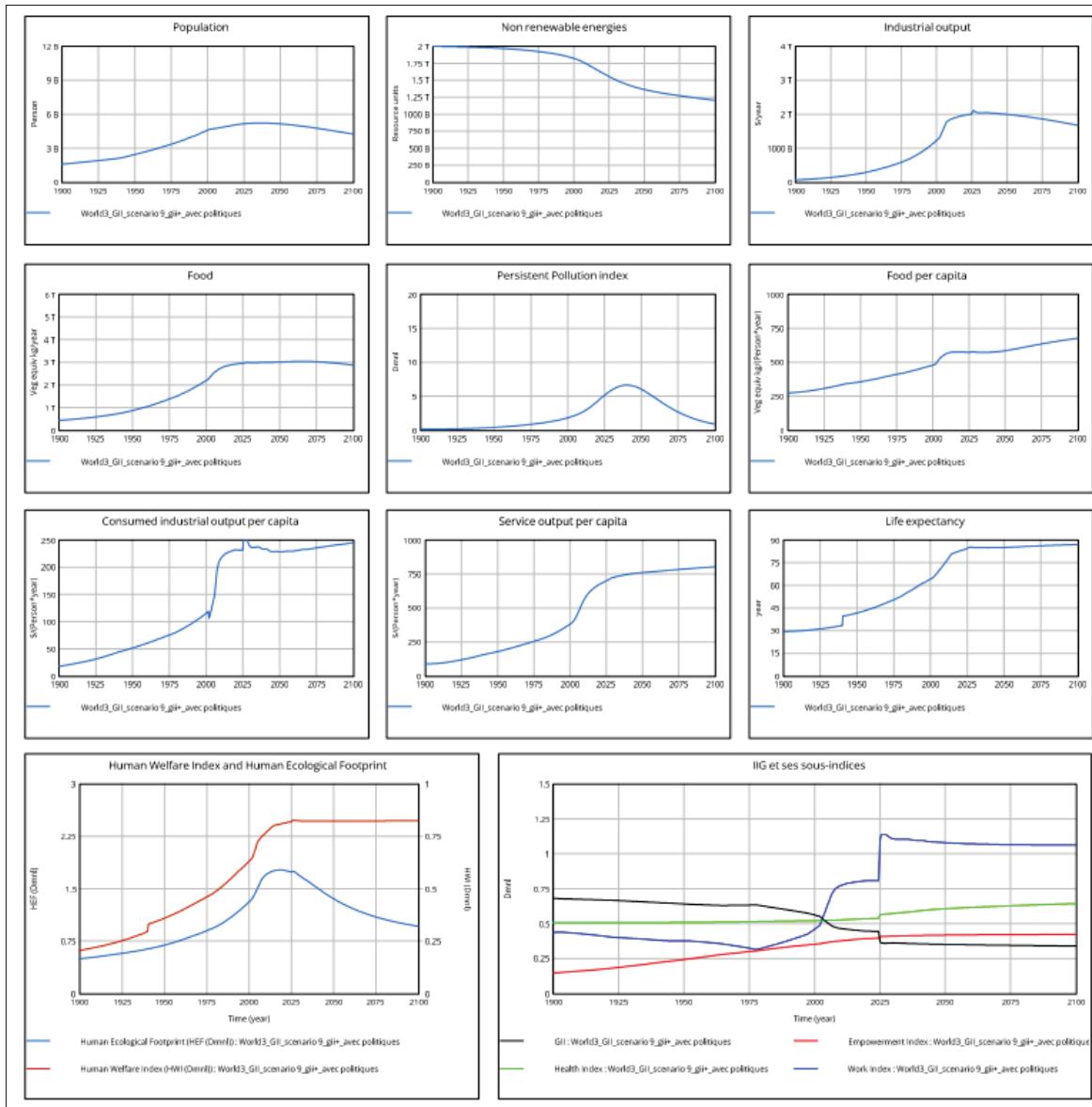


Figure-A IV-8 Résultats du scénario IIG+ avec les hypothèses du scénario 9

ANNEXE V

INTÉGRATION DES VARIABLES DE GENRE DANS LES MODÈLES DE DYNAMIQUE DES SYSTÈMES

Les modèles de dynamique des systèmes ont longtemps été utilisés pour simuler des phénomènes complexes en économie, environnement, démographie, et autres systèmes interconnectés. Toutefois, ces modèles n'ont pas, ou peu, intégré des variables de genre, ce qui limite leur capacité à refléter de manière fidèle les dynamiques sociales et économiques. Comme expliqué tout au long de ce rapport, l'intégration des variables de genre dans ces modèles peut permettre de mieux comprendre l'impact différencié des politiques sur les femmes et les hommes, ainsi que les dynamiques sociales sous-jacentes. Une grille de lecture systématique et des recommandations sont ainsi nécessaires pour guider cette intégration dans les futurs modèles. Ces recommandations reposent sur les informations que j'ai récoltées au cours de mes recherches et sur la base de la boîte à outils de l'UNDP sur les analyses de genre (UNDP, 2019). Elles ne sont donc pas exhaustives et nécessitent une validation par des spécialistes de l'analyse de genre ou d'autres domaines concernés.

1. Prise en compte des rôles économiques de genre

La première étape consiste à reconnaître les rôles économiques différenciés que jouent les femmes et les hommes dans les sociétés. Les modèles de dynamique des systèmes actuels ne tiennent souvent pas compte des rôles sociaux invisibles, comme le travail domestique non rémunéré et le travail de soins, principalement assumés par les femmes. Ces tâches jouent un rôle crucial dans le fonctionnement de l'économie et doivent être prises en compte, même si elles ne sont pas reflétées dans les indicateurs économiques classiques.

Pour y remédier, plusieurs pistes d'intégration peuvent être envisagées :

- Incorporer le travail non rémunéré dans les modèles en le quantifiant sous forme de variables de productivité ou de valeur économique (Gouvernement du Canada, 2022).

- Évaluer les impacts du travail invisible sur les secteurs productifs formels (industrie, agriculture, services) et sur la répartition du temps entre les femmes et les hommes.

2. Intégration des inégalités d'accès aux ressources

Les femmes et les hommes n'ont pas le même accès aux ressources (terre, crédit, éducation, capital, ...). Les inégalités économiques et sociales de genre créent des barrières systémiques. Par exemple, l'accès limité des femmes à la terre ou aux financements affecte leur capacité à entreprendre ou à intégrer certains marchés.

Propositions :

- Modéliser l'accès différencié aux ressources dans les paramètres du modèle.
- Représenter les rôles de genre spécifiques dans chaque secteur d'activité (santé, éducation, agriculture, ...).

3. Analyse des politiques différencierées par genre

Les politiques économiques et environnementales affectent différemment les femmes et les hommes, en raison des rôles sociaux. Par exemple, les femmes étant souvent responsables de la gestion des ressources ou de l'éducation, elles peuvent être plus touchées par les changements climatiques ou éducatifs (UNDP, 2025b).

Propositions :

- Intégrer une analyse genrée des politiques dans les modèles.
- Représenter la participation des femmes à la gouvernance (climat, ressources naturelles).

4. Mesure des inégalités de pouvoir

Les femmes ont souvent un pouvoir économique, politique et social limité, ce qui freine leur influence sur les politiques. Cela nécessite de :

- Intégrer des variables de pouvoir, comme la part des femmes dans les instances décisionnelles.

- Quantifier l'influence des femmes dans les réseaux économiques et politiques.

5. Différences d'impact face aux crises

Les femmes, en particulier les plus précaires, sont souvent plus vulnérables face aux crises (changements climatiques, pandémies, catastrophes naturelles) (ONU, 2021).

Suggestions :

- Intégrer la vulnérabilité genrée dans les simulations.
- Modéliser les réactions différencierées aux chocs et les stratégies d'adaptation.

6. Suivi et évaluation différenciée

Une fois les variables de genre intégrées, il faut suivre et évaluer leurs effets.

Recommandations :

- Mettre en place des indicateurs genrés (emploi, santé, accès au crédit...).
- Évaluer les effets différencierés sur des groupes spécifiques : femmes rurales, migrantes, informelles.

Conclusion : Intégrer les variables de genre dans les modèles de dynamique des systèmes est une étape essentielle pour développer des politiques publiques plus justes et adaptées aux réalités sociales. Cela permettrait de mieux prendre en compte les rôles différencierés, les inégalités structurelles et les vulnérabilités spécifiques, en particulier celles des femmes, pour construire une société plus équitable et résiliente.

ANNEXE VI

PROPOSITION D'UN INDICE DE RÉSILIENCE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (IRSE)

Afin de dépasser les limites des indicateurs économiques traditionnels et mieux intégrer les dimensions sociales, il est pertinent de proposer un indicateur permettant de mesurer à la fois la résilience écologique et les inégalités sociales, en particulier celles liées au genre. Dans cette perspective, la création d'un Indice de Résilience Socio-Écologique (IRSE) permettrait de rendre compte de la capacité d'un système socio-économique à faire face aux chocs environnementaux et économiques tout en intégrant les disparités structurelles entre groupes sociaux. Cet indicateur vise à combler un vide méthodologique dans les modèles actuels, en combinant des dimensions environnementales, économiques et sociales, avec une attention spécifique aux inégalités de genre.

L'IRSE pourrait reposer sur trois composantes principales :

1. **La vulnérabilité sociale**, intégrant des indicateurs d'inégalités de genre (écart d'accès à l'éducation, à l'emploi formel, à la santé reproductive), d'inégalités économiques internes (répartition des revenus, pauvreté multidimensionnelle), et d'accès différencié aux services publics.
2. **La résilience écologique**, qui évalue la capacité des systèmes naturels et humains à absorber les perturbations tout en conservant leur structure fonctionnelle. Elle s'appuie sur des données telles que la diversité des écosystèmes, l'usage durable des ressources ou l'exposition aux risques climatiques.
3. **L'inclusivité institutionnelle et politique**, à travers la représentation des femmes dans les organes de décision, leur accès à la propriété, ou encore leur rôle dans la gestion des ressources.

Méthodologiquement, l'IRSE serait conçu comme un indicateur composite, calculé à partir de variables quantitatives normalisées sur une échelle de 0 à 1. Chaque sous-indicateur serait pondéré selon sa pertinence contextuelle (par exemple, une pondération plus forte pour les indicateurs de genre dans les pays à forte discrimination structurelle). Le score final permettrait

d'évaluer la robustesse d'un système social à résister à des crises tout en assurant une distribution équitable des ressources et des capacités d'adaptation. L'indicateur aurait alors la forme suivante :

$$IRSE = \alpha * V_s + \beta * R_e + \gamma * I_i \quad (\text{A VI-1})$$

avec $\alpha + \beta + \gamma = 1$ et où :

- V_s représente la vulnérabilité sociale ;
- R_e représente la résilience écologique ;
- I_i représente l'inclusivité institutionnelle.

L'IRSE pourrait devenir un outil stratégique d'évaluation des politiques de transition écologique, en mesurant les effets différenciés sur les femmes et sur les populations vulnérables. Il permettrait également de mieux anticiper les points de rupture sociaux dans les trajectoires climatiques, en éclairant les synergies possibles entre justice sociale et soutenabilité écologique. L'intégration d'un tel indicateur dans les modèles de dynamique des systèmes constitue une étape essentielle pour une planification véritablement systémique, durable et inclusive. L'indicateur présente tout de même de nombreuses limites, il repose sur des données parfois incomplètes, l'agrégation linéaire masque les interactions complexes entre facteurs. De plus, il adopte une vision binaire du genre et ignore d'autres formes de discriminations.

ANNEXE VII

TAXONOMIE DU SOUS-SYSTÈME SOCIO-CULTUREL

La taxonomie des systèmes monde proposée par Donges *et al.* ne détaille pas la sous-couche socio-culturelle CUL. Étant donné qu'il s'agit de la moins détaillée, voici quelques-uns des éléments qui sont le plus ressortis afin de la structurer, comme la sous-couche biophysique (ENV) peut l'être aujourd'hui, avec des boucles bien identifiées au sein des océans, de l'atmosphère puis des liens entre les deux. Enfin, la sous-couche socio-métabolique MET ne nous intéresse ici que dans la mesure où chaque être humain n'a pas le même impact sur son environnement suivant son niveau de vie, son lieu de vie, son genre et d'autres déterminants plus ou moins importants.

Les données socio-culturelles agissent et se construisent à différent niveau de la vie d'une personne. Ainsi, pour mieux comprendre comment différentes entités influencent et sont influencées par les processus écologiques et économiques, la décomposition du sous-système CUL en catégories distinctes est nécessaire.

- Famille : La famille peut jouer un rôle central dans les dynamiques de consommation, les rapports de pouvoir entre les sexes, et la gestion des ressources, en particulier dans des contextes féministes et de décroissance. Les décisions sur le travail, la répartition des tâches, et la consommation sont souvent prises au sein du foyer, ce qui en fait un élément clé du système socio-culturel.
- Société : L'analyse des rôles sociaux et des attentes liées au genre, au travail, et à la consommation dans la société en général permet de saisir les grandes tendances culturelles et sociales. Cela inclut des sujets comme les normes de consommation, l'éducation, et les inégalités structurelles.
- Institutions : Les institutions publiques et privées, telles que le marché du travail, les services sociaux et la politique de santé, ont un impact direct sur les inégalités de genre et sur les transitions vers des modèles de décroissance. Distinguer ces institutions dans un modèle systémique permet de mieux comprendre où et comment des interventions ciblées peuvent être efficaces.

Avec une telle décomposition, le lien avec la sous-couche MET se fait de manière assez intuitive. Il s'agit du même genre de découpage que l'introduction de variables régionales pour affiner des résultats disponibles habituellement au niveau mondial. La taxonomie peut aller plus loin dans l'inclusivité, notamment dans la modélisation de la population. Avec, par exemple, l'intégration dans les structures sociales, culturelles et institutionnelles d'une vision plus inclusive des discriminations croisées (race, genre, sexualité, classe sociale).

Chacun de ces déterminants implique des boucles de rétroaction aux trois niveaux du sous-système CUL (famille, société, institutions). Ces pistes ne sont pas forcément réalistes ou même souhaitables afin de ne pas stigmatiser les relations entre individus. En effet, la modélisation de la famille a forcément un impact sur certaines données, car la manière de fonctionner ou bien le modèle familial mis en avant comme avec la famille nucléaire dans les années 1980 ont fortement impacté les droits des femmes et des travailleurs. Il s'agit ici d'un exemple de modélisation en dehors de l'objectif premier de World3. Théoriquement, de nombreux modèles ont été réalisés sur ces phénomènes là du côté sociologique, historique et parfois statistique mais la nécessité de montrer ces phénomènes systémiques semble plus que jamais primordiale dans le but de clarifier les interactions et les théories et de les soutenir ou non.

BIBLIOGRAPHIE

- Abraham, Y.-M. (2019). *Guérir du mal de l'infini : produire moins, partager plus, décider ensemble*. Montréal (Québec) : Écosociété.
- Adhikari, S., Lutz, W. & Kebede, E. (2024). Forecasting Africa's fertility decline by female education groups. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(46), e2320247121. doi : 10.1073/pnas.2320247121. Publisher : Proceedings of the National Academy of Sciences.
- Alfred J.Lotka. (1925). *Elements of Physical Biology*. Williams and Wilkins Company. Repéré à <http://archive.org/details/elementsofphysic017171mbp>.
- Amina Otieno, David Mwangi & Peter Kariuki. (2024). Gender Equality in Education : Progress and Barriers in Secondary School Enrollment. *International Journal of Educational Development*, 1(1), 26–30. doi : 10.61132/ijed.v1i1.125.
- Bank, W. (2023). *Rapport Annuel 2023 : Une Nouvelle Ère du Développement*. Repéré à <https://documents.banquemonde.org/fr/publication/documents-reports/documentdetail/en/099340510112314081>.
- Bank, W. (2024). Éducation - Vue d'ensemble. Repéré à <https://www.banquemonde.org/fr/topic/education/overview>.
- Barbrook-Johnson, P. & Penn, A. S. (2022). System Dynamics. Dans Barbrook-Johnson, P. & Penn, A. S. (Éds.), *Systems Mapping : How to build and use causal models of systems* (pp. 113–128). Cham : Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-031-01919-7_8.
- Bardi, U. (2011). *The Limits to Growth Revisited*. New York, NY : Springer. doi : 10.1007/978-1-4419-9416-5.
- Barla, P. K. (2022). A situation analysis on malnutrition by food-intake practices : link to maternal and child mortality in India. *International Journal Of Community Medicine And Public Health*, 10(1), 502. doi : 10.18203/2394-6040.ijcmph20223581.
- Barton, C., Audickas, L., Cracknell, R. & Tunnicliffe, R. (2022). Social background of Members of Parliament 1979-2019. Repéré à <https://commonslibrary.parliament.uk/research-briefings/cbp-7483/>.
- Bertay, A. C., Dordevic, L. & Sever, C. (2020). Gender Inequality and Economic Growth : Evidence from Industry-Level Data. *IMF Working Papers*, 20(119). doi : 10.5089/9781513546278.001.

- Bledsoe, C. H. & Cohen, B. (1993). Levels and Trends in Adolescent Fertility. Dans *Social Dynamics of Adolescent Fertility in Sub-Saharan Africa*. National Academies Press (US). Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK236791/>.
- Bodiguel, J. (2015). Objectif de Développement Durable : égalité des sexes. Repéré à <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/gender-equality/>.
- Bravo-Ortega, C., Eterovic, N. & Paredes, V. (2020). Female participation in parliament. Are we ever going to converge to Scandinavia ? *Economic Systems*, 44(2), 100759. doi : 10.1016/j.ecosys.2020.100759.
- Castro, R. (2012). Arguments on the Imminence of Global Collapse Are Premature when Based on Simulation Models. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 21(4), 271–273. doi : 10.14512/gaia.21.4.9.
- Chancel, L., Piketty, T., Saez, E. & Zucman, G. (2021). *The World Inequality Report 2022*. Repéré à [//wir2022.wid.world/download/](https://wir2022.wid.world/download/).
- Chemin, A. (2017). Thomas Malthus ou l'obsession de la rareté. Repéré à https://www.lemonde.fr/idees/article/2017/12/07/thomas-malthus-ou-l-obsession-de-la-rarete_5226161_3232.html.
- Cole, H. S. D., Freeman, C., Jahoda, M. & Pavitt, K. (1973). *Models of doom ; a critique of The limits to growth*. New York, Universe Books. Repéré à <http://archive.org/details/modelsofdoomcrit00cole>.
- Cresswell, J. A., Alexander, M., Chong, M. Y. C., Link, H. M., Pejchinovska, M., Gazeley, U., Ahmed, S. M. A., Chou, D., Moller, A.-B., Simpson, D., Alkema, L., Villanueva, G., Sguassero, Y., Tuncalp, O., Long, Q., Xiao, S. & Say, L. (2025). Global and regional causes of maternal deaths 2009–20 : a WHO systematic analysis. *The Lancet Global Health*, 13(4), e626–e634. doi : 10.1016/S2214-109X(24)00560-6. Publisher : Elsevier.
- Cuberes, D. & Teignier, M. (2016). Aggregate Effects of Gender Gaps in the Labor Market : A Quantitative Estimate. *Journal of Human Capital*, 10(1), 1–32. doi : 10.1086/683847.
- Daly, H. E. (1974). The Economics of the Steady State. *The American Economic Review*, 64(2), 15–21. Repéré à <https://www.jstor.org/stable/1816010>. Publisher : American Economic Association.
- de Gouges, O. (1791). Déclaration des droits de la femme et de la citoyenne. Repéré à <https://gallica.bnf.fr/essentiels/anthologie/declaration-droits-femme-citoyenne-0>.

- De Jongh, D. (1978). Structural parameter sensitivity of the ‘limits to growth’ world model. *Applied Mathematical Modelling*, 2(2), 77–80. doi : 10.1016/0307-904X(78)90043-4.
- Delmas, B. (2004). Pierre-François Verhulst et la loi logistique de la population. *Mathématiques et sciences humaines*, (167). doi : 10.4000/msh.2893.
- DESA, U. (2024). World Population Prospects [Excel]. Repéré à <https://population.un.org/wpp/>.
- Dixson-Declève, S., Gaffney, O., Ghosh, J., RANDERS, J., Rockström, J. & Stoknes, P. E. (2022). *Earth for All : A Survival Guide for Humanity - Résumé analytique*. Repéré à https://earth4all.life/wp-content/uploads/2023/09/Earth4All_Exec_Summary_FR.pdf.
- Dixson-Declève, S., Gaffney, O., Ghosh, J., Rockström, J., Randers, J. & Stoknes, P. E. (2023). *Terre pour tous : nouveau rapport au Club de Rome*. Arles : Actes Sud.
- Diz-Pita, & Otero-Espinar, M. V. (2021). Predator–Prey Models : A Review of Some Recent Advances. *Mathematics*, 9(15), 1783. doi : 10.3390/math9151783.
- Doepke, M., Hannusch, A., Kindermann, F. & Tertilt, M. (2023). The economics of fertility : a new era. Dans Lundberg, S. & Voena, A. (Éds.), *Handbook of the Economics of the Family* (vol. 1, pp. 151–254). North-Holland. doi : 10.1016/bs.hefam.2023.01.003.
- Donges, J., Lucht, W., Cornell, S., Heitzig, J., Barfuss, W., Lade, S. & Schlüter, M. (2021). Taxonomies for structuring models for World–Earth systems analysis of the Anthropocene : subsystems, their interactions and social–ecological feedback loops. *Earth System Dynamics*, 12, 1115–1137. doi : 10.5194/esd-12-1115-2021.
- Ejaz, M. (2007). Determinants of Female Labor Force Participation in PakistanAn Empirical Analysis of PSLM (2004-05) Micro Data. *THE LAHORE JOURNAL OF ECONOMICS*, 12(Special Edition). doi : 10.35536/lje.2007.v12.isp.a10.
- EM2030. (2024). *Un avenir égalitaire en matière de genre en crise ? Résultats de l’Indice de Genre des ODD 2024*. Seattle. Repéré à https://equalmeasures2030.org/wp-content/uploads/2024/09/EM2030_2024_SDG_Gender_Index_FR_digital.pdf.
- European Institute for Gender Equality. (2024). *Gender Equality Index 2024 : sustaining momentum on a fragile path*. LU : Publications Office. Repéré à <https://data.europa.eu/doi/10.2839/9523460>.
- Evans, D. K., Akmal, M. & Jakiela, P. (2021). Gender gaps in education : The long view¹. *IZA Journal of Development and Migration*, 12(1), 20210001. doi : 10.2478/izajodm-2021-0001.

- Fausto-Sterling, A. (2000). *Sexing the body : gender politics and the construction of sexuality*. New York, NY : Basic Books. Repéré à <http://archive.org/details/sexingbodygender0000faus>.
- Federici, S. (2014). *Caliban and the witch* (éd. Second, revised edition). Brooklyn, NY : Autonomedia.
- Ferrant, G. (2010). The Gender Inequalities Index (GII) as a new way to measure Gender Inequalities in Developing countries. Repéré à <https://shs.hal.science/halshs-00462463>.
- Folbre, N. & Nelson, J. A. (2000). For Love or Money—Or Both? *Journal of Economic Perspectives*, 14(4), 123–140. doi : 10.1257/jep.14.4.123.
- Forrester, J. W. (1968). *Principes des systèmes* (éd. 3e e). Lyon : Presses universitaires de Lyon.
- Furuta, M. & Salway, S. (2006). Women's position within the household as a determinant of maternal health care use in Nepal. *International Family Planning Perspectives*, 32(1), 17–27. doi : 10.1363/3201706.
- Garbett, A., Perelli-Harris, B. & Neal, S. (2021). The Untold Story of 50 Years of Adolescent Fertility in West Africa : A Cohort Perspective on the Quantum, Timing, and Spacing of Adolescent Childbearing. *Population and Development Review*, 47(1), 7–40. doi : 10.1111/padr.12384. Publisher : Wiley.
- GEM Report UNESCO. (2015). *Education for All Global Monitoring Report 2015 : Education for All 2000-2015 : Achievements and challenges*. GEM Report UNESCO. doi : 10.54676/LBSF6974.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press. doi : 10.4159/harvard.9780674281653.
- Goldin, C. (1994). *The U-Shaped Female Labor Force Function in Economic Development and Economic History*. Cambridge, MA. Repéré à <http://www.nber.org/papers/w4707.pdf>.
- Gouvernement du Canada, S. C. [Last Modified : 2022-03-17]. (2022). Estimation de la valeur économique du travail ménager non rémunéré au Canada, 2015 à 2019. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/13-605-x/2022001/article/00001-fra.htm>.
- Group, W. B. (2018). Missed Opportunities : The High Cost of Not Educating Girls. Repéré à https://www.worldbank.org/en/topic/education/publication/missed-opportunities-the-high-cost-of-not-educating-girls?utm_source=chatgpt.com.

- Guivarch, C. & Taconet, N. (2020). Inégalités mondiales et changement climatique. *Revue de l'OFCE*, 165(1), 35–70. doi : 10.3917/reof.165.0035. Publisher : OFCE.
- Hamal, M., Dieleman, M., De Brouwere, V. & de Cock Buning, T. (2020). Social determinants of maternal health : a scoping review of factors influencing maternal mortality and maternal health service use in India. *Public Health Reviews*, 41(1), 13. doi : 10.1186/s40985-020-00125-6.
- Herrington, G. (2021). Update to limits to growth : Comparing the World3 model with empirical data. *Journal of Industrial Ecology*, 25(3), 614–626. doi : 10.1111/jiec.13084. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jiec.13084>.
- Högberg, U. & Wall, S. (1986). Secular trends in maternal mortality in Sweden from 1750 to 1980. *Bulletin of the World Health Organization*, 64(1), 79–84. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2490919/>.
- ILOSTAT. (2013). Labour force participation rate. Repéré à <https://ilo.org/data/snapshots/labour-force-participation-rate/>.
- INA. (2024). 1972 : les alertes pour la planète du rapport Meadows | INA. Repéré à <https://www.ina.fr/ina-eclaire-actu/1972-les-alertes-pour-la-planete-du-rapport-meadows>.
- INRAE. (2020). One Health, une seule santé. Repéré à <https://www.inrae.fr/alimentation-sante-globale/one-health-seule-sante>.
- IPBES. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. Repéré à <https://zenodo.org/records/6417333>.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (éd. 1). Cambridge University Press. doi : 10.1017/9781009157896.
- IPU. (2019). Women in parliament : 1945-2018 [XLS]. Repéré le 2025-07-30 à <https://data.ipu.org/dataset/percentage-of-women-in-parliament-between-1945-2018/>.
- IPU. (2024). Monthly ranking of women in national parliaments. Repéré à <https://data.ipu.org/women-ranking/>.
- ISU. (2013). *Classification Internationale Type de l'Éducation CITE 2011*.
- Jancovici, J.-M. (2003). Rapport du Club de Rome – Donella Meadows, Dennis Meadows, Jørgen Randers et William W. Behrens III – 1972 –. Repéré à <https://jancovici.com/recension-de-lectures/societes/rapport-du-club-de-rome-the-limits-of-growth-1972/>.

- Jarry, C. (2022). Les femmes, premières victimes lors des conflits. Repéré à <https://www.oxfamfrance.org/humanitaire-et-urgences/violences-de-genre-et-conflits-les-femmes-paient-le-prix-fort/>.
- Jarry, C. (2024). Rapport Oxfam 2024 : Multinationales et inégalités multiples. Repéré à <https://www.oxfamfrance.org/rapports/multinationales-et-inegalites-multiples/>.
- Jaumotte, F. (2004). Labour Force Participation of Women : Empirical Evidence on The Role of Policy and Other Determinants in OECD Countries. *OECD Economic Studies*.
- Kali Pal, K., Piaget, K., Zahidi, S. & Baller, S. (2024). *Global Gender Gap Report 2024*. Suisse. Repéré à <https://www.weforum.org/publications/global-gender-gap-report-2024/>.
- Kenworthy, L. & Malami, M. (1999). Gender Inequality in Political Representation : A Worldwide Comparative Analysis. *Social Forces*, 78(1), 235–268. doi : 10.2307/3005796. Publisher : Oxford University Press.
- Kidman, R. & Heymann, J. (2018). Prioritising action to accelerate gender equity and health for women and girls : Microdata analysis of 47 countries. *Global Public Health*, 13(11), 1634–1649. doi : 10.1080/17441692.2018.1427272.
- Kim, J. (2023). Female education and its impact on fertility. *IZA World of Labor*. doi : 10.15185/izawol.228.
- Klasen, S. & Lamanna, F. (2009). The Impact of Gender Inequality in Education and Employment on Economic Growth : New Evidence for a Panel of Countries. *Feminist Economics*, 15(3), 91–132. doi : 10.1080/13545700902893106.
- Lab, H. C. D. (2017). Edu20c. Repéré à <https://edu20c.org/>.
- Latouche, S. (2007). *Petit traité de la décroissance sereine*. Paris : Éd. Mille et une nuits.
- Lomborg, B. & Rubin, O. (2002). Limits to Growth. *Foreign Policy*, (133), 42–44. doi : 10.2307/3183554. Publisher : Washingtonpost.Newsweek Interactive, LLC.
- Malthus, T.-R. (1798). *Essai sur le principe de population*. Repéré à http://archive.org/details/principe_de_population.
- Man, L. B., Abdul Rahman, N. & Arsal, Z. (2021). Determinants of Labour Force Participation Rate in Malaysia from Gender Perspective. *Journal of Statistical Modelling and Analytics*, 3(2), 109–121. doi : 10.22452/josma.vol3no2.7.

- Manabe, S., Smagorinsky, J. & Strickler, R. F. (1965). SIMULATED CLIMATOLOGY OF A GENERAL CIRCULATION MODEL WITH A HYDROLOGIC CYCLE. *Monthly Weather Review*, 93(12), 769–798. doi : 10.1175/1520-0493(1965)093<0769:SCOAGC>2.3.CO;2. Publisher : American Meteorological Society Section : Monthly Weather Review.
- Meadows, D. L., Behrens, W. W., Meadows, D. H., Naill, R. F., Randers, J. & Zahn, E. (Éds.). (1974). *Dynamics of growth in a finite world*. Cambridge, Mass : Wright-Allen.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. & Behrens III, W. W. (1972). *Limits to Growth*. Repéré à <https://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf>.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. & Abraham, Y.-M. (2013). *Les limites à la croissance dans un monde fini : le Rapport Meadows, 30 ans après*. Montréal (Québec) : Les éditions Écosociété.
- Mies, M., Shiva, V. & Rubinstein, (1998). *Ecoféminisme*. Paris Montréal (Québec) : l'Harmattan.
- mondiale, B. (2018). *Rapport sur le développement dans le monde 2018 : Apprendre pour réaliser la promesse de l'éducation*. Washington, D.C : The World Bank. doi : 10.1596/978-1-4648-1318-4.
- Mote, S., Rivas, J. & Kalnay, E. (2020). A Novel Approach to Carrying Capacity : From a priori Prescription to a posteriori Derivation Based on Underlying Mechanisms and Dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48(Volume 48, 2020), 657–683. doi : 10.1146/annurev-earth-053018-060428. Publisher : Annual Reviews.
- Motesharrei, S., Rivas, J. & Kalnay, E. (2014). Human and nature dynamics (HANDY) : Modeling inequality and use of resources in the collapse or sustainability of societies. *Ecological Economics*, 101, 90–102. doi : 10.1016/j.ecolecon.2014.02.014.
- Moumen, H. (2023). *Ending Child Marriage : A profile of progress in India*. Repéré à <https://data.unicef.org/resources/ending-child-marriage-a-profile-of-progress-in-india-2023/>.
- Myrtveit, M. (2005). *The World Model Controversy*. Magne Myrtveit, Hellandsneset 81, 5936 Manger, Norway. Repéré à <https://bora.uib.no/bora-xmlui/handle/1956/1974>.
- Météo-France. (2021). De nouveaux modèles de système Terre pour dessiner les futurs climatiques. Repéré à <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/a-la-une/de-nouveaux-modeles-de-systeme-terre-pour-dessiner-les-futurs>.

- Network, G. F. (2024). Past Earth Overshoot Days. Repéré à <https://overshoot.footprintnetwork.org/newsroom/past-earth-overshoot-days/>.
- OCDE. L'indice Institutions sociales et égalité des genres (SIGI). Repéré le 2025-05-07 à <https://www.oecd.org/fr/about/programmes/social-institutions-and-gender-index-sigi.html>.
- OECD. (2015). Les indicateurs sur le genre. Repéré à <https://wikigender.oecdcode.org/fr/index.html%3Fp=4355.html>.
- OECD. (2018). *Effective Carbon Rates 2018 : Pricing Carbon Emissions Through Taxes and Emissions Trading*. OECD. doi : 10.1787/9789264305304-en.
- OECD. (2023). *SIGI 2023 Global Report : Gender Equality in Times of Crisis* (éd. 1st ed). Paris : Organization for Economic Cooperation & Development.
- OMS. (2024). Adolescent pregnancy. Repéré à <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/adolescent-pregnancy>.
- ONU. (2015). Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030. Repéré à <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
- ONU. [Publisher : United Nations]. (2020). Inégalités de genre et COVID-19 : les réponses des entités de l'ONU. Repéré à <https://www.un.org/fr/%C3%A9quipe-de-communication-de-la-riposte-de-1%E2%80%99onu-au-covid-19/in%C3%A9galit%C3%A9s-de-genre-et-covid-19-les>.
- ONU. (2021). Les femmes sont les premières victimes de la crise climatique, selon la COP26. Repéré à <https://news.un.org/fr/story/2021/11/1108212>.
- Organisation mondiale de la santé. (2022). *Classification internationale des maladies onzième révision* (Rapport n°11). Genève.
- Organization, W. H. & Fund, U. N. C. (2024). Delivery care. Repéré à <https://data.unicef.org/topic/maternal-health/delivery-care/>.
- Ostrom, E. (2015). *Governing the Commons : The Evolution of Institutions for Collective Action* (éd. 1). Cambridge University Press. doi : 10.1017/cbo9781316423936.
- Pigou, A. C. (1920). *The economics of welfare*. London : Macmillan and co., limited. Repéré à <http://archive.org/details/cu31924073868113>.

- Provitolo, D. (2006). La dynamique des systèmes selon J.W. Forrester. *Hypergeo*, <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article384>. 2006. Repéré à <https://shs.hal.science/halshs-00391565>.
- Raworth, K. (2022). *Doughnut economics : seven ways to think like a 21st-century economist*. UK USA Canada Ireland Australia India New Zealand South Africa : Penguin Books.
- Reid, A. (2024). How dangerous was childbirth in the past ? [The Cambridge Group for the History of Population and Social Structure]. Repéré à https://www.campop.geog.cam.ac.uk/blog/2024/09/19/childbirth-in-the-past/?utm_source=chatgpt.com.
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drücke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., Petri, S., Porkka, M., Rahmstorf, S., Schaphoff, S., Thonicke, K., Tobian, A., Virkki, V., Wang-Erlandsson, L., Weber, L. & Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. doi : 10.1126/sciadv.adh2458.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, , Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475. doi : 10.1038/461472a. Publisher : Nature Publishing Group.
- Ronsmans, C. & Graham, W. J. (2006). Maternal mortality : who, when, where, and why. *The Lancet*, 368(9542), 1189–1200. doi : 10.1016/S0140-6736(06)69380-X.
- Roser, M. & Ortiz-Ospina, E. (2016). Education Spending. *Our World in Data*. Repéré à <https://ourworldindata.org/financing-education>.
- Roser, M. & Ritchie, H. (2013). Maternal Mortality. *Our World in Data*. Repéré à <https://ourworldindata.org/maternal-mortality>.
- Sajedinejad, S., Majdzadeh, R., Vedadhir, A., Tabatabaei, M. G. & Mohammad, K. (2015). Maternal mortality : a cross-sectional study in global health. *Globalization and Health*, 11(1), 4. doi : 10.1186/s12992-015-0087-y.
- Singh, R. & Mukherjee, P. (2018). ‘Whatever she may study, she can’t escape from washing dishes’ : gender inequity in secondary education – evidence from a longitudinal study in India. *Compare : A Journal of Comparative and International Education*, 48(2), 262–280. doi : 10.1080/03057925.2017.1306434.

- Solow, R. M. (1973). Is the End of the World at Hand? *Challenge*, 16(1), 39–50. doi : 10.1080/05775132.1973.11469961.
- Souza, J. P., Day, L. T., Rezende-Gomes, A. C., Zhang, J., Mori, R., Baguiya, A., Jayaratne, K., Osoti, A., Vogel, J. P., Campbell, O., Mugerwa, K. Y., Lumbiganon, P., Tunçalp, , Cresswell, J., Say, L., Moran, A. C. & Oladapo, O. T. (2024). A global analysis of the determinants of maternal health and transitions in maternal mortality. *The Lancet Global Health*, 12(2), e306–e316. doi : 10.1016/S2214-109X(23)00468-0. Publisher : Elsevier.
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene : The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81–98. doi : 10.1177/2053019614564785. Publisher : SAGE Publications.
- Sully, E. A., Biddlecom, A., Darroch, J. E., Riley, T., Ashford, L. S., Lince-Deroche, N., Firestein, L. & Murro, R. (2020). *Adding It Up : Investing in Sexual and Reproductive Health 2019*. New York. Repéré à <https://www.guttmacher.org/report/adding-it-up-investing-in-sexual-reproductive-health-2019>.
- Tajvar, M., Hajizadeh, A. & Zalvand, R. (2022). A systematic review of individual and ecological determinants of maternal mortality in the world based on the income level of countries. *BMC Public Health*, 22(1), 2354. doi : 10.1186/s12889-022-14686-5.
- Taşseven, , Altaş, D. & Ün, T. (2016). The Determinants of Female Labor Force Participation for OECD Countries. Repéré à <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Determinants-of-Female-Labor-Force-for-OECD-Ta%C5%9Fseven-Alta%C5%9F/0c4ab3d3d6172fe89b26834b0e8dea479720d162>.
- Testard-Vaillant, P. (2016). Combien y a-t-il de sexes ? *CNRS Le journal*. Repéré à <https://lejournal.cnrs.fr/articles/combien-y-a-t-il-de-sexes>.
- Turner, G. (2008). A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality. *Global Environmental Change*, 18(3), 397–411. doi : 10.1016/j.gloenvcha.2008.05.001.
- UNDP. (2010). *Rapport sur le développement humain 2010 : La vraie richesse des nations : Les chemins du développement humain*. New York : United Nations Development Programme (UNDP). Repéré à <https://www.undp.org/fr/publications/rapport-sur-le-developpement-humain-2010>.
- UNDP. (2019). *Gender analysis and nationally determined contributions (NDCs)*. Repéré à <https://wrw.unwomen.org/practice/resources/gender-analysis-and-nationally-determined-contributions-ndcs>.

- UNDP. (2024a). *Gender Development Index*. Repéré à <https://hdr.undp.org/gender-development-index>.
- UNDP. (2024b). *Human Development Report 2023/2024 technical notes*. New York. Repéré à https://hdr.undp.org/sites/default/files/2023-24_HDR/hdr2023-24_technical_notes.pdf.
- UNDP (Éd.). (2025). *The 2025 Human Development Report : A matter of choice : People and possibilities in the age of AI*. New York : United Nations Development Programme (UNDP). Repéré à <https://report.hdr.undp.org/a-matter-of-choices>.
- UNDP. (2025a). *Gender Inequality Index*. Repéré à <https://hdr.undp.org/data-center/thematic-composite-indices/gender-inequality-index>.
- UNDP. (2025b). Quel est le rapport entre égalité des sexes et changement climatique ? Repéré à <https://climatepromise.undp.org/fr/news-and-stories/quel-est-le-rapport-entre-equalite-des-sexes-et-changement-climatique>.
- UNESCO. (2016). UNESCO and UN Women release guidance to end gender-based violence in education. Repéré à <https://www.unesco.org/en/articles/unesco-and-un-women-release-guidance-end-gender-based-violence-education>.
- UNESCO. (2019). *Global Education Monitoring Report – Gender Report : Building bridges for gender equality*. UNESCO. doi : 10.54676/QTBO2301.
- UNFPA. (2022). *Motherhood in Childhood : The Untold Story*. New York. Repéré à <https://repository.gheli.harvard.edu/repository/13978/>.
- USGCRP. (2018). *Fourth National Climate Assessment*. Repéré à <https://nca2018.globalchange.gov>.
- Veenema, R. J., Hoepner, L. A. & Geer, L. A. (2023). Climate Change-Related Environmental Exposures and Perinatal and Maternal Health Outcomes in the U.S. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 1662. doi : 10.3390/ijerph20031662.
- Vermeulen, P. J. & de Jongh, D. C. J. (1976). ‘Dynamics of Growth in a Finite World’ – Comprehensive Sensitivity Analysis. *IFAC Proceedings Volumes*, 9(3), 133–145. doi : 10.1016/S1474-6670(17)67333-6.
- Volterra, V. (1926). Fluctuations in the Abundance of a Species considered Mathematically. *Nature*, 118(2972), 558–560. doi : 10.1038/118558a0.

- Wackernagel, M., Onisto, L., Bello, P., Callejas Linares, A., Susana López Falfán, I., Méndez García, J., Isabel Suárez Guerrero, A. & Guadalupe Suárez Guerrero, M. (1999). National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 29(3), 375–390. doi : 10.1016/S0921-8009(98)90063-5.
- Ward, Z. J., Atun, R., King, G., Dmello, B. S. & Goldie, S. J. (2024). Global maternal mortality projections by urban/rural location and education level : a simulation-based analysis. *eClinicalMedicine*, 72, 102653. doi : 10.1016/j.eclim.2024.102653.
- WHO, UNICEF, UNFPA, Group, W. B. & Division, U. (Éds.). (2025). *Trends in maternal mortality estimates 2000 to 2023 : estimates by WHO, UNICEF, UNFPA, World Bank Group and UNDESA/Population Division*. Geneva : World Health Organization.
- Wodon, Q. (2014). Eliminating Child Marriage to Boost Girls' Education. Repéré à https://blogs.worldbank.org/en/education/eliminating-child-marriage-boost-girls-education?utm_source=chatgpt.com.
- Women, U. (2018). *Turning promises into action : Gender equality in the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Repéré à <https://www.unwomen.org/en/digital-library/publications/2018/2/gender-equality-in-the-2030-agenda-for-sustainable-development-2018>.
- Woog, V., Singh, S., Browne, A. & Philbin, J. (2015). Adolescent Women's Need for and Use of Sexual and Reproductive Health Services in Developing Countries. Repéré à <https://www.guttmacher.org/report/adolescent-womens-need-and-use-sexual-and-reproductive-health-services-developing-countries>.
- Østby, G., Urdal, H. & Rudolfsen, I. (2016). What Is Driving Gender Equality in Secondary Education ? Evidence from 57 Developing Countries, 1970–2010. *Education Research International*, 2016, 1–18. doi : 10.1155/2016/4587194.