

Intégration d'une dimension sociale dans *World3* : Vers une Modélisation Systémique des Inégalités Mondiales

par

Pablo KESSOUS

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.

MONTREAL, LE 22 JANVIER 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Pablo Kessous, 2026



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 R. 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 de Montréal

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 3 DÉCEMBRE 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à Daniel Rousse, pour sa confiance, sa bienveillance et la grande liberté qu'il m'a laissée tout au long de ce travail. Merci d'avoir toujours cru en mes idées, parfois douteuses, et d'avoir proposé un sujet aussi passionnant.

Je remercie également les autres membres du jury, Yves-Marie Abraham, Philippe Terrier et Mathias Glaus, pour le temps consacré à la relecture de ce mémoire et pour leur participation à la soutenance.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers Ugo Bardi et Safa Motesharrei, dont les travaux ont profondément inspiré cette recherche. Le temps qu'ils m'ont accordé et leurs conseils éclairés ont grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

Je remercie chaleureusement mes collègues du groupe de recherche et du *Laboratoire sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique*, et tout particulièrement Annabelle, pour sa disponibilité, sa présence constante et sa bienveillance tout au long de ce parcours.

Je souhaite aussi remercier ma famille, ma sœur et mes grands-parents pour leur soutien indéfectible, moral comme financier, sans lequel ce projet n'aurait pu aboutir.

Je n'oublie pas non plus tous les amis qui m'ont accompagné au fil de cette aventure d'un an et demi, qui ont écouté mes doutes et partagé leurs précieux conseils : Camille, Clémentine, Dimitri, Lucie, Marine, les Margaux, Paola, Pablo, Patrick et Quentin. Leur présence et leur soutien m'ont été essentiels.

Enfin, un immense merci à toute l'équipe du café *Chez José*, et en particulier à Sarah, pour leur confiance, leur écoute et leur flexibilité, qui m'ont permis de concilier travail et études dans les meilleures conditions.

Intégration d'une dimension sociale dans *World3* : Vers une Modélisation Systémique des Inégalités Mondiales

Pablo KESSOUS

RÉSUMÉ

Ce mémoire propose une adaptation sociale du modèle *World3*, initialement développé par le MIT pour le rapport *The Limits to Growth* (1972). Dans un contexte marqué par la montée des inégalités économiques et l'aggravation des crises environnementales, il interroge la manière dont la structure sociale influence la stabilité du système mondial face aux limites planétaires.

Le modèle conçu, nommé *World3 socio-adapté*, segmente la population mondiale en trois groupes de revenu et relie ces groupes à des niveaux différenciés de consommation industrielle. Cette approche permet d'examiner l'effet des inégalités sur la dynamique globale du système.

Les simulations montrent qu'un enrichissement global de la population accélère l'effondrement écologique, tandis qu'un appauvrissement généralisé accroît la résilience physique du système, mais au détriment des fonctions sociales essentielles. Ces résultats soulignent la nécessité d'un équilibre entre sobriété matérielle et planification collective : un monde plus pauvre matériellement, où les ressources sont allouées à des secteurs clés tels que l'agriculture, la santé, l'éducation et la recherche, peut garantir un niveau de vie décent tout en réduisant la pression sur la biosphère et garantir la stabilité du monde de demain.

Mots-clés: World3, Limites à la croissance, Dynamique des systèmes, Inégalités sociales, Sobriété, Décroissance

Integrating the Social Dimension into *World3* : Towards a Systemic Modeling of the Global Social Structure

Pablo KESSOUS

ABSTRACT

This thesis presents a social adaptation of the *World3* model, originally developed at MIT for the report *The Limits to Growth* (1972). In a context marked by rising economic inequality and worsening environmental crises, it explores how social structure influences the stability of the global system when confronted with planetary limits.

The model developed, referred to as *World3 socio-adapted*, divides the world population into three income groups and links each group to differentiated levels of industrial consumption. This approach makes it possible to examine how inequality affects the overall dynamics of the global system.

The simulations show that a global enrichment of the population accelerates ecological collapse, while widespread impoverishment increases the system's physical resilience but at the expense of essential social functions. These results highlight the need for a balance between material sobriety and collective planning : a materially poorer world, where resources are allocated to key sectors such as agriculture, health, education, and research, can ensure a decent standard of living, reduce pressure on the biosphere, and help secure the stability of tomorrow's world.

Keywords: World3, Limits to Growth, System Dynamics, Social Inequality, Sobriety, Degrowth

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 Dynamique des systèmes	7
1.1.1 Origines et évolution de la dynamique des systèmes	7
1.1.2 Principes et fonctionnement	8
1.1.3 Qu'est-ce qu'un modèle ?	9
1.1.4 Exemple : Le modèle proie-prédateur	10
1.1.5 Limites de la modélisation globale par la dynamique des systèmes	12
1.1.5.1 Modélisation et simplification	12
1.1.5.2 Limites épistémologiques : grande dépendances aux données disponibles	13
1.1.5.3 Sensibilité	13
1.1.5.4 Biais cognitif	14
1.1.6 Les logiciels de modélisation en dynamique des systèmes	16
1.2 Le Rapport Meadows et le modèle <i>World3</i>	16
1.2.1 Publications et histoire Rapport Meadows	16
1.2.1.1 Contexte	17
1.2.1.2 Structure de <i>World3</i>	18
1.2.1.3 Les scénarios de <i>World3</i>	19
1.2.1.4 Conclusion du rapport	21
1.2.1.5 Publication et mises à jours majeurs	22
1.2.2 Débats et controverses autour du rapport Meadows	23
1.2.2.1 Un terrain de critique	23
1.2.2.2 Critiques axiomatique	24
1.2.2.3 Critique de la sensibilité	27
1.2.3 Mises à jour empiriques et recalibration	27
1.2.4 Mises à jour thématiques du modèle <i>World3</i>	29
1.2.5 Évolution des modèles : Au-delà de <i>World3</i>	30
1.2.5.1 <i>World4</i> par Bystroff	30
1.2.5.2 <i>World4</i> à <i>World7</i> par Svedrup	32
1.2.5.3 <i>EarthforAll</i> par le Club de Rome	34
1.2.6 Quelques autres modèles notables	37
1.2.6.1 Human and Nature Dynamics (<i>HANDY</i>)	38
1.2.6.2 Daisyworld	39
1.2.6.3 L'économie du Donut	39
1.3 La décroissance : repenser le développement dans un monde fini	41
1.3.1 Les grandes limites de la croissance	41
1.3.2 Le mythe de la <i>croissance verte</i>	42
1.3.3 La décroissance comme projet de société	43

1.4	Mesurer et comprendre les inégalités mondiales	44
1.4.1	Les grandes sources de données	45
1.4.2	Les principaux indicateurs économiques, sociaux et environnementaux ...	45
1.4.3	État de la pauvreté extrême	47
1.4.4	Les formes et dynamiques des inégalités contemporaines	49
1.4.5	Limites de la mesure des inégalités mondiales	51
1.5	Discussion : Pourquoi envisager une mise à jour sociale de <i>World3</i> ?	51
1.5.1	Littérature actuelle et pertinence du modèle	51
1.5.2	L'intérêt d'un couplage social et systémique	52
CHAPITRE 2 DÉVELOPPEMENT MÉTHODOLOGIQUE D'UN MODÈLE SOCIO-DÉMOGRAPHIQUE SOUS <i>WORLD3</i>		
2.1	<i>World3</i> : Étude du modèle	55
2.1.1	Structure globale de <i>World3</i>	55
2.1.2	Secteurs et variables clefs	57
2.1.2.1	Population	58
2.1.2.2	Capital	58
2.1.2.3	Agriculture	60
2.1.2.4	Ressources Non Renouvelables	60
2.1.2.5	Pollution	61
2.2	Intégration du critère social dans le modèle <i>World3</i> : approches et faisabilité	61
2.2.1	Intégration de nouveaux indicateurs	61
2.2.2	Segmentation du modèle démographique	62
2.2.3	Développement d'un modèle socio-démographique distinct	62
2.2.4	Choix d'une approche de modélisation	63
2.2.5	Méthodologie de développement d'un modèle socio-économique distinct	63
2.2.5.1	Implémentation modulaire et «step-by-step-modeling»	63
2.2.5.2	Validation d'un nouveau modèle	64
2.2.5.3	Décomposition de l'objectif principal	65
2.3	Développement du modèle démographique social	65
2.3.1	Étude détaillée du secteur de la population	66
2.3.1.1	Fertilité	66
2.3.1.2	Espérance de vie	67
2.3.1.3	Fonctionnement du secteur démographique	68
2.3.2	Modèle Simplifiée : Population représentée par un stock unique	71
2.3.2.1	Modélisation de la fécondité	71
2.3.2.2	Modélisation de la mortalité	71
2.3.2.3	Modélisation de la force de travail	72
2.3.2.4	Résultats préliminaires	74
2.3.3	Modèle Simplifiée à population vieillissante	77
2.3.3.1	Correction de la mortalité	77
2.3.3.2	Résultats préliminaires	79

2.3.4	Modèle démographique séparé par classes	81
2.3.4.1	Structuration des groupes de revenu dans <i>World3</i> : apports et limites des données en Parités de Pouvoir d'Achat (PPA)	81
2.3.4.2	Choix des seuils de revenu pour la structuration socio-économique du modèle	82
2.3.4.3	Structure globale du nouveau modèle démographique du mode	84
2.3.4.4	Dynamiques démographiques historiques de 1900 à 2022	86
2.3.4.5	Dynamiques démographiques historiques de 2022 à 2150 : les scénarios envisagés	88
2.3.4.6	Résultats préliminaires	90
2.4	Intégration des effets dynamiques de la segmentation sociale	91
2.4.1	L'Industrial Output comme indicateur des dynamiques de richesse	91
2.4.1.1	Pertinence de l'IO pour l'analyse des inégalités	91
2.4.1.2	Fonctionnement et interactions du secteur industriel	92
2.4.2	Consommation différenciée et poids systémique des groupes de richesse ..	95
2.4.2.1	Un appui empirique via les émissions de carbone	96
2.4.2.2	La justification théorique : l'équation de Kaya	96
2.4.2.3	Une correspondance avec les seuils absolus de revenu	96
2.4.2.4	Un compromis méthodologique	97
2.4.2.5	Bilan : coefficients de consommation industrielle	97
2.4.3	Application au modèle	97
2.4.3.1	Préambule et méthodologie	97
2.4.3.2	Industrial Pressure Index (IPI) : définition et interprétation	98
2.4.3.3	Scénarios sociaux et normalisation de l'IPI	100
2.4.4	Création d'un flux d'investissement industriel	102
2.4.4.1	Définition du flux additionnel	102
2.4.4.2	Limites de la technique d'intégration	103
2.4.5	Structure globale du nouveau secteur industriel	105
2.5	Mise à jour de l'indice de bien être humain	106
2.5.1	Description de l'indice dans W3-3	106
2.5.2	Les limites de cet indicateur	107
2.5.3	Développement d'un nouvel indice de bien-être humain	107
2.6	Synthèse méthodologique	108
CHAPITRE 3 RÉSULTATS		111
3.1	Méthodologie de présentation des résultats	111
3.2	Analyse des résultats	112
3.2.1	Scénario 1 — « Business as Usual »	112
3.2.2	Scénario 2 — Ressources naturelles abondantes	113
3.2.3	Scénario 3 — Contrôle technologique de la pollution	117
3.2.4	Scénario 4 — Amélioration des rendements agricoles	119
3.2.5	Scénario 5 — Protection contre l'érosion	120

3.2.6	Scénario 6 — Technologie globale (CT)	122
3.2.7	Scénario 7 — Régulation démographique	125
3.2.8	Scénarios 8 à 11 — Équilibre industriel	126
3.3	Synthèse des résultats	127
3.3.1	Place et interprétation de la pollution dans le modèle	127
3.3.2	Enrichissement (SS_1) : puissance et fragilité	128
3.3.3	Appauvrissement (SS_2) : résilience environnementale, coût social	128
3.3.4	Développement de la classe moyenne (SS_3) : compromis mais limites ...	129
3.3.5	Enseignements généraux	130
CHAPITRE 4 DISCUSSION		133
4.1	Scénario de développement de la classe moyenne	133
4.2	Analyse du scénario d'enrichissement de la population	133
4.2.1	Lecture globale du scénario	133
4.2.2	Représentation structurelle de l'enrichissement dans le modèle	134
4.2.3	Place centrale de la pollution	134
4.2.4	Dynamiques excluant la pollution	135
4.2.5	Conditions de stabilité d'un système d'enrichissement	136
4.3	Analyse du scénario d'appauvrissement	136
4.3.1	Représentation structurelle de l'enrichissement dans le modèle	137
4.3.2	Lecture globale du scénario : points positifs	137
4.3.3	Lecture globale du scénario : points négatifs	138
4.4	Pauvreté subie et sobriété choisie	139
4.4.1	Vers un scénario de sobriété planifiée	139
4.4.2	Modèle exploratoire du scénario de sobriété planifiée (SS_4)	141
4.5	Principales limites du modèle	143
4.5.1	Problème de bilan de matière et d'énergie	143
4.5.2	Risque de double comptage	144
4.5.3	Hypothèse de coefficients de pression industrielle constants	145
4.5.4	Problème de modélisation dans le HWI	145
4.5.5	Absence de différenciation fonctionnelle entre classes sociales	146
4.6	Recommandations de recherche	146
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		149
ANNEXE I	SCHÉMA DYNAMO DE <i>WORLD3</i>	153
ANNEXE II	DIAGRAMMES LIÉS À LA DÉMOGRAPHIE DE <i>WORLD3</i>	155
ANNEXE III	COMPARAISON DES MÉTHODES D'AJOUT D'UNE DIMENSION SOCIALE AU MODÈLE <i>WORLD3</i>	157
ANNEXE IV	STRUCTURE DÉTAILLÉE DU SECTEUR DÉMOGRAPHIQUE SÉPARÉ PAR CLASSE SOUS VENSIM	159

ANNEXE V	STRUCTURE DÉTAILLÉE DU SECTEUR INDUSTRIEL DANS <i>WORLD3</i> SOUS VENSIM	161
ANNEXE VI	CALCUL DU COEFFICIENT DE CORRÉLATION DE PEARSON ENTRE PIB ET VALEUR MANUFACTURIÈRE	163
ANNEXE VII	APPROFONDISSEMENT SUR LA LOGIQUE DU FLUX D'INVESTISSEMENT INDUSTRIEL	165
ANNEXE VIII	SYNTHÈSE COMPARATIVE DES SCÉNARIOS TECHNIQUES ET SOCIAUX	173
BIBLIOGRAPHIE		175

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Résumé des scénarios simulés avec le modèle <i>World3-03</i> 21
Tableau 2.1	Définition et noms des variables et paramètres importants 57

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Diagramme stocks-flux : modèle proies/prédateurs 11
Figure 1.2	Résultats du modèle proies–prédateurs pour les paramètres : $a = 3 \times 10^{-2}$, $b = 2 \times 10^{-4}$, $c = 3 \times 10^{-5}$, $d = 2 \times 10^{-2}$ 12
Figure 1.3	Schéma du modèle <i>World4</i> 31
Figure 1.4	<i>World4</i> : Scénarios de population mondiale par Bystroff 32
Figure 1.5	Projections issues du modèle <i>World7</i> sur les ressources critiques Tirée de Sverdrup (2020, p. 20) 33
Figure 1.6	<i>Doughnut Economics</i> : représentation du modèle de Kate Raworth 40
Figure 1.7	Courbe de Lorenz et coefficient de Gini 46
Figure 1.8	Évolution de la répartition mondiale selon les seuils de pauvreté absolus 48
Figure 1.9	Répartition mondiale du revenu et du patrimoine 49
Figure 1.10	Émissions moyennes de CO ₂ e par habitant selon le niveau de revenu 50
Figure 2.1	Diagramme stocks-flux : modèle proies/prédateurs 56
Figure 2.2	Diagrammes de causalité des variables industrielles principales du modèle <i>World3</i> 59
Figure 2.3	Schéma des boucles de rétroaction démographiques 66
Figure 2.4	Représentation boîte noire du secteur démographique 68
Figure 2.5	Mortalité par groupe d'âge 69
Figure 2.6	Diagramme du secteur démographique de <i>World3</i> 70
Figure 2.7	Proportion de la population en âge de procréer (15–44 ans) pour les 10 scénarios de <i>World3</i> 72
Figure 2.8	Mortalité par âge en fonction de l'espérance de vie 73
Figure 2.9	Proportion de la population active pour les 12 scénarios de <i>World3</i> 73

Figure 2.10	Diagramme de stock de de flux du modèle simplifié de population à stock unique	74
Figure 2.11	Comparaison des variables clés décrivant l'état du monde dans le scénario 1 entre W3 et W3-SA-1	75
Figure 2.12	Scénario 9 – Comparaison des dynamiques démographiques entre W3 et W3-SA-1	76
Figure 2.13	Scénario 9 - Répartition de la population selon les tranches d'âge au cours du temps - W3	76
Figure 2.14	Comparaison entre l'âge moyen obtenu sur le modèle de référence (bleu) et le modèle simplifié (rouge)	78
Figure 2.15	Représentation du modèle W3-SA-2	79
Figure 2.16	Comparaison des principales variables d'état entre les modèles W3 et W3-SA-2 (scénarios 1, 3 et 9)	80
Figure 2.17	Structure simplifiée finale du modèle démographique de W3-SA-3	85
Figure 2.18	Évolution des proportions des groupes sociaux de population	86
Figure 2.19	Comparaison des proportions des groupes sociaux de population entre le modèle et les données historiques	87
Figure 2.20	Structure sociale des scénarios $SS_{1,2,3}$	89
Figure 2.21	Comparaison des trajectoires de la population mondiale selon les 10 scénarios entre les modèles W3 et W3-SA-3	90
Figure 2.22	Diagramme simplifié de stock et de flux du secteur industriel dans <i>World3</i>	95
Figure 2.23	Évolution de l'indice de pression industriel (IPI) en fonction des scénarios sociaux	100
Figure 2.24	Évolution de l'indice de pression industriel normalisé (IPI _n) en fonction des scénarios sociaux	101
Figure 2.25	Structure globale du secteur industriel enrichi	105
Figure 3.1	Évolution de l' <i>Industrial Output</i> selon les trois scénarios sociaux du scénario 1	113

Figure 3.2	Comparaison des trajectoires du scénario 2 selon les structures sociales	115
Figure 3.3	État du système dans le scénario social SS_2	116
Figure 3.4	Évolution du HWI dans le scénario 2	116
Figure 3.5	Comparaison entre l'évolution de la population et du rendement agricole pour le scénario 3, selon les structures sociales : SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)	117
Figure 3.6	Évolution du HWI dans le scénario 3	118
Figure 3.7	Comparaison des trajectoires du scénario 4 selon les structures sociales : SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)	120
Figure 3.8	Évolution de la production industrielle dans le scénario 5	122
Figure 3.9	Comparaison des trajectoires du scénario 6 selon les structures sociales : SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)	124
Figure 3.10	Comparaison des trajectoires de la population et de la pollution dans le scénario 7 pour les trois structures sociales : SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)	126
Figure 4.1	Évolution de la population et du HWI pour les scénarios techniques S_1 à S_8 sous la structure sociale SS_4	142
Figure 4.2	Évolution de la population et du HWI pour le scénario d'enrichissement (SS_1) couplé à un maintien artificiel des secteurs clés : santé, éducation et agriculture	142

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BAU	Business As Usual
BAU2	Business As Usual, version 2
BeROI	Benefit Energy Return on Investment
CT	Comprehensive Technology
DYNAMO	DYNAmic MOdels (langage de simulation utilisé dans le modèle <i>World3</i>)
E4A	Earth for All
EF	Ecological Footprint (Empreinte écologique)
EROI	Energy Return on Investment
GDP	Gross Domestic Product (Produit intérieur brut)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC)
HANDY	Human and Nature Dynamics model
HDI	Human Development Index (Indice de développement humain)
IDD	Income Distribution Database (OCDE)
IDH	Indice de développement humain
ILO	International Labour Organization (Organisation internationale du travail)
ILOEST	ILO Modelled Estimates
LTG	<i>Limits to Growth</i>
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MLD	Mean Log Deviation
MPI	Multidimensional Poverty Index
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ODD	Objectifs de développement durable (<i>Sustainable Development Goals</i>)
PIP	Poverty and Inequality Platform
PIB	Produit intérieur brut
PNUD	Programme des Nations Unies pour le développement

PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
PPA	Parité de pouvoir d'achat
PPP	Purchasing Power Parity (Parité de pouvoir d'achat)
SPRU	Science Policy Research Unit
SW	Sustainable World
UNU-WIDER	United Nations University World Institute for Development Economics Research
WIID	World Income Inequality Database
WID	World Inequality Database
WIL	World Inequality Lab
W3	<i>World3</i>
W3-SA	<i>World3</i> – Socio-Adapted model
W3-SA-X	<i>World3</i> – Socio-Adapted model, version X

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

a	Taux de croissance des proies sans prédation [(proies/an)/proie]
b	Taux de prédation [(proies/an)/(proies×prédateurs)]
c	Taux de reproduction des prédateurs [(prédateurs/an)/(prédateurs×proies)]
d	Taux de mortalité naturelle des prédateurs [(prédateurs/an)/prédateur]
x(t)	Population de proies [individus]
y(t)	Population de prédateurs [individus]
t	Temps de simulation [années]
POP	Population mondiale [personnes]
IO	Production industrielle totale (<i>Industrial Output</i>) [\$/an]
IOPC	Production industrielle par hab. (<i>Industrial Output per Capita</i>) [\$/an·habitant]
IC	Capital industriel (<i>Industrial Capital</i>) [\$]
NRR	Ressources non renouvelables (<i>Non-Renewable Resources</i>) [unités de ressource]
PPOL	Pollution persistante (<i>Persistent Pollution</i>) [unités de concentration]
HWI	Indice de bien-être humain (<i>Human Welfare Index</i>) [sans unité]
DLI	Indice de niveau de vie décent (<i>Decent Living Index</i>) [sans unité]
IPI	Indice de pression industrielle (<i>Industrial Pressure Index</i>) [sans unité]
α	Pondération sociale du bien-être [sans unité]
β	Pondération de contribution aux inégalités [sans unité]
γ	Coefficient de sensibilité des investissements industriels [sans unité]
$S_1 - S_{10}$	Scénarios techniques
$SS_1 - SS_4$	Structures sociales
$S_X SS_Y$	Scénario technique X de <i>World3</i> couplé au Scénario Social Y

INTRODUCTION

Les grandes stratégies de transition énergétique sont souvent présentées comme un défi essentiellement technique. Le rapport *Global Energy Transformation : A Roadmap to 2050* en offre une illustration parlante : il n'anticipe quasiment aucune baisse de la consommation mondiale d'énergie finale (-12 % entre 2016 et 2050, de 395 à 351 EJ), tout en prévoyant un doublement de la part de l'électricité (de 19 % à 49 %). Cette trajectoire mise avant tout sur l'électrification des usages, le déploiement massif des énergies renouvelables et les gains d'efficacité énergétique (IRENA, 2019).

Cependant, une telle approche technocentrée atteint rapidement ses limites. Selon le *BP Energy Outlook*, la demande mondiale de nickel pourrait augmenter de 313 % et celle de lithium de près de 2 000 % d'ici 2050 (BP p.l.c., 2023). Ces projections révèlent la fragilité d'un modèle fondé sur la croissance dans un monde fini. Elles soulèvent également des enjeux majeurs : pressions locales liées à l'extraction des métaux, ou encore effets rebond, où les gains d'efficacité se traduisent paradoxalement par une hausse des consommations globales.

C'est dans un contexte de prise de conscience croissante des limites écologiques de la croissance qu'au début des années 1970, une équipe de chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT), dirigée par Donella et Dennis Meadows, entreprend de modéliser les interactions entre population, économie et environnement. De cette démarche naît le rapport *The Limits to Growth* (Meadows, Meadows, Randers & Behrens, 1972), qui marquera durablement la pensée environnementale moderne.

S'appuyant sur un modèle dynamique articulant la population, la production industrielle et alimentaire, les ressources naturelles et la pollution, le rapport met en évidence qu'une croissance exponentielle dans un monde fini conduit inévitablement à des tensions systémiques, puis à un déclin simultané de la production, de la population et du bien-être global si aucune régulation

n'est introduite. Loin de chercher à prédire l'avenir, il illustre les conséquences physiques d'une trajectoire de croissance illimitée au sein d'un système clos.

Le rapport a rencontré un écho considérable, transformant durablement le débat public et scientifique à l'échelle mondiale. Son message central, la croissance matérielle illimitée est incompatible avec un monde fini, conserve aujourd'hui une portée remarquable. Les vérifications empiriques menées depuis ont confirmé la fiabilité des trajectoires établies dès les années 1970 (Turner, 2008, 2012, 2014; Herrington, 2021).

Plus d'un demi-siècle après sa parution, les constats actuels résonnent fortement avec les enseignements formulés par *The Limits to Growth*, qui alertait déjà sur la dégradation simultanée des équilibres climatiques, énergétiques, écologiques et sociaux :

- Le *Sixième rapport d'évaluation du GIEC* (GIEC, 2023) met en évidence l'accélération du réchauffement planétaire, déjà estimé à environ 1,1 °C au-dessus des niveaux préindustriels, ainsi que la vulnérabilité croissante des sociétés face à la multiplication des événements extrêmes.
- Le *Emissions Gap Report* (PNUE, 2024) avertit que, sans une baisse drastique des émissions de gaz à effet de serre (GES), le monde s'oriente vers un réchauffement compris entre 2,6 et 3,1 °C d'ici la fin du siècle, un scénario aux conséquences catastrophiques.
- Le *Global Biodiversity Outlook 5* (CDB, 2020) souligne une érosion rapide de la biodiversité et rappelle qu'aucun des vingt Objectifs d'Aichi (CDB, 2010) pour 2020 n'a été pleinement atteint.
- Le rapport *State of Food Security and Nutrition in the World* (FAO, FIDA, UNICEF, PAM & OMS, 2025) indique qu'environ 28 % de la population mondiale a connu une situation d'insécurité alimentaire modérée ou grave en 2024.

- Enfin, le *Global Land Outlook II* (CNULCD, 2022) estime que plus de 40 % des terres de la planète sont aujourd’hui dégradées, compromettant la productivité des écosystèmes et la résilience des sociétés humaines face aux crises à venir.

Pris ensemble, ces rapports dressent un tableau sans équivoque : les trajectoires mondiales actuelles dépassent déjà plusieurs limites biophysiques, confirmant la portée et l’actualité des dynamiques mises en évidence par *The Limits to Growth*.

Au-delà de ces constats environnementaux, la question de la soutenabilité ne peut être comprise sans sa dimension sociale. Comme le souligne Raworth (2017) avec son concept d’*économie du donut*, le développement humain doit s’inscrire dans un espace sûr et juste pour l’humanité, délimité par un plafond écologique, celui des limites planétaires, et un plancher social garantissant des conditions de vie décentes pour tous. Or, si les modèles globaux ont largement exploré le dépassement du plafond, ils se sont rarement penchés sur la fragilité du plancher. Les inégalités économiques et sociales influencent pourtant directement la consommation, l’accès aux ressources et la capacité à faire face aux crises, jouant ainsi un rôle central dans la dynamique du système mondial.

Les données issues du *World Inequality Database (WID)* en offrent une illustration saisissante : en 2023, le 10 % le plus riche de la population mondiale captait près de 52 % du revenu total, tandis que la moitié la plus pauvre n’en recevait que 8 % (World Inequality Lab, 2023). En matière d’empreinte carbone, la disparité est encore plus marquée : le 1 % le plus riche émet à lui seul davantage que les 66 % les plus pauvres réunis (Chancel, Bothe & Voituriez, 2023). Ces écarts ne constituent pas une anomalie passagère, mais bien une caractéristique structurelle du système économique mondial. Ils déterminent depuis des décennies qui consomme, qui produit et qui subit les effets du dépassement des limites planétaires. Comprendre la soutenabilité du

monde contemporain implique donc de prendre en compte ces déséquilibres internes autant que les contraintes physiques globales.

Dans cette perspective, il semble presque naturel qu'un modèle aussi emblématique que *World3*, conçu pour représenter les grands équilibres planétaires, puisse aujourd'hui intégrer cette dimension sociale. Non pas pour en modifier les fondements, mais pour prolonger son ambition initiale : comprendre les conditions de stabilité du système terrestre d'un point de vue social.

Cette réflexion conduit à la question centrale de ce mémoire : *dans quelle mesure la structure sociale conditionne-t-elle la stabilité du système mondial ?* Cette interrogation vise à évaluer l'influence des inégalités de consommation sur la dynamique globale du modèle *World3*, afin de mieux comprendre comment la configuration sociale d'un monde donné peut renforcer ou fragiliser sa soutenabilité.

Pour y répondre, cette recherche poursuit un objectif principal, qui est d'introduire une différenciation sociale au sein de *World3* afin d'étudier l'effet des inégalités de niveau de vie sur les dynamiques globales du système. Pour atteindre cet objectif, deux sous-objectifs techniques sont définis :

1. dépasser une approche superficielle consistant à ajouter des variables isolées sans rétroaction, en intégrant au contraire des comportements dynamiques cohérents avec la logique systémique du modèle ;
2. préserver la cohérence interne de *World3* en veillant à l'intégrité de sa structure, afin d'assurer la rigueur méthodologique et la continuité des dynamiques originales.

Pour atteindre ces objectifs, le mémoire s'articule en quatre parties complémentaires. La première propose une revue de littérature portant sur la dynamique des systèmes, le modèle *World3*, la décroissance, les inégalités mondiales et la pertinence d'une mise à jour sociale du modèle. La deuxième décrit la méthodologie retenue pour l'adaptation du modèle, en détaillant les choix

conceptuels et techniques associés à l'intégration de la dimension sociale. La troisième présente les résultats issus des simulations, tandis que la quatrième discute leurs implications pour la compréhension de la stabilité mondiale. Le tout se termine par une brève conclusion et des recommandations.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce mémoire s'ouvre par une revue de littérature visant à poser les fondements théoriques, méthodologiques et empiriques nécessaires à l'étude. Le premier chapitre présente successivement les principes de la dynamique des systèmes, le cadre conceptuel et historique du rapport Meadows et du modèle *World3*, ainsi que les principaux débats et évolutions associés. Il aborde ensuite les approches contemporaines des limites de la croissance, de la décroissance et de la mesure des inégalités mondiales, afin de situer la problématique à l'interface des dynamiques globales et des enjeux sociaux. Ce cadrage permet de justifier la pertinence d'une mise à jour sociale de *World3*, qui constitue le point de départ du développement méthodologique présenté au chapitre suivant.

1.1 Dynamique des systèmes

Avant d'aborder le modèle *World3*, il est utile de présenter les notions essentielles permettant de comprendre la dynamique des systèmes dans ses grandes lignes. Cette section vise à offrir au lecteur les clés nécessaires pour appréhender les fondements de cette approche : ce qu'est un modèle dans le cadre spécifique de cette étude, la manière dont il représente les interactions complexes, ainsi que les raisons pour lesquelles cette méthode constitue un outil central d'analyse des systèmes mondiaux. Quelques exemples, limites méthodologiques et logiciels associés sont également évoqués afin de situer concrètement cette démarche.

1.1.1 Origines et évolution de la dynamique des systèmes

La dynamique des systèmes a été développée dans les années 1950 par Jay Wright Forrester. Ingénieur de formation, Forrester fit ses premières recherches sur les servo-systèmes, en se concentrant sur des applications militaires comme l'optimisation des radars et de l'artillerie automatique durant la Seconde Guerre mondiale. Ces travaux le conduisirent à explorer les interactions complexes des systèmes technologiques, posant ainsi les bases de la dynamique des systèmes (Bardi, 2011b).

En 1956, Forrester rejoignit la Sloan School of Management du MIT et élargit ses travaux aux systèmes sociaux et économiques. Il mit au point une méthode reposant sur des concepts fondamentaux tels que les boucles de rétroaction et les délais, afin de simuler les comportements systémiques dans le temps. Son ouvrage *Industrial Dynamics* (Forrester, 1961) fut une contribution majeure dans ce domaine, appliquant ces principes aux organisations industrielles.

Forrester poursuivit ensuite ses recherches sur des enjeux plus globaux. Dans *Urban Dynamics* (Forrester, 1969), il analysa les systèmes urbains, démontrant que des politiques publiques mal conçues pouvaient engendrer des effets négatifs inattendus en raison de la complexité des interactions systémiques. En 1971, avec *World Dynamics* Forrester (1971b), il étendit l'application de sa méthode aux problématiques mondiales, abordant des questions telles que la croissance démographique et l'épuisement des ressources. Cette approche attira l'attention du Club de Rome, avec qui il collabora pour produire le rapport *The Limits to Growth* (Meadows *et al.*, 1972). L'histoire de cette collaboration est détaillée plus tard.

1.1.2 Principes et fonctionnement

La dynamique des systèmes est une méthode de modélisation qui cherche à mieux comprendre le comportement des systèmes complexes. Un système se définit comme un ensemble d'éléments en interaction formant une structure cohérente. Un système complexe, quant à lui, se caractérise par la présence de boucles de rétroaction, de délais et de non-linéarités, qui rendent son évolution souvent imprévisible et sensible aux conditions initiales. La dynamique des systèmes repose sur l'identification de ces éléments et de leurs relations, afin de construire une représentation cohérente du fonctionnement global. Ce cadre permet de visualiser et de simuler les dynamiques d'ensemble, et ainsi d'anticiper les conséquences des décisions ou politiques mises en œuvre.

Les concepts fondamentaux de la dynamique des systèmes incluent les stocks, les flux et les délais (Forrester, 1971b). Les stocks représentent des accumulations (comme une population ou des ressources naturelles), tandis que les flux décrivent les transferts entre ces stocks, tels que les naissances ou l'exploitation des ressources. Les délais traduisent les temps de réaction

dans ces processus, reflétant des ajustements progressifs ou des inerties caractéristiques des systèmes complexes. Il est facile d'en saisir l'idée à travers des exemples simples. Dans le cas d'une baignoire, l'eau qu'elle contient représente le stock, le robinet constitue le flux positif qui alimente le réservoir tandis que l'évacuation correspond au flux négatif qui le vide. De même, un délai peut être observé avant qu'un robinet d'eau chaude n'atteigne la température souhaitée, ou avant qu'une politique publique ne produise ses effets dans un système social.

Les boucles de rétroaction sont centrales dans cette approche. Elles peuvent être positives, amplifiant les phénomènes, ou négatives, jouant un rôle régulateur. Un exemple marquant de boucle positive est celui du dégel du pergélisol. Lorsque la température mondiale augmente, les sols gelés des régions arctiques libèrent du méthane et du dioxyde de carbone piégés depuis des millénaires. Ces gaz renforcent l'effet de serre et accentuent le réchauffement, ce qui accélère encore la fonte du pergélisol. Ce processus autoentretenu illustre clairement une boucle de rétroaction positive, où le phénomène initial s'amplifie de lui-même.

1.1.3 Qu'est-ce qu'un modèle ?

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système réel, conçue pour en comprendre les mécanismes essentiels sans en reproduire toute la complexité (Forrester, 1971b). Présent dans toutes les disciplines : physique, économie, biologie, sciences sociales, et bien d'autres encore, il constitue un outil d'analyse, de prévision ou d'aide à la décision.

Sa valeur tient à la simplification : seules les variables et relations pertinentes sont retenues pour saisir les dynamiques principales du système. Comme le souligne Forrester, l'intérêt d'un modèle ne réside pas dans son exactitude, mais dans sa capacité à révéler les mécanismes fondamentaux d'un ensemble complexe.

En dynamique des systèmes, le modèle sert avant tout à explorer des tendances de long terme, à comprendre les effets de rétroaction et à tester des politiques hypothétiques. Dans le cas des modélisations mondiales, il remplit une fonction exploratoire : comparer des scénarios pour

mieux appréhender les conséquences de nos choix collectifs (Meadows, Meadows & Randers, 2004).

1.1.4 Exemple : Le modèle proie-prédateur

Le modèle proies-prédateurs, attribué aux travaux indépendants de Lotka et Volterra (Lotka, 1925) (Volterra, 1926), est un exemple simple mais puissant pour illustrer les dynamiques de stock, de flux et de boucles de rétroaction dans un système complexe. Comme le souligne Bardi, « un modèle complexe n'est pas forcément compliqué » (Bardi, 2011b). Ce modèle décrit les interactions entre deux populations coexistant dans un écosystème : des proies (par exemple, les lapins) et des prédateurs (comme les loups). La dynamique des populations est régie par deux équations différentielles non linéaires du premier ordre, exprimées comme suit :

$$\begin{cases} x'(t) = ax(t) - bx(t)y(t) \\ y'(t) = cy(t)x(t) - dy(t) \end{cases} \quad (1.1)$$

où :

$x(t)$: population de proies [*lapins*],

$y(t)$: population des prédateurs [*loups*],

a : taux de croissance des proies sans prédation [$(\text{lapins}/\text{an})/\text{lapins}$],

b : taux de prédation, fréquence de chasse des loups [$(\text{lapins}/\text{an})/(\text{lapins} \times \text{loups})$],

c : taux de reproduction des loups lié aux proies [$(\text{loups}/\text{an})/(\text{loups} \times \text{lapins})$],

d : taux de mortalité des loups sans proies [$(\text{loups}/\text{an})/\text{loups}$].

Ces équations illustrent les effets de rétroaction au sein du système. La population de lapins croît selon une boucle positive $ay(t)$: plus elle est nombreuse, plus la reproduction s'accélère,

menant à une croissance potentiellement exponentielle. Cependant, cette expansion est freinée par une boucle négative $-bx(t)y(t)$, la prédation, qui relie la diminution des lapins à la présence des loups et qui stabilise ainsi leur croissance.

De même, la dynamique des loups résulte de deux rétroactions opposées : une boucle positive $cx(t)y(t)$, où l'abondance de proies favorise leur reproduction, et une boucle négative $-dy(t)$, correspondant à leur mortalité naturelle.

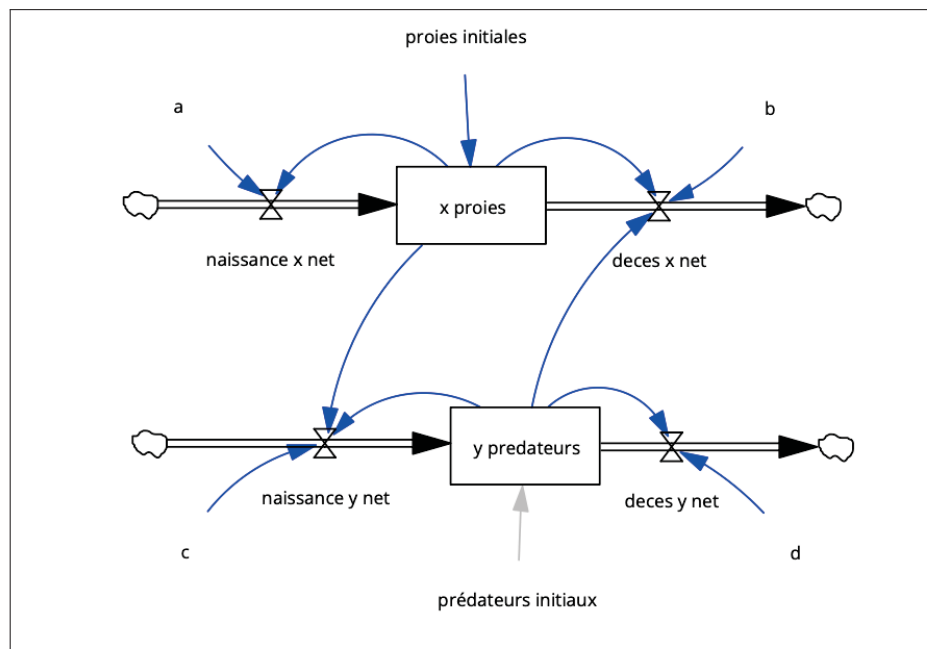


Figure 1.1 Diagramme de stocks et de flux modèle proies/prédateurs avec $a = 3 \times 10^{-2}$, $b = 2 \times 10^{-4}$, $c = 3 \times 10^{-5}$, $d = 2 \times 10^{-2}$

Ces équations différentielles peuvent être représentées sous forme de diagramme de stocks et de flux, où les populations de proies et de prédateurs constituent les deux stocks principaux. Les flux traduisent les naissances et les décès de chaque population, ainsi que les interactions entre elles. La figure 1.1 illustre cette structure simplifiée du modèle proies-prédateurs obtenue via le logiciel Vensim.

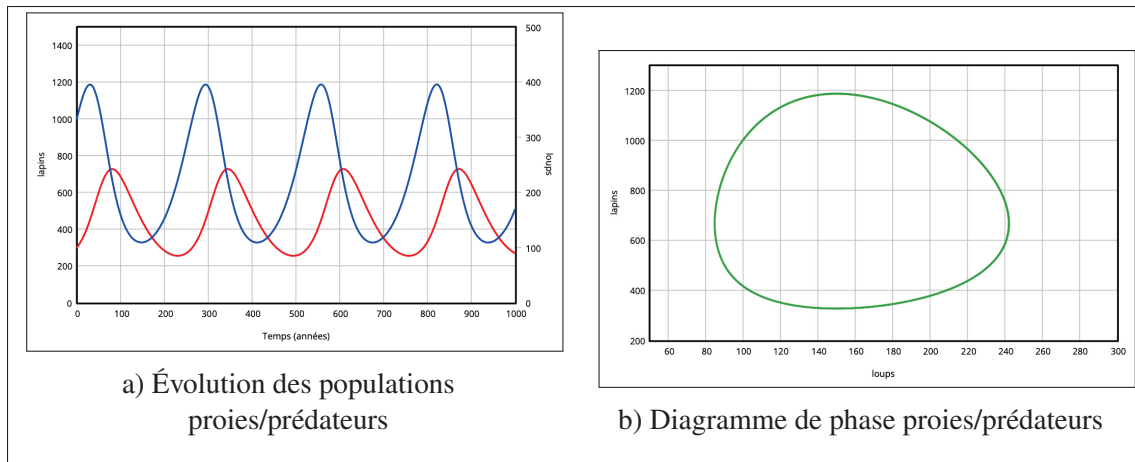


Figure 1.2 Résultats du modèle proies–prédateurs pour les paramètres :
 $a = 3 \times 10^{-2}$, $b = 2 \times 10^{-4}$, $c = 3 \times 10^{-5}$, $d = 2 \times 10^{-2}$

Ce modèle permet d’obtenir les résultats illustrés aux figures 1.2a et 1.2b. On y observe des oscillations régulières entre les populations de proies (lapins, en bleu) et de prédateurs (loups, en rouge) : la croissance des lapins favorise celle des loups, qui finit par réduire la population de proies, entraînant ensuite une baisse des prédateurs. Le portrait de phase traduit ces oscillations par une boucle fermée, caractéristique d’un cycle stable où les deux populations évoluent en interaction constante sans jamais atteindre un équilibre fixe.

1.1.5 Limites de la modélisation globale par la dynamique des systèmes

Avant d’aborder ces limites en détail, il convient de souligner que toute modélisation systémique repose sur des choix de représentation et de niveau d’abstraction. Ces choix conditionnent à la fois la portée explicative du modèle et ses limites intrinsèques. La section suivante examine ce compromis à travers la question de la simplification.

1.1.5.1 Modélisation et simplification

Comme vu précédemment, les modèles simplifient par construction des réalités complexes, ce qui limite leur capacité à représenter l’ensemble des interactions présentes dans les systèmes

réels. L'exemple d'un corps en chute libre illustre bien ce principe. Il peut être modélisé, dans un premier temps, comme une masse soumise uniquement à la gravité. Ce modèle peut ensuite être complexifié par l'intégration des frottements de l'air, de la forme de l'objet, des vents, des variations de pression, de la rotation de l'objet sur lui-même, des forces électromagnétiques éventuelles ou encore des effets de Coriolis liés à la rotation terrestre.

La clé de la modélisation réside donc dans le compromis : il s'agit de trouver un équilibre entre la complexité du modèle et la pertinence des résultats, pour approcher la réalité tout en maintenant un système exploitable et interprétable.

1.1.5.2 Limites épistémologiques : grande dépendances aux données disponibles

Les modèles systémiques, bien qu'ambitieux dans leur tentative de décrire des phénomènes complexes, restent intrinsèquement liés à la qualité, à la quantité et à la pertinence des données disponibles.

Les données, en elles-mêmes, posent des défis multiples. Leur collecte est souvent conditionnée par des biais méthodologiques, des limites technologiques ou des contraintes géopolitiques, ce qui peut entraîner des lacunes importantes. Par exemple, dans les analyses démographiques ou économiques globales, certaines régions du monde restent sous-représentées en raison de l'absence de statistiques fiables ou de la difficulté à les collecter.

1.1.5.3 Sensibilité

La sensibilité des modèles aux hypothèses initiales constitue une limite majeure. Comme l'a souligné Bardi (2011b), les projections issues de ces modèles dépendent fortement des paramètres de départ, ce qui peut fragiliser leur robustesse. De Jongh (1978), en étudiant le modèle *World3*, a montré qu'un ajustement de seulement 10 % sur trois paramètres économiques suffisait à repousser un scénario d'effondrement de la population, initialement prévu avant 2100, bien au-delà de cette date. Ce constat illustre à quel point les résultats du modèle sont

profondément influencés par des choix initiaux qui, bien que paraissant mineurs, peuvent transformer radicalement les projections.

1.1.5.4 Biais cognitif

Les modèles mathématiques et systémiques sont souvent perçus comme des outils objectifs et neutres pour comprendre le monde. Pourtant, cette vision idéalisée ne tient pas compte de la subjectivité inhérente au processus de modélisation. Comme le soulignent les auteurs de la troisième édition de *Limits to Growth* : « The word reality can never mean anything more than the mental model of the user of that word. » (Meadows *et al.*, 2004). Ainsi un modèle est plus une projection du modèle mentale de l'auteur plus que une modélisation précise du monde tel qu'il est. Cette section vise à détailler cette subjectivité et illustrer à travers l'exemple du modèle DICE de Norhaus (1992).

1.1.5.4.1 Les hypothèses implicites

Comme l'a souligné John Sterman dans *All Models Are Wrong*, « la plupart des hypothèses critiques dans tout modèle, qu'il soit mental ou formel, sont celles qui sont implicites, enfouies si profondément que les modélisateurs eux-mêmes n'en sont pas conscients » (Sterman, 2002a). Ces hypothèses implicites reflètent souvent les préjugés culturels, les perspectives personnelles ou les limites de connaissances des modélisateurs. Ces hypothèses biaisées peuvent alors influencer à la fois les résultats du modèle et les recommandations qui en découlent.

1.1.5.4.2 La sélection orientée des données

Un biais courant en modélisation est la tendance des modélisateurs à choisir des données qui confirment leurs idées préconçues. Comme l'a expliqué Sterman (2002a), cette tendance est particulièrement préoccupante car elle peut donner l'illusion que les résultats du modèle sont robustes et bien fondés, alors qu'ils reflètent simplement les croyances préalables des parties prenantes. Ainsi, un modèle élaboré pour justifier une politique particulière peut,

intentionnellement ou non, n'intégrer que les données qui soutiennent cette politique, ignorant les éléments contraires.

1.1.5.4.3 Les limites d'interprétation des systèmes complexes

La complexité inhérente des systèmes modélisés pose un autre défi majeur. Les modèles en dynamique des systèmes, en particulier, impliquent souvent des interactions non linéaires et des boucles de rétroaction difficiles à appréhender dans leur totalité. En conséquence, les modélisateurs peuvent négliger des comportements émergents ou établir des corrélations incorrectes entre des variables. Ces erreurs d'interprétation peuvent fausser les conclusions tirées des modèles et conduire à des recommandations politiques ou économiques inadaptées.

1.1.5.4.4 Exemple concret : le modèle DICE de William Nordhaus

Le modèle DICE, développé par Nordhaus (1992) en réponse au modèle *World3* des Meadows, illustre bien l'influence des biais cognitifs et idéologiques dans la modélisation. Ce modèle présente une vision optimiste de l'avenir en supposant que les améliorations technologiques et la réduction de l'intensité carbone se produiront de manière autonome et rapide, limitant ainsi les impacts économiques des politiques climatiques. Pourtant, comme l'a noté Sterman (2002a), ces hypothèses sont discutables, voire contre-intuitives. Deux points en particulier méritent d'être soulignés :

- **Exclusion des variables non énergétiques** : Le modèle DICE ignore complètement les ressources non énergétiques, présumant que leurs interactions avec le changement climatique sont insignifiantes.
- **Optimisation parfaite des décisions humaines** : Le modèle repose sur l'hypothèse que les consommateurs et les producteurs prennent des décisions optimales à l'échelle mondiale et sur plusieurs périodes.

En somme, la subjectivité inhérente à la modélisation, qu'elle provienne des hypothèses implicites, de la sélection orientée des données ou des limites d'interprétation, démontre que les modèles

ne sont pas des représentations parfaites de la réalité, mais plutôt des reflets des perspectives et des choix de leurs concepteurs.

1.1.6 Les logiciels de modélisation en dynamique des systèmes

La mise en œuvre d'un modèle en dynamique des systèmes nécessite des outils spécialisés. Ces logiciels permettent de représenter graphiquement les stocks, flux et boucles de rétroaction, puis d'en simuler le comportement sur le long terme. Ils offrent ainsi un support essentiel à la fois pour la construction du modèle, la communication des résultats et l'exploration de scénarios.

Parmi les plus utilisés, il est possible de citer InsightMaker, Vensim, Stella/iThink, Powersim Studio ou encore AnyLogic. Chacun propose une interface adaptée à la modélisation visuelle, à l'analyse de scénarios, et sont utilisés aussi bien pour la vulgarisation et la formation, que pour des travaux de recherche appliquée.

Dans le cadre de ce mémoire, l'ensemble des simulations a été réalisé avec Vensim PLE Plus (version 10.3.2, Ventana Systems Inc.), un logiciel de référence en modélisation systémique. Il constitue l'environnement principal de construction et d'expérimentation des modèles présentés ici.

1.2 Le Rapport Meadows et le modèle *World3*

La dynamique des systèmes a été présentée dans ses grandes lignes. Maintenant que cet outil est mieux compris, il est possible de se concentrer sur le modèle *World3* : son histoire, les critiques qu'il a suscitées, les mises à jour successives dont il a fait l'objet, ainsi que les modèles qui en ont découlé.

1.2.1 Publications et histoire Rapport Meadows

Afin de situer l'émergence du rapport Meadows et du modèle *World3*, il est nécessaire de replacer leur développement dans le contexte historique, économique et intellectuel de l'époque. Ce

cadre permet de comprendre les motivations initiales du projet ainsi que les hypothèses qui ont guidé sa conception.

1.2.1.1 Contexte

La période d'après-Seconde Guerre mondiale fut caractérisée par une prospérité économique et technologique exceptionnelle (Bardi, 2011b), particulièrement dans les pays occidentaux. Cette période de croissance rapide semblait sans fin, alimentée par des avancées majeures dans des domaines tels que la physique nucléaire et l'aérospatiale. En 1951, le premier réacteur nucléaire fut mis en service, suivi en 1957 par le lancement du satellite Spoutnik, premier témoignage de la domination technologique de l'homme. En 1969, la célèbre mission Apollo 11 permit à Neil Armstrong de poser le premier pas de l'homme sur la Lune, renforçant ainsi l'image d'un avenir radieux et sans limites pour l'humanité. Pourtant, comme le souligne Bardi dans son ouvrage retraçant l'histoire de *LTG* (Bardi, 2011b), derrière cette dynamique de progrès, les inégalités entre les pays développés et les nations pauvres se creusaient de plus en plus. Cela suscita des interrogations sur la viabilité d'une croissance illimitée dans un monde aux ressources finies.

C'est dans ce contexte que des intellectuels et des responsables politiques commencèrent à envisager la question des limites de la croissance économique. En 1968, Aurelio Peccei, industriel italien, fonda le Club de Rome, un groupe qui réunit des scientifiques, des économistes et des dirigeants d'entreprise afin d'analyser les grands enjeux économiques, sociaux et environnementaux du monde. Initialement, l'objectif principal du Club était d'améliorer les conditions de vie humaines, en particulier par la réduction des inégalités dans la distribution des richesses. Toutefois, il devint rapidement évident que pour répondre à ces préoccupations sociales, il fallait comprendre les limites naturelles auxquelles était confrontée la planète (Bardi, 2011b).

En 1968, lors d'une conférence au lac de Côme sur les problèmes urbains, Aurelio Peccei fit la rencontre de Jay Forrester, spécialiste de la dynamique des systèmes au Massachusetts Institute of Technology (MIT). Séduit par ses travaux sur les interactions entre systèmes économiques

et écologiques, Peccei l’invita à une réunion du Club de Rome à Berne en 1970. Forrester y proposa d’utiliser la dynamique des systèmes pour analyser la soutenabilité de la croissance mondiale (Bardi, 2011b). Cette collaboration marqua le point de départ de l’étude emblématique *The Limits to Growth* (Meadows *et al.*, 1972).

L’étude fut menée par un groupe de chercheurs du MIT, dirigé par Forrester, mais également composé de Donella Meadows, Dennis Meadows et Jørgen Randers. Grâce à l’approche systémique développée par Forrester, ils réussirent à créer un modèle informatique capable de simuler différentes trajectoires possibles pour l’avenir de la planète en fonction de scénarios économiques et écologiques. L’étude *LTG* fut la première à mettre en évidence, de manière rigoureuse et quantifiée, que la croissance économique et démographique dans un monde aux ressources limitées ne pouvait pas être infinie. Cela a été rendu possible grâce au modèle mathématique élaboré : *World3* (Meadows *et al.*, 1974).

1.2.1.2 Structure de *World3*

Le modèle *World3* s’appuie sur un ensemble de 149 équations différentielles et algébriques non linéaires (Meadows *et al.*, 1974). Le langage de programmation initialement utilisé est DYNAMO (DYNAmic MOdels), conçu pour simuler les systèmes dynamiques et mis au point par Forrester.

World3 modélise particulièrement les interactions dynamiques entre cinq grandes composantes du système mondial : la population, les ressources naturelles, le capital industriel, la production alimentaire et la pollution. Le modèle repose sur une formulation mathématique qui exprime les dynamiques globales par l’équation générale suivante (de Jongh, 1978) :

$$dx = f(x, p, t(x, p)) \quad (1.2)$$

Le vecteur x regroupe les 29 variables d'état du modèle, telles que la population, le capital industriel, les ressources naturelles, la pollution et la production alimentaire. Ces variables évoluent dans le temps selon les équations du système.

Le vecteur p contient 38 paramètres constants, comme l'espérance de vie normale, la durée de vie du capital ou le taux de fertilité de base. Ces valeurs fixes définissent la structure du modèle et permettent de créer différents scénarios en les ajustant.

Enfin, le vecteur $t(x, p)$ réunit 37 fonctions tables non linéaires, qui décrivent des relations complexes, par exemple l'effet de la pollution sur la productivité agricole.

Ces trois composantes interagissent pour créer le modèle *World3* de manière détaillée.

1.2.1.3 Les scénarios de *World3*

Les simulations du modèle *World3* s'étendent de 1900 à 2100, avec des pas de temps de six mois. À chaque étape, le modèle réévalue l'ensemble des variables afin de représenter l'évolution des dynamiques globales selon les conditions initiales et les interactions entre secteurs. Pour explorer la diversité des trajectoires possibles, le modèle repose sur une série de scénarios, chacun correspondant à un ensemble cohérent d'hypothèses politiques, économiques, technologiques et démographiques. Ces scénarios ne constituent pas des prédictions, mais illustrent les conséquences systémiques de différents choix collectifs, appliqués à divers moments clés de l'histoire mondiale.

La version de 2004, *Limits to Growth : The 30-Year Update*, basée sur le modèle *World3-03*, propose dix scénarios principaux (Meadows *et al.*, 1972; Meadows, Meadows & Randers, 1992; Meadows *et al.*, 2004).

Parmi ces trajectoires, quatre scénarios de référence se distinguent par leur portée analytique et leur valeur comparative :

- **BAU (Business As Usual)** : scénario de référence de 1972, sans intervention corrective ;

- **BAU2 (Business As Usual 2)** : doublement des ressources naturelles initiales ;
- **CT (Comprehensive Technology)** : recours massif aux technologies pour atténuer les pressions environnementales ;
- **SW (Stabilized World)** : stabilisation démographique et industrielle couplée à des technologies durables.

Les scénarios 1 à 10 décrivent une montée en complexité : chacun introduit de nouvelles mesures de régulation : contrôle de la pollution, amélioration des rendements agricoles, stabilisation démographique, définition d'un niveau de vie suffisant, puis intégration de technologies soutenables et politiques précoces de durabilité. Ces simulations montrent comment la combinaison et le moment d'application de ces mesures influencent la stabilité à long terme du système mondial.

Le tableau 1.1 présente une synthèse des principales hypothèses et des résultats associés à ces dix scénarios issus du modèle *World3-03*.

Tableau 1.1 Résumé des scénarios simulés avec le modèle *World3-03*

Scénario	Nom	Hypothèses principales	Résultat de la simulation	Acronyme
1	Scénario de base	Aucune politique corrective ; croissance tendancielle	Effondrement global dû à l'épuisement des ressources et à la pollution	BAU
2	Ressources doublées	Doublement des ressources naturelles disponibles	Effondrement retardé, mais aggravé par une forte pollution	BAU2
3	2 + technologies anti-pollution	Introduction de technologies de contrôle de la pollution	Effondrement par manque de nourriture et surpopulation	–
4	3 + rendements agricoles	Amélioration de la productivité agricole	Effondrement légèrement repoussé, équilibre temporaire	–
5	4 + protection des sols	Mesures contre l'érosion et la dégradation des terres	Légère amélioration, mais effondrement toujours inévitable	–
6	5 + efficacité des ressources	Technologies améliorant l'efficacité des ressources et la dépollution	Stabilisation temporaire, suivie d'un déclin structurel lié aux coûts technologiques	CT
7	Population stable (1995)	Stabilisation démographique mondiale dès 1995	Croissance industrielle continue provoquant un effondrement dû à la pollution	–
8	7 + définition d'un niveau de vie « suffisant »	Limitation volontaire de la production et extension de la durée de vie du capital	Niveau de vie adéquat jusqu'en 2040, puis déclin à cause de la pollution et de la baisse agricole	–
9	8 + 6	Introduction des technologies du scénario 6 dans un contexte de croissance modérée	Système stable et soutenable ; équilibre global sans effondrement	SW
10	9 appliqué dès 1982	Mise en œuvre vingt ans plus tôt des politiques de durabilité	Résultat optimal : pollution moindre, stabilité plus rapide et durable	–

1.2.1.4 Conclusion du rapport

Encore une fois, les auteurs soulignent que leur démarche n'est pas prédictive, mais exploratoire. Le modèle illustre des trajectoires possibles du système mondial, sans prétendre fournir de prévisions exactes. Comme ils le rappellent :

« Given the many approximations and limitations of the world model, there is no point in dwelling glumly on the series of catastrophes it tends to generate. We shall emphasize just one more time that none of these computer outputs is a prediction. » (Meadows *et al.*, 1974, p.41)

Selon leurs analyses, si les tendances de croissance démographique, industrielle, de pollution, de production alimentaire et d'épuisement des ressources se poursuivent, la planète atteindra ses limites dans les 100 prochaines années. Cela provoquerait un déclin rapide et incontrôlable de la population et des capacités industrielles.

Cependant, le rapport affirme qu'il est possible d'inverser ces trajectoires en établissant un état de stabilité écologique et économique durable. Cet équilibre permettrait de répondre aux besoins fondamentaux de chaque individu. Les auteurs insistent sur l'urgence d'agir, soulignant que les institutions sociales et politiques évoluent souvent trop lentement, réagissant aux crises plutôt qu'anticipant les changements nécessaires. Ce décalage, s'il persiste, accroît l'instabilité du système mondial et renforce le risque de dépassement des limites écologiques.

Un tel état d'équilibre, tel que décrit dans *LTG*, reposerait sur la stabilisation simultanée des stocks de population et de capital. Cela impliquerait une égalité entre les taux de naissance et de mortalité, ainsi qu'entre les taux d'investissement et de dépréciation.

Enfin, les auteurs mettent en garde : la société doit choisir entre deux voies. La première consiste à accepter des restrictions volontaires à la croissance, impliquant des changements profonds et parfois inconfortables dans les structures sociales et économiques. La seconde, en revanche, consiste à poursuivre la croissance jusqu'à atteindre les limites naturelles, en misant sur des solutions technologiques incertaines. Cette dernière approche mène inévitablement à des crises et à un effondrement, rendant d'autant plus urgent le choix d'une transition vers un équilibre durable.

1.2.1.5 Publication et mises à jours majeurs

Depuis la publication de *LTG* en 1972, plusieurs ouvrages ont approfondi et enrichi les analyses en explorant les implications du modèle, détaillant ses équations, proposant des mises à jour, évaluant la pertinence des scénarios et en intégrant de nouvelles variables pour mieux refléter les dynamiques mondiales. Les principales révisions par l'équipe Meadows ont été réalisées en 1992 et en 2004 (Meadows *et al.*, 1992, 2004).

Lors des mises à jour de 1992 du modèle présenté dans *Beyond the Limits*, plusieurs ajustements techniques et paramétriques ont été intégrés pour mieux correspondre aux données disponibles après vingt ans. Ces révisions visaient à affiner la précision des projections en recalibrant plusieurs secteurs clés. Trois secteurs ont été particulièrement touchés, l'agriculture, la population et les ressources. Au niveau de l'agriculture, les impacts de l'érosion des sols et des intrants agricoles, sous-estimés en 1972, ont été corrigés. Pour la population, les taux de natalité et de mortalité ont été ajustés pour refléter les observations réelles. Enfin au niveau des ressources, les estimations initiales des besoins en capital pour extraire les ressources ont été révisées à la baisse, tout comme les valeurs liées à l'utilisation des ressources par unité de production industrielle.

En 2004, *Limits to Growth : The 30-Year Update* a actualisé le modèle à partir de trois décennies de données et proposé dix scénarios révisés. Deux variables majeures ont été ajoutées : l'empreinte écologique (EF) et l'indice de bien-être humain (HWI). Les hypothèses technologiques ont été ajustées dans les domaines des ressources, de l'agriculture et de la pollution, ainsi que celles liées à la taille des familles. Le scénario de référence (BAU) a été complété par une version enrichie (BAU2) supposant une plus grande disponibilité des ressources. Cette mise à jour a donné naissance à *World3-03*, version sur laquelle repose la présente étude. Par souci de clarté, toute mention du modèle *World3* fera ici référence à cette version actualisée.

1.2.2 Débats et controverses autour du rapport Meadows

Les réactions suscitées par le rapport Meadows ne se sont pas limitées à des débats méthodologiques, mais ont également pris une dimension politique, économique et idéologique. Cette diversité d'oppositions fait du rapport un objet particulièrement controversé, au carrefour de plusieurs champs de critique. La section suivante propose d'en examiner les principales sources.

1.2.2.1 Un terrain de critique

Commandité par un comité de scientifiques renommés, issus de prestigieuses institutions universitaires, et reposant sur des techniques de modélisation innovantes, *LTG* a rapidement

acquis une grande crédibilité, tant au sein de la communauté scientifique qu’auprès du grand public. Traduit en plus de 30 langues et vendu à plus de 30 millions d’exemplaires, son succès mondial a bien entendu suscité de vives critiques. Depuis, de nombreux écrits ont retracé le débat autour de *LTG* (Nørgaard, Ragnarsdóttir & Peet, 2010; Bardi, 2011b; Jackson & Webster, 2016). En 1997, l’économiste italien Giorgio Nebbia identifia quatre principales sources d’opposition au rapport : les industriels, qui y voyaient une menace pour la croissance de leurs activités ; les économistes traditionnels, pour qui ce modèle remettait en cause leur autorité dans les conseils économiques ; l’Église catholique, déstabilisée par l’idée que la surpopulation était une cause majeure des problèmes mondiaux ; et la gauche politique occidentale, qui percevait le rapport comme une tentative des élites pour discréditer l’idéal d’un paradis prolétarien. À ces critiques se sont ajoutées celles des défenseurs de la croissance infinie et des politiciens recherchant des solutions simplistes (Nebbia, 1997). Le débat autour du rapport est donc complexe et foisonnant. Il devient difficile de distinguer les critiques fondées scientifiquement des attaques idéologiques ou des incompréhensions liées au modèle. L’objectif ici sera de retracer les principaux courants sensés ayant argumenté contre *The Limits to Growth*.

1.2.2.2 Critiques axiomatique

La première réaction des économistes à la publication de *LTG* a été formulée par Passell, Roberts et Ross (Passell & Ross, 1972) dans *The New York Times*. Ils émettent une critique de l’approche méthodologique du rapport, estimant que les prévisions étaient trop pessimistes quant à l’ingéniosité humaine et aux capacités d’adaptation technologique. Bien qu’ils n’aient pas fourni de chiffres précis, les scénarios proposés par le modèle sont jugés exagérés, notamment sur les limites des ressources naturelles et sous-estimant la capacité d’innovation de l’humanité.

Cependant, comme l’explique Bardi (Bardi, 2011b), cette critique repose en grande partie sur une mauvaise compréhension du rapport. En fait, les auteurs de *LTG* ne cherchaient pas à prédire avec exactitude l’avenir comme expliqué précédemment, mais à illustrer des scénarios possibles, en prenant en compte diverses hypothèses.

Selon Bardi, les deux premières critiques sérieuses de *LTG* proviennent du groupe de Sussex, également connu sous le nom de "Science Policy Research Unit" (SPRU) de l'Université de Sussex en Angleterre (Cole & Freeman, 1973), et de William Nordhaus, professeur à l'Université de Yale (Nordhaus, 1973).

Le groupe de Sussex, composé de physiciens, économistes et mathématiciens, a produit quatorze travaux, dont neuf essais techniques. Plusieurs critiques majeures en sont ressorties, notamment l'argument selon lequel les hypothèses du modèle étaient trop pessimistes. Selon eux, il y avait des fautes fondamentales dans le modèle, mais ils n'ont pas proposé d'alternative viable. Leur critique se concentrait principalement sur l'approche de modélisation et les conclusions tirées concernant les ressources mondiales et la croissance économique.

En 1973, William Nordhaus, dans sa critique intitulée *World Dynamics : Measurements Without Data*, propose une analyse structurée et approfondie du modèle global présenté dans *LTG*. Il remet en question la méthodologie de la dynamique des systèmes, notamment sa capacité à produire des résultats fiables sans s'appuyer sur des données solides. Nordhaus critique particulièrement le calibrage du modèle, en soulignant que de nombreuses estimations reposaient sur des données insuffisantes ou inexistantes. Pourtant, il est intéressant de noter que le modèle, appliqué sur la période 1900–1972, reproduisait avec une bonne précision les tendances historiques, montrant que, malgré ses simplifications, il saisissait déjà certaines dynamiques fondamentales du système mondial. Ces critiques refont surface en 1992 lors de la publication de *Beyond the Limits* (Meadows *et al.*, 1992), où Nordhaus publie une nouvelle réponse intitulée *Lethal Models*. Il y reprend ses doutes méthodologiques sur le calibrage du modèle tout en les actualisant au contexte de cette mise à jour (Nordhaus, 1973).

Dans ce contexte de critiques, Solow met en avant la capacité des mécanismes économiques à surmonter les limites grâce au progrès technologique, à la substituabilité entre capital et ressources, et au rôle régulateur des prix. Selon lui, la hausse des prix en cas de rareté incite à une utilisation plus efficace et à l'innovation, garantissant ainsi une croissance durable malgré les contraintes physiques (Solow, 1973). Carl Kaysen, dans *The Computer That Printed out*

WOLF, rejoint cette critique en dénonçant la complexité opaque du modèle *World3*, qu'il accuse de refléter un biais alarmiste et de négliger les forces adaptatives du marché et de l'ingéniosité humaine (Kaysen, 1972).

Le débat scientifique autour de *LTG*, particulièrement intense au début des années 1970, s'est rapidement essouffé. Dès 1978, Francis Sandback soulignait dans son article *The Rise and Fall of the Limits to Growth Debate* le déclin de cette controverse (Sandbach, 1978).

En 1989, Ronald Bailey, journaliste scientifique, relance les critiques contre *LTG* dans un article pour *Forbes* (Bailey, 1989). Il accuse le rapport d'avoir émis des prédictions alarmistes, comme l'épuisement de l'or, du mercure ou du pétrole avant les années 1990. Cependant, ces accusations reposent sur une mauvaise interprétation du rapport. Bailey présente un tableau comme une série de prévisions, alors qu'il s'agissait d'une illustration hypothétique des effets d'une croissance exponentielle continue. C'est un scénario que les auteurs eux-mêmes considéraient comme improbable. Ces critiques, qualifiées par Bardi de simplistes et sorties de leur contexte (Bardi, 2011b), ont contribué à déformer les intentions initiales de *LTG*. Ce dernier cherchait avant tout à stimuler une réflexion systémique sur les limites planétaires plutôt qu'à produire des prédictions précises. Faute d'une réponse complète des auteurs à ces malentendus, ces interprétations erronées ont durablement influencé la perception publique et académique du rapport.

En 2000, Matthew Simmons contribue à raviver le débat et à restaurer la crédibilité de *LTG* (Simmons, 2000). Dans son article *Revisiting The Limits to Growth : Could the Club of Rome Have Been Correct, After All?*, il montre que plusieurs tendances décrites par le modèle, notamment l'épuisement des ressources, s'alignent avec les observations contemporaines. Il appelle à reconsidérer la pertinence du rapport à la lumière des données récentes, tout en soulignant son rôle essentiel pour anticiper les défis planétaires et encourager une réflexion à long terme.

1.2.2.3 Critique de la sensibilité

Les débats sur la sensibilité du modèle *World3* ont évolué depuis les premières critiques des années 1970. Scolnik (1978) et De Jongh (1978) ont mis en lumière les limites des analyses paramétriques du modèle, en soulignant la fragilité des projections face à de légères variations des paramètres ou des structures internes des équations. Ils montrent que ces ajustements peuvent considérablement modifier les scénarios projetés, révélant la dépendance du modèle à ses hypothèses de base.

Plus récemment, Castro (2012) et Turner (2013) ont poursuivi le débat avec des perspectives divergentes. Castro critique les limites des analyses de sensibilité originales et insiste sur l'incertitude des projections, tandis que Turner défend la pertinence du modèle comme outil exploratoire, tout en reconnaissant ses sensibilités. Il plaide pour une approche centrée sur les risques et les tendances historiques plutôt que sur une précision absolue.

Enfin, Jochaud du Plessix (2019) enrichit le débat en intégrant des techniques modernes d'analyse de sensibilité, comme les méthodes de Morris et Sobol. Elle réalise une analyse quantitative approfondie qui identifie les paramètres les plus influents. Elle rappelle que les incertitudes sur les valeurs des paramètres sont au cœur des débats sur la validité du modèle et que les variations arbitraires utilisées auparavant ne correspondaient pas à des situations plausibles dans le monde réel. Grâce à l'approche de Morris, elle met en évidence les leviers structurants : ceux qui régissent directement le capital industriel, ceux qui influencent les flux de naissances et de décès, ainsi que ceux qui affectent la production agricole. Ses résultats confirment que ce sont bien la dynamique du capital industriel et de la population qui gouvernent l'évolution du modèle, tout en apportant un cadre méthodologique plus rigoureux pour évaluer la robustesse de ses hypothèses.

1.2.3 Mises à jour empiriques et recalibration

Depuis la publication de *LTG* en 1972, les mises à jour du modèle *World3* ont alimenté le débat scientifique sur les limites planétaires, en validant et en enrichissant les scénarios originaux à

travers l'intégration de données empiriques et de nouvelles perspectives. Si les travaux de Turner (2008; 2012; 2014), sont parmi les contributions les plus influentes, d'autres chercheurs ont également apporté des éclairages majeurs sur la dynamique des systèmes globaux tel que Hall et Day (2009), ou encore récemment Herrington (2021) ou Nebel (2024).

Turner, dans ses études de 2008, 2012 et 2014, a démontré la solidité du scénario *Business-As-Usual* face aux tendances mondiales observées. En s'appuyant sur des données couvrant jusqu'à 40 ans après la publication initiale, il a montré que l'effondrement projeté par *LTG* restait cohérent. Il a également souligné les limites des avancées technologiques pour compenser les pressions croissantes sur les ressources naturelles (Turner, 2008, 2012, 2014).

Herrington, en 2021, a poursuivi cet effort en actualisant les scénarios avec des données empiriques jusqu'en 2019. Son analyse repose sur le modèle *World3-03* et intègre ainsi les dimensions sociales et environnementales telles que l'empreinte écologique et l'indice de bien-être humain. Son travail a révélé que les scénarios BAU2 (tenant compte de politiques de recyclage et de gestion améliorée des ressources) et Comprehensive Technology correspondaient mieux aux dynamiques contemporaines (Herrington, 2021).

Hall et Day enrichissent *LTG* en intégrant les contraintes énergétiques, notamment le «peak oil» et la baisse de l'*Energy Return On Investment* (EROI), montrant que ces dynamiques renforcent les trajectoires d'effondrement. Leur analyse datant de 2009 lie la dépendance aux énergies fossiles aux limites biophysiques, soulignant l'urgence de prendre en compte l'énergie dans les politiques et projections globales (Hall & Day, 2009).

En 2024, Nebel et ses collègues ont proposé une recalibration du modèle *World3* à l'aide d'un algorithme d'optimisation. Cette méthode leur a permis d'ajuster 35 paramètres clés, tels que la durée de vie du capital industriel et les délais de transmission de la pollution, pour mieux correspondre aux données contemporaines. Leurs résultats confirment la pertinence des dynamiques d'overshoot et d'effondrement, tout en montrant des décalages temporels : le pic de pollution est repoussé de 50 ans, bien que l'épuisement des ressources reste la principale cause de l'effondrement (Nebel *et al.*, 2024).

1.2.4 Mises à jour thématiques du modèle *World3*

Au-delà des réévaluations empiriques menées par Turner, Herrington ou Nebel, plusieurs travaux récents ont proposé des mises à jour thématiques du modèle *World3*, cherchant à adapter sa structure aux enjeux contemporains.

Vola (2024) a développé une extension centrée sur la ressource en eau, intégrant un sous-système d'*empreinte hydrique mondiale* distinguant les usages agricoles, industriels et domestiques. Les simulations montrent que la poursuite des tendances de croissance conduit à une surexploitation de l'eau et à un effondrement des écosystèmes associés, tandis que des politiques ciblées permettraient de rester sous les limites planétaires (Vola, 2024).

Raizin (2025) a quant à elle introduit les inégalités de genre dans *W3* à partir des composantes de l'Indice d'inégalité de genre (IIG). Le scénario alternatif *IIG+*, fondé sur des politiques d'émancipation féminine, conduit à une réduction significative des inégalités et à une meilleure stabilisation démographique, illustrant le rôle des leviers sociaux dans la soutenabilité globale (Raizin, 2025).

Enfin, Guliyeva et al. (2025) ont utilisé le modèle *World3-03* pour évaluer l'impact de la croissance du numérique et de l'intelligence artificielle sur les limites planétaires. L'intégration de variables liées aux centres de données et à la consommation énergétique met en évidence que l'expansion rapide du numérique accroît la pression sur les ressources et la pollution, confirmant la pertinence de *World3* pour analyser ces dynamiques contemporaines (Guliyeva, Bhardwaj & Becker, 2025).

Ces mises à jour thématiques soulignent la vitalité du cadre de *World3*. Chaque extension prolonge sa logique de rétroaction en y intégrant des dimensions sociales ou matérielles essentielles à la compréhension des trajectoires globales.

1.2.5 Évolution des modèles : Au-delà de *World3*

Depuis sa création dans les années 1970, le modèle *World3* a suscité un fort intérêt scientifique et médiatique. Malgré son ancienneté, il reste d’une actualité frappante, comme le démontrent les études récentes de Turner et Herrington. Ce modèle, qui a marqué une époque, continue de poser des questions essentielles sur les limites de la croissance et la durabilité des trajectoires globales.

Cependant, *World3* reflète naturellement les connaissances et priorités de son temps. Il n’intègre pas certaines dynamiques actuelles majeures, telles que la quantification du réchauffement climatique, les évolutions détaillées des ressources non renouvelables, ou encore une modélisation fine des mécanismes économiques et sociaux (Sverdrup, Lorenz & Ólafsdóttir, 2020). Ces lacunes appellent à une actualisation qui permettrait de mieux répondre aux enjeux contemporains, notamment en s’appuyant sur des modèles plus récents pour intégrer ces nouvelles interactions et quantifier les changements.

Les travaux présentés ici s’inscrivent dans cette démarche d’actualisation. Ils explorent les moyens de prolonger l’héritage de *World3* en intégrant des approches modernes et en affinant la représentation des dynamiques globales.

1.2.5.1 *World4* par Bystroff

Dans le cadre de l’évolution des modèles globaux, le travail de Bystroff se distingue par une approche radicalement différente de celle de *World3*. Il propose un modèle simple et didactique, cherchant à décrire les dynamiques essentielles du système Terre avec un minimum de complexité (Bystroff, 2021). Sur le plan technique, *World4* relie la population mondiale à une capacité de charge déterminée conjointement par l’écosphère et l’antroposphère, modulée par la fragilité écologique et l’obsolescence technologique. Comme l’illustre la figure 1.3, il met en évidence que le progrès technologique accroît la capacité de charge tout en accélérant la dégradation des écosystèmes.

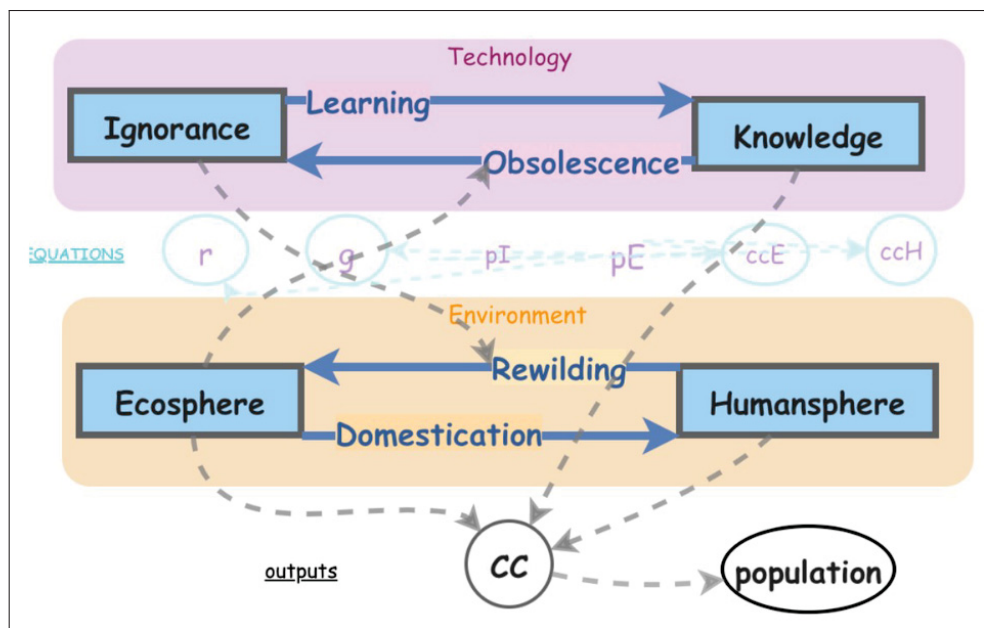


Figure 1.3 Modèle conceptuel *World4* : interactions entre technologie, environnement et population
Tirée de Bystroff (2023, p. 4)

Les résultats du modèle de Bystroff révèlent une dynamique démographique cohérente avec les tendances observées. Comme le montre la figure 1.4, les simulations prévoient une population mondiale atteignant un pic autour de 2020, suivi d'un déclin rapide lié à la dégradation des écosystèmes et à la baisse de la biocapacité. Après une phase de croissance hyperexponentielle soutenue par les progrès technologiques jusqu'aux années 1970, la population mondiale entre dans une phase de ralentissement, puis de contraction entre 2018 et 2023. Cette décroissance est attribuée à l'épuisement des terres fertiles, aux tensions pour l'accès aux ressources et à l'obsolescence technologique dans un environnement fragilisé.

Malgré des différences fondamentales dans leur construction, le modèle de Bystroff présente des similitudes notables avec *World3* en termes de résultats. Les deux modèles mettent en évidence des trajectoires de croissance, de pic, et de déclin de la population, ainsi que les conséquences de la pression environnementale et des limites planétaires sur les systèmes humains.

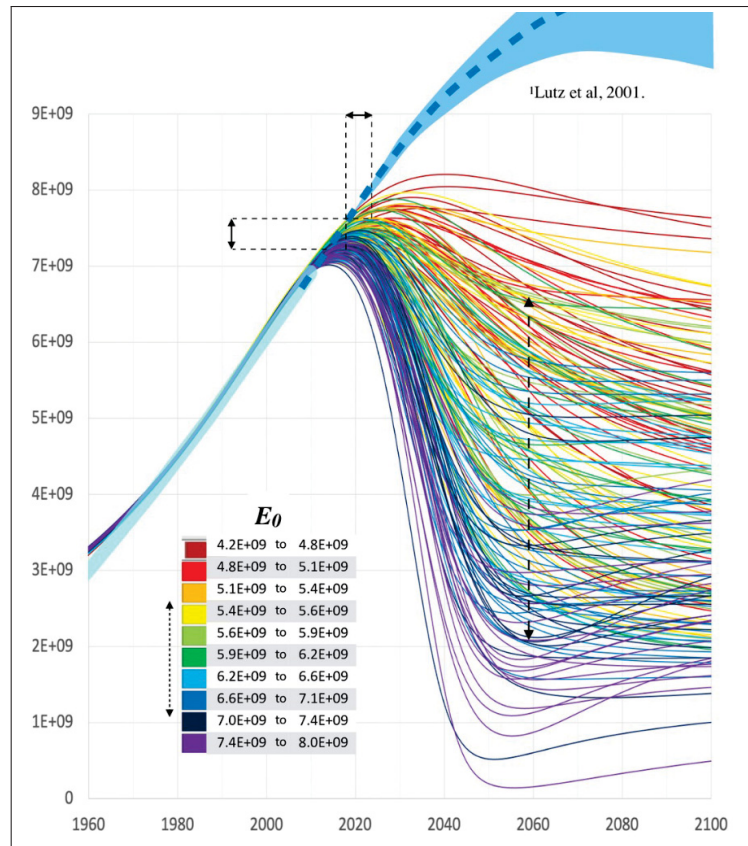


Figure 1.4 Projections de la population mondiale selon le modèle *World4* en fonction de la capacité de charge et des limites écologiques
Tirée de Bystroff (2023, p. 4)

1.2.5.2 *World4* à *World7* par Sverdrup

Entre 2011 et 2019, Sverdrup et son équipe ont développé une série de modèles globaux, de *World4* à *World7*, afin de dépasser les limites de *World3* et de mieux représenter les enjeux contemporains (Sverdrup *et al.*, 2019a; Sverdrup, Olafsdottir, Ragnarsdottir, Koca & Lorenz, 2019b; Sverdrup *et al.*, 2020). *World4* a posé les nouvelles bases du modèle en actualisant les données et en affinant les interactions entre ressources naturelles et systèmes économiques. Les versions suivantes ont progressivement enrichi cette structure. *World5* a introduit des mécanismes de prix fondés sur l'offre et la demande, permettant de reproduire des cycles économiques complets. Entre 2013 et 2016, *World6* a marqué une étape clé en intégrant des marchés internes

pour les ressources et des modules socio-économiques relatifs à la gouvernance, la démographie et les dynamiques sociales.

Finalisé en 2019, *World7* constitue l'aboutissement de cette série. Il combine les dimensions sociales, économiques et environnementales dans un cadre unifié. Le modèle distingue les réserves exploitables, détaille les types de pollution (CO₂, métaux lourds, perturbateurs endocriniens) et intègre des variables sociales comme la répartition des revenus, l'égalité salariale et la qualité de la gouvernance.

Les simulations de *World7*, couvrant la période 1850–2020, reproduisent fidèlement les tendances historiques majeures et permettent d'explorer différents scénarios prospectifs, notamment liés à la transition énergétique. Les résultats mettent en évidence la nécessité de transformations systémiques : réduction de la dépendance aux énergies fossiles, amélioration de l'efficacité énergétique, développement du recyclage et renforcement de la gouvernance pour réduire les inégalités et les tensions sociales.

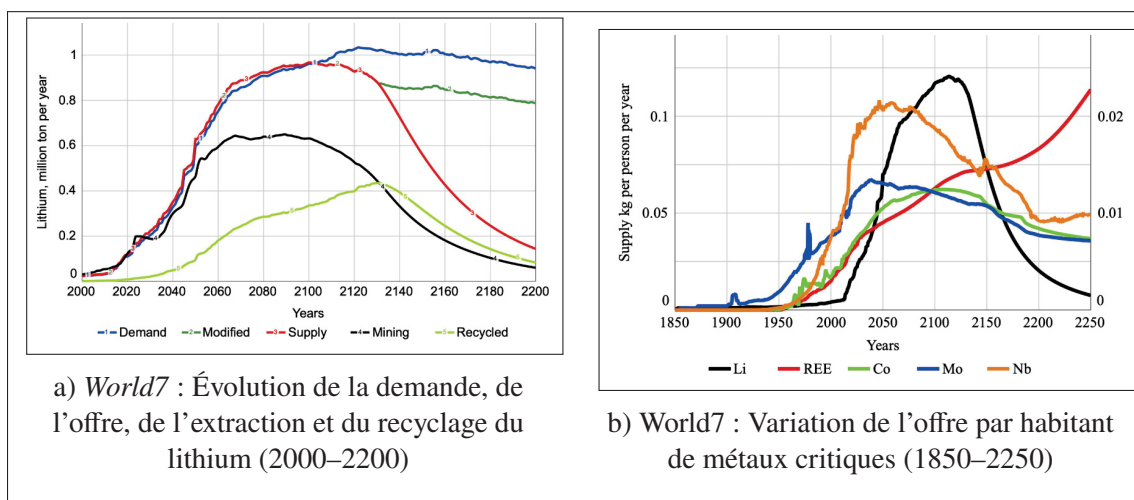


Figure 1.5 Projections issues du modèle *World7* sur les ressources critiques
Tirée de Sverdrup (2020, p. 20)

Comme le montrent les figures 1.5a et 1.5b, les simulations de *World7* décrivent l'évolution à long terme des ressources minérales critiques. On y observe d'abord une forte croissance

de la demande et de l'extraction, suivie d'un déclin marqué dû à l'épuisement des gisements, tandis que le recyclage prend progressivement le relais. L'offre par habitant de métaux tels que le lithium, le cobalt ou les terres rares atteint un pic avant de diminuer fortement, traduisant la finitude des ressources et les tensions à venir sur l'approvisionnement. Ces résultats soulignent que, comparé à *World3*, *World7* modélise les ressources naturelles de manière beaucoup plus fine, en distinguant les métaux, leurs flux et leurs processus de recyclage. Cependant, malgré ses avancées méthodologiques, le modèle *World7* soulève plusieurs interrogations quant à sa diffusion et à sa reconnaissance scientifique. Les informations disponibles ne permettent pas de retracer clairement sa mise en œuvre, ni de confirmer son adoption par d'autres équipes de recherche. Cette absence de documentation limite la possibilité d'une évaluation critique et indépendante.

La faible citation des travaux associés, ainsi que leur visibilité réduite dans la littérature scientifique, suggèrent une diffusion encore restreinte ou une communication limitée autour du modèle. Ces éléments compliquent l'appréciation de son impact réel et de sa place dans le champ de la modélisation systémique. Une documentation plus complète et une meilleure accessibilité du modèle apparaissent nécessaires pour en évaluer pleinement la portée scientifique.

1.2.5.3 EarthforAll par le Club de Rome

Ce sous-chapitre présente l'initiative *Earth4All* et les principaux résultats obtenus. Il s'agit de montrer comment ce projet s'inscrit dans la continuité des réflexions du rapport *LTG* et de situer son approche systémique et globale.

1.2.5.3.1 L'initiatives et les résultats obtenus

L'initiative *Earth4All* (E4A), lancée en 2020 par le Club de Rome, la BI Norwegian Business School, le Stockholm Resilience Centre et l'Institut de recherche de Potsdam, s'inscrit dans la continuité des réflexions amorcées par le rapport *LTG*. Ce projet vise à repenser le capitalisme et à proposer des solutions globales pour un avenir durable, en utilisant une approche intégrée

combinant une commission sur l'économie transformationnelle et des modèles dynamiques analysant plus de 700 interactions globales et régionales (Dixson-Declève *et al.*, 2022). Des scientifiques tel que Randers ou Herrington ont adhéré au projet, renforçant la crédibilité de ce dernier.

Le modèle, développé en dynamique des systèmes, explore deux trajectoires principales. Le premier scénario, « Too Little, Too Late », illustre les conséquences d'une continuité des politiques actuelles, avec une croissance économique qui exacerbe les inégalités et la dégradation environnementale, entraînant une hausse des tensions sociales et une augmentation des températures de plus de 2,5 °C. En contraste, le scénario « Giant Leap » propose une transformation rapide et systémique, avec une coopération mondiale accrue, visant à réduire les inégalités, atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, et améliorer le bien-être global grâce à des investissements massifs dans les infrastructures durables.

Pour réaliser le scénario optimiste « Giant Leap », *Earth4All* identifie cinq transformations clés :

1. **éradication de la pauvreté**, via des investissements dans les pays à faible revenu pour accélérer leur développement ;
2. **réduction des inégalités**, grâce à des réformes fiscales progressives et des mécanismes de redistribution ;
3. **émancipation des genres**, pour garantir l'égalité des droits et des opportunités pour les femmes ;
4. **transformation des systèmes alimentaires**, en favorisant une agriculture régénérative et en réduisant le gaspillage alimentaire ;
5. **transition énergétique rapide**, visant à réduire de moitié les émissions de gaz à effet de serre tous les dix ans pour atteindre la neutralité carbone.

1.2.5.3.2 Critiques et débat autour du projet

Le modèle E4A a fait l'objet de vives critiques, notamment de la part de Ragnarsdottir, Sverdrup et de leur équipe, également à l'origine du modèle *World7* présenté précédemment. Ces auteurs

remettent en cause la validité scientifique d'*E4A*, en pointant plusieurs faiblesses d'ordre technique et méthodologique (Ragnarsdóttir, 2024).

L'un des principaux reproches concerne l'usage excessif de « fonctions forcées », qui rendent les résultats du modèle largement prédéterminés. Ce choix limite sa capacité à faire émerger des dynamiques réellement endogènes et réduit ainsi la portée exploratoire du modèle. Un autre point technique soulevé porte sur l'absence de respect des principes fondamentaux des bilans de masse et d'énergie. D'après les critiques, cette faute est assez grave et ce bilan est essentiel pour comprendre les dynamiques globales.

Sur le plan méthodologique, d'autres critiques des mêmes auteurs portent sur le décalage entre les recommandations formulées dans *E4A* et la structure même du modèle. Par exemple, bien que l'ouvrage défende des propositions ambitieuses en matière d'égalité des genres, cette dimension n'est pas intégrée de manière explicite dans le modèle. Plus concrètement, la notion de genre n'y figure à aucun moment.

En conséquence, les auteurs des critiques appellent à une refonte complète du modèle, estimant que ses faiblesses structurelles sont trop profondes pour être corrigées par de simples ajustements.

L'équipe *E4A* a répondu publiquement à ces critiques (Randers, 2024). Selon les auteurs, le modèle n'a jamais eu vocation à fournir des prévisions précises ni à représenter de manière exhaustive les interactions globales. *E4A* se veut avant tout un outil pédagogique, destiné à illustrer les scénarios présentés dans le livre et à stimuler le débat autour des transformations nécessaires pour un avenir durable. Ils expliquent que la simplification du modèle relève d'un choix méthodologique assumé, motivé par le souci de transparence et la volonté d'éviter de créer une « boîte noire » difficile à interpréter. Les « fonctions forcées », critiquées notamment par Ragnarsdóttir, sont selon eux des hypothèses explicites conçues pour tester des scénarios politiques précis. Quant à l'absence de bilans de masse et d'énergie rigoureux, ils précisent que le modèle ne prétend pas intégrer l'ensemble des aspects techniques. Ce choix leur permettrait, selon eux, de se concentrer sur les dynamiques sociales et économiques, qu'ils considèrent comme les moteurs essentiels du bien-être humain.

Cependant, les justifications apportées concernant les cinq recommandations, notamment celles à portée sociale, s'avèrent plutôt surprenantes. Jorgen Randers avance un point particulièrement controversé : les recommandations du projet ne proviennent pas directement des résultats du modèle. Il affirme que celui-ci a été conçu pour accompagner des idées déjà formulées dans le livre, précisant que « le manuscrit *Earth4All* était essentiellement achevé avant que les scénarios du modèle ne soient générés » (Randers, 2024). Autrement dit, le modèle a été développé a posteriori, non comme socle scientifique des conclusions, mais comme simple support illustratif.

Cette posture soulève une question scientifique de fond. *Earth4All* s'inscrit dans la continuité des travaux du Club de Rome, ce qui laisse attendre un ancrage rigoureux de ses messages dans la modélisation. Or, contrairement à *Limits to Growth*, où les conclusions découlaient directement des simulations, la démarche d'E4A semble inverser ce rapport, les messages semblant précéder le modèle. Cette approche, peu explicitée, introduit un manque de transparence et brouille la frontière entre recherche scientifique et communication stratégique. Si les propositions sociales et économiques portées par E4A demeurent pertinentes, leur fondement scientifique apparaît affaibli par cette ambiguïté.

Par ailleurs, la réponse apportée par l'équipe *Earth4All* ne semble pas à la hauteur des critiques formulées. En recentrant le débat sur la question classique de l'usage des modèles, à savoir s'ils doivent être considérés comme des outils de compréhension ou comme des représentations fidèles du réel, les auteurs évitent en partie les objections soulevées. Expliquer les erreurs physiques par la nature simplificatrice du modèle ne permet pas de répondre aux critiques portant sur sa cohérence scientifique.

1.2.6 Quelques autres modèles notables

Après avoir présenté les principales évolutions de *World3* et ses prolongements directs, il est utile d'évoquer d'autres modèles qui, sans en être la continuité, offrent des perspectives complémentaires sur les interactions entre l'humanité et son environnement.

1.2.6.1 Human and Nature Dynamics (*HANDY*)

Le modèle *Human and Nature Dynamics (HANDY)*, développé par Motesharrei, Rivas et Kalnay (2014), propose une interprétation générale des mécanismes de durabilité ou d'effondrement des sociétés humaines. Inspiré du modèle proie-prédateur de Lotka–Volterra (1925; 1926), il combine les dimensions écologiques et sociales afin de comprendre comment la surexploitation des ressources et les inégalités économiques peuvent fragiliser les civilisations.

Le modèle distingue deux groupes sociaux : les *Commoners*, qui produisent les richesses à partir des ressources naturelles, et les *Elites*, qui en bénéficient de manière disproportionnée. L'ensemble du système repose sur les interactions entre la population humaine, la nature et la richesse accumulée. Contrairement aux modèles écologiques classiques, *HANDY* introduit la capacité des sociétés humaines à accumuler et à concentrer des surplus, ce qui leur permet de croître temporairement au-delà des limites écologiques avant de subir un effondrement.

Le modèle montre que la stabilité d'une société dépend de sa capacité à maintenir un équilibre entre la consommation et la régénération des ressources. Si la nature est exploitée plus vite qu'elle ne se renouvelle, ou si la richesse se concentre entre les mains d'une minorité, le système entre dans une phase de déséquilibre qui conduit à un déclin.

Le modèle *HANDY* étudie l'impact des structures sociales sur la stabilité des civilisations en testant plusieurs configurations : société égalitaire, société équitable et société inégalitaire dominée par une élite consommatrice. Il distingue deux types d'effondrement : le type N (pour Nature), d'origine écologique, causé par la surexploitation des ressources, et le type L (pour Labor), d'origine sociale, lié à des inégalités extrêmes entraînant la disparition progressive des classes laborieuses puis des élites qui en dépendent.

Les résultats montrent que ces deux formes d'effondrement peuvent survenir indépendamment : une société inégalitaire peut s'effondrer même sans pénurie de ressources, tout comme une société égalitaire peut disparaître sous l'effet d'une surconsommation. À l'inverse, une utilisation modérée des ressources et une répartition équilibrée des richesses permettent d'atteindre un état

d'équilibre durable. *HANDY* met ainsi en évidence le rôle conjoint de la justice sociale et de la gestion écologique dans la résilience des sociétés.

1.2.6.2 Daisyworld

Le modèle *Daisyworld*, développé par Lovelock et Watson (1983), illustre avec une simplicité remarquable le principe d'autorégulation au cœur de l'hypothèse de Gaïa. Sur cette planète imaginaire, la température globale résulte des interactions entre deux espèces de pâquerettes : les noires, qui absorbent la chaleur, et les blanches, qui la reflètent. Lorsque la planète se refroidit, les pâquerettes noires prolifèrent et réchauffent le climat ; lorsqu'elle se réchauffe, les blanches se développent et le refroidissent. Sans qu'aucune intention n'intervienne, ces rétroactions biologiques stabilisent la température moyenne et maintiennent des conditions favorables à la vie sur une large plage de luminosité stellaire.

Ce modèle minimaliste montre qu'un équilibre planétaire peut émerger de règles locales très simples. Il ne cherche pas à représenter fidèlement la Terre, mais à révéler, de manière conceptuelle, comment la vie et l'environnement peuvent coévoluer dans un système fermé. Comme le souligne Dutreuil (2013), *Daisyworld* ne doit pas être compris comme un modèle climatique, mais comme une démonstration épistémologique de la co-dépendance entre la biosphère et son milieu.

À la manière des *mind-sized models* décrits par Bardi (2013), *Daisyworld* rappelle qu'un modèle n'a pas besoin d'être complexe pour être éclairant. Sa simplicité en fait un outil conceptuel puissant, capable d'illustrer, avec peu d'hypothèses, des mécanismes fondamentaux de régulation planétaire.

1.2.6.3 L'économie du Donut

Proposé par Kate Raworth (Raworth, 2017), le modèle de l'*économie du Donut* traduit de façon graphique l'idée d'un espace sûr et juste pour l'humanité. Le cercle intérieur représente le plancher social, c'est-à-dire les besoins fondamentaux liés aux droits humains : accès à l'alimentation, à

l'eau, à l'énergie, à la santé, à l'éducation, à l'équité et à la participation politique. Le cercle extérieur définit le plafond environnemental, correspondant aux neuf planétaires identifiées par Rockström et al. (Rockström *et al.*, 2009) (changement climatique, érosion de la biodiversité, usage de l'azote et du phosphore, acidification des océans, perturbation du cycle de l'eau douce, changements d'occupation des sols, pollution chimique, appauvrissement de la couche d'ozone et concentration d'aérosols atmosphériques). Entre ces deux frontières se situe la zone de prospérité durable, où les besoins humains peuvent être satisfaits sans compromettre les équilibres écologiques.

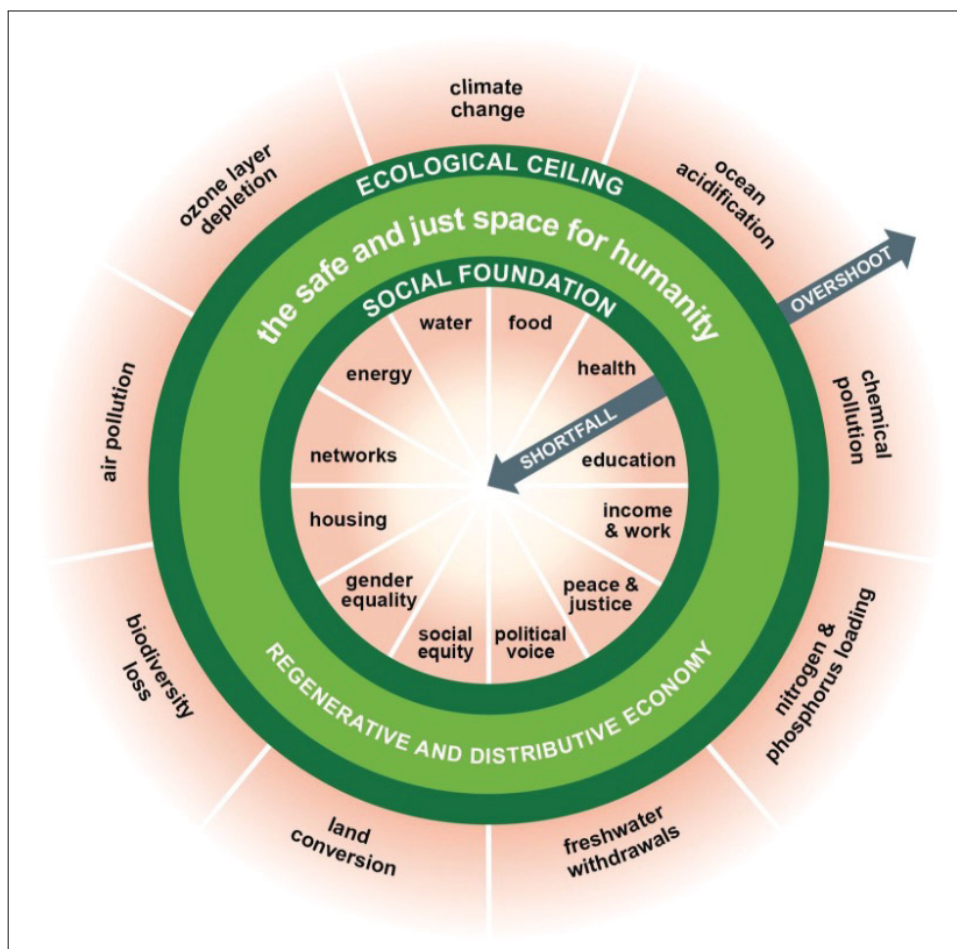


Figure 1.6 Représentation du modèle de l'*économie du Donut* de Kate Raworth, illustrant l'espace « sûr et juste » pour l'humanité, situé entre les fondations sociales et les limites planétaires
Tirée de Raworth (2017)

Ce cadre conceptuel, à la fois simple et synthétique, offre une lecture systémique de la durabilité : il relie la satisfaction des besoins humains aux conditions biophysiques de la Terre, montrant que la justice sociale et la stabilité écologique sont indissociables. Par sa force visuelle et sa clarté, ce modèle s'inscrit dans la continuité des approches systémiques, mais avec une portée plus normative et pédagogique. Il illustre comment un modèle purement graphique peut, à lui seul, rendre perceptible la complexité des interactions entre économie, société et environnement.

1.3 La décroissance : repenser le développement dans un monde fini

Les conclusions du rapport *Limits to Growth* ont marqué un tournant majeur dans la compréhension des dynamiques globales, en révélant que la poursuite d'une croissance exponentielle de la population, de la production industrielle et de la consommation des ressources conduit inévitablement à des déséquilibres systémiques. Elles ont ainsi mis en lumière la nécessité de redéfinir les finalités du développement afin de les inscrire dans les limites biophysiques de la planète.

Ces constats ont nourri une réflexion plus large sur les fondements du modèle économique dominant et sur la possibilité d'un développement affranchi de l'impératif de croissance. C'est dans ce contexte qu'émerge le courant de la décroissance, qui prolonge et approfondit les avertissements du rapport Meadows en y intégrant une dimension sociale, politique et éthique. La section suivante en présente les principaux fondements et débats contemporains..

1.3.1 Les grandes limites de la croissance

La décroissance s'oppose par essence au paradigme de la croissance infinie. Quelles sont alors les principales critiques formulées par la pensée décroissanciste ?

L'une des plus récurrentes concerne la reconnaissance des limites physiques de la biosphère. C'est ce qu'avait déjà mis en évidence l'équipe de Meadows au MIT dès 1972. Toute activité économique repose sur des flux de matière et d'énergie soumis à la loi d'entropie : rien ne se crée ni ne se perd, tout se transforme et se dégrade (Georgescu-Roegen, 1971). En s'appuyant

sur cette contrainte thermodynamique, Georgescu-Roegen élabore une approche bioéconomique dans laquelle l'économie est comprise comme un processus irréversible de dégradation de ressources finies.

Les travaux plus récents sur les limites planétaires confirment et actualisent ces constats : sept des neuf limites identifiées sont aujourd'hui dépassées, révélant un déséquilibre croissant des écosystèmes terrestres (Rockström *et al.*, 2009). L'économie doit dès lors être pensée non comme un système autonome, mais comme un sous-système inscrit dans la biosphère.

La croissance n'est pas seulement écologiquement destructrice, elle est aussi socialement injuste. Comme le souligne Abraham (2019), elle tend à ne profiter qu'à une minorité privilégiée. Derrière la promesse d'un progrès partagé, la dynamique de croissance repose sur une série de rapports de domination : entre classes sociales, entre le Nord et le Sud, entre genres, mais aussi entre générations. Ces rapports permettent aux plus puissants d'externaliser les coûts économiques, sociaux et écologiques de leur mode de vie sur les plus vulnérables.

Au-delà même de ces limites physiques et sociales, la décroissance critique également la dimension aliénante de la société de croissance. Abraham (Abraham, 2024b) met en lumière le caractère « sacré » accordé à la croissance économique, devenue une valeur intouchable et incontestable. Dans cette logique, la quête de croissance et de puissance technique prend la forme d'un véritable dogme collectif. Loin de libérer l'humanité, cette dynamique l'assujettit à une double domination : celle de l'impératif de profit et celle de la recherche incessante de puissance technique.

1.3.2 Le mythe de la *croissance verte*

Pour répondre aux critiques adressées à la croissance, à la fois écologiquement destructrice et socialement injuste, les politiques contemporaines ont popularisé l'idée de *croissance verte*. Celle-ci désigne un modèle fondé sur la possibilité de découpler la croissance économique de la consommation de ressources naturelles et de la production de déchets. Soutenue par des institutions comme l'OCDE et la Commission européenne (Organisation for Economic

Co-operation and Development, 2011), la croissance verte constitue aujourd'hui un pilier central des politiques de durabilité. Von der Leyen en a fait l'un des axes majeurs du *Green Deal* (European Commission, 2020). L'idée repose sur un pari technologique consistant à produire davantage avec moins, grâce à l'efficacité énergétique, à l'innovation et à la dématérialisation des activités économiques.

Pourtant, les analyses empiriques montrent que cette promesse reste largement illusoire. Selon une méta-analyse de plus de 800 études, le découplage entre croissance économique et pressions environnementales demeure très limité (Haberl, Wiedenhofer, Virág & et al., 2020). Haberl et ses collègues distinguent un découplage relatif, lorsque les émissions et l'usage des ressources augmentent plus lentement que le PIB, d'un découplage absolu, lorsque ces pressions diminuent malgré la croissance. Ce dernier, rare et de faible ampleur, reste insuffisant pour atteindre les objectifs climatiques mondiaux.

1.3.3 La décroissance comme projet de société

La mise en pratique d'une société de décroissance pose de nombreux défis politiques et sociaux. Comment réduire les flux matériels sans accentuer les inégalités ? Comment repenser le travail, la propriété ou la monnaie dans une économie post-croissance ?

Dans cette perspective, Abraham (2024a) résume la feuille de route de la décroissance autour de trois principes indissociables : produire moins, partager plus et décider ensemble. Produire moins signifie rompre avec le mythe de la *croissance verte* et admettre la nécessité de réduire la production pour limiter l'empreinte écologique. Partager plus rappelle qu'« une sobriété sans justice, c'est l'austérité » (Abraham, 2024a). La baisse de la production ne peut être soutenable que si elle s'accompagne d'une redistribution équitable des richesses et du pouvoir. Décider ensemble renvoie enfin à la dimension politique de la décroissance. Les transformations à mener ne doivent pas être imposées d'en haut, mais débattues collectivement afin de choisir la manière dont nous voulons habiter la Terre.

Ces orientations se traduisent par des propositions concrètes, telles que le développement de technologies sobres (Berlan, 2023), la gestion collective des ressources (Ostrom, 1990) ou encore la création de biorégions autonomes (Sale, 1985). Toutes visent à construire une société fondée sur la solidarité, la mesure et la coopération, plutôt que sur l'accumulation et la compétition.

Dans ce contexte, la réflexion politique évolue progressivement. En mai 2023, le Parlement européen a accueilli la conférence *Beyond Growth*, consacrée à la refonte des politiques économiques à l'aune des limites planétaires et de la justice sociale. Parmi les intervenants figuraient notamment Raworth, autrice de l'*Économie du Donut* (Raworth, 2017), et Dixon-Declève, coprésidente du Club de Rome et coautrice du rapport *Earth for All* (Dixon-Declève et al., 2023).

En définitive, la décroissance ne constitue pas une idéologie du renoncement, mais une voie de résilience et de réappropriation du sens. Elle propose de ralentir pour mieux habiter le monde, de redonner de la valeur au lien social et à la solidarité, et d'ouvrir la voie à une économie réellement soutenable et désirable.

1.4 Mesurer et comprendre les inégalités mondiales

La section précédente a abordé la décroissance et les principales pistes de transformation qu'elle propose. Ces réflexions prolongent les avertissements formulés dans *The Limits to Growth* et mettent en évidence la nécessité de repenser en profondeur le modèle de développement.

Dans le cadre de ce travail, qui vise à actualiser le modèle *World3* sous un angle social, il devient essentiel d'examiner la question des inégalités mondiales. Celles-ci représentent à la fois un facteur déterminant de la stabilité des sociétés humaines et un enjeu central d'une transition juste : l'un des principes fondateurs de la pensée décroissante.

1.4.1 Les grandes sources de données

Plusieurs institutions internationales produisent aujourd’hui des données sur la répartition du revenu, de la richesse et du bien-être. Le *World Inequality Lab* (WIL) publie la *World Inequality Database* (WID), qui rassemble des séries historiques sur l’évolution des inégalités de revenu et de patrimoine entre et au sein des pays (World Inequality Lab, 2023). Il publie également les *World Inequality Reports* (Chancel, Piketty, Saez, Zucman *et al.*, 2022) et les *Climate Inequality Report* (Chancel *et al.*, 2023), qui synthétisent les grandes tendances mondiales en matière d’inégalités économiques et environnementales.

La *Poverty and Inequality Platform* (PIP) de la Banque mondiale rassemble les estimations officielles de pauvreté et d’inégalité pour plus de 170 pays. Issue d’enquêtes ménages compilées dans la *Global Monitoring Database*, elle permet d’analyser les tendances mondiales et régionales à partir de différents seuils de pauvreté, notamment 2,15, 3,65 et 6,85 dollars par jour (en PPA 2017) (Banque mondiale, 2025).

Ainsi, les principales sources mobilisées dans ce rapport sont la *PIP* de la Banque mondiale et le *World Inequality Lab*. D’autres bases, telles que la *World Income Inequality Database* (WIID) de l’Université des Nations Unies (UNU-WIDER, 2023) ou la *OECD Income Distribution Database* (OECD, 2024), proposent également des données pertinentes mais ne seront pas exploitées directement dans ce travail.

1.4.2 Les principaux indicateurs économiques, sociaux et environnementaux

Les inégalités de revenu et de richesse sont mesurées à l’aide d’indicateurs statistiques qui quantifient la dispersion des niveaux de vie dans une population. Le plus couramment utilisé est le coefficient de Gini, défini par Corrado Gini en 1912 (Gastwirth, 1972). Il varie entre 0, correspondant à une égalité parfaite, et 1, représentant une inégalité totale. À titre d’exemple, les pays nordiques présentent généralement des valeurs proches de 0,25 tandis que les pays d’Afrique australe dépassent souvent 0,50 (UNU-WIDER, 2023).

Le coefficient de Gini se déduit de la courbe de Lorenz, qui représente la part cumulée du revenu détenue par la part cumulée de la population, classée du plus pauvre au plus riche. L'écart entre cette courbe et la diagonale d'égalité parfaite traduit l'ampleur de l'inégalité : plus la courbe s'en éloigne, plus la distribution est inégale. Sur le plan formel, le Gini s'exprime par :

$$G = 1 - 2 \int_0^1 L(\alpha) d\alpha = 1 - 2B \quad (1.3)$$

où $L(\alpha)$ désigne la courbe de Lorenz, c'est-à-dire la part cumulée du revenu détenue par la proportion α la plus pauvre de la population. De manière graphique, A représente l'aire comprise entre la ligne d'égalité parfaite et la courbe de Lorenz, tandis que B correspond à l'aire située sous la courbe de Lorenz (voir figure 1.7).

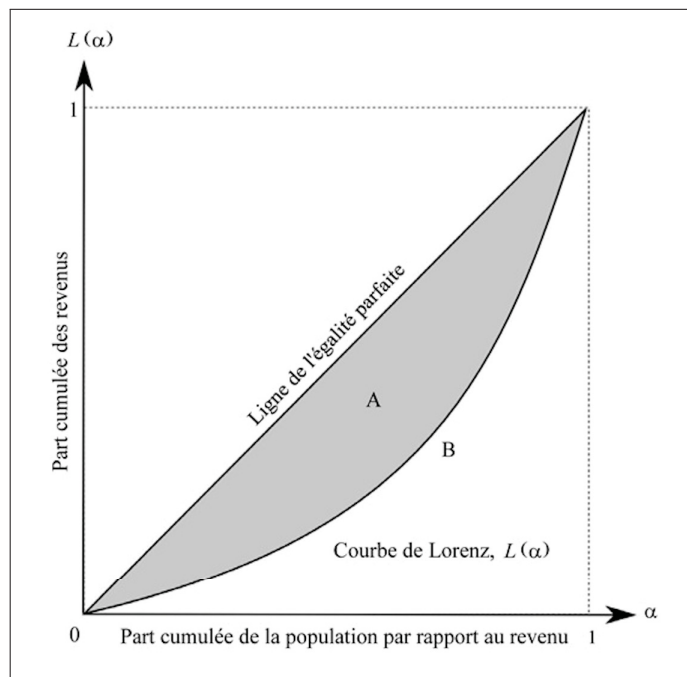


Figure 1.7 Courbe de Lorenz illustrant la distribution cumulative des revenus et le coefficient de Gini

D'autres indicateurs complètent cette mesure. L'*Indice de Theil* et le *Mean Log Deviation* (MLD) appartiennent à la famille des mesures entropiques, qui évaluent le degré de désordre dans la

répartition des revenus : plus la distribution est concentrée, plus l'« entropie sociale » est faible. Ces indices sont particulièrement sensibles aux valeurs extrêmes et permettent de décomposer les inégalités entre et au sein des groupes. Le *Palma ratio*, plus intuitif, compare la part du revenu détenue par les 10 % les plus riches à celle des 40 % les plus pauvres (Cobham & Sumner, 2013).

D'autres approches visent à dépasser la seule dimension monétaire. L'*Indice de développement humain* (IDH) combine le revenu, l'espérance de vie et le niveau d'éducation, tandis que le *Multidimensional Poverty Index* (MPI) prend en compte des privations concrètes telles que la santé, l'accès à l'eau, à l'énergie ou à l'éducation (Alkire, Kövesdi, Scheja & Vollmer, 2023).

Enfin, les émissions de dioxyde de carbone par habitant constituent un indicateur environnemental essentiel des inégalités mondiales. Elles traduisent à la fois les différences de consommation énergétique et la répartition inégale des responsabilités face au changement climatique. Le *Climate Inequality Report 2023* met en évidence la forte disparité des émissions de dioxyde de carbone par habitant entre les déciles de revenu, en faisant de cet indicateur un outil clé d'analyse des inégalités climatiques (Chancel *et al.*, 2023).

1.4.3 État de la pauvreté extrême

Selon la *Poverty and Inequality Platform* de la Banque mondiale (Banque mondiale, 2025), la part de la population mondiale vivant sous le seuil de pauvreté international de 2,15 \$ PPA 2017 par jour est passée d'environ 40 % en 1981 à moins de 10 % dans les années 2020, marquant un progrès historique dans la lutte contre l'extrême pauvreté (les méthodes de conversion en PPA sont précisées à la section 2.3.4.1). La figure 1.8 illustre cette évolution, montrant à la fois la baisse continue du nombre de personnes vivant sous ce seuil et la montée progressive des populations vivant au au-dessus de 6,85 \$.

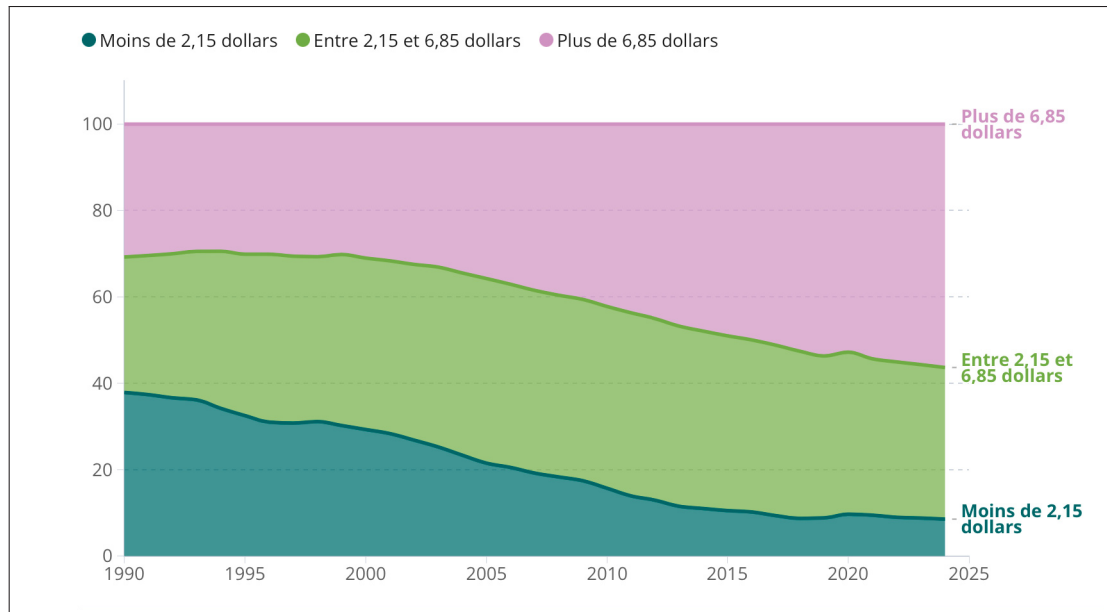


Figure 1.8 Répartition de la population mondiale selon trois seuils de revenu journalier : moins de 2,15 \$ entre 2,15 \$ et 6,85 \$, et plus de 6,85 \$
Tirée de *Poverty and Inequality Platform* (2025)

Bien que ces indicateurs soient positifs, ils ne donnent qu'une image partielle de la réalité. Ils rendent compte d'une baisse de l'extrême pauvreté, mais reposent sur des seuils absolus. Ces mesures ne permettent pas d'évaluer les inégalités relatives, c'est-à-dire la répartition des richesses au sein d'une société. Pour appréhender pleinement ces phénomènes, il est nécessaire de croiser ces deux lectures. Une diminution de la pauvreté peut en effet s'accompagner d'une concentration accrue des richesses, ce qui met en évidence la complexité des inégalités à l'échelle mondiale (Hickel, 2020). Dans cette perspective, Hickel invite à reconsidérer les récits statistiques sur la pauvreté mondiale. Il souligne que les tendances présentées reposent sur des méthodologies hétérogènes, combinant des estimations de PIB pour les périodes anciennes et des enquêtes de revenus et de consommation pour les périodes récentes. Cette discontinuité rend les comparaisons historiques fragiles et les conclusions sur le long terme incertaines. Au-delà de ces limites techniques, Hickel insiste sur la dimension structurelle des inégalités : la croissance mondiale s'est accompagnée d'un transfert massif de richesses du Sud vers le Nord et d'une

concentration accrue du capital. Selon lui, la question centrale n'est donc pas seulement la réduction de la pauvreté, mais la manière dont la richesse mondiale est produite et répartie.

1.4.4 Les formes et dynamiques des inégalités contemporaines

Les inégalités de revenu et de patrimoine constituent le cœur des déséquilibres mondiaux. Selon la *World Inequality Database* (World Inequality Lab, 2023), les 10 % les plus riches de la planète captent environ 52 % du revenu mondial, tandis que les 50 % les plus pauvres n'en perçoivent qu'à peine 8,5 % (voir figure 1.9). La concentration des richesses apparaît encore plus marquée, le 1 % le plus riche détient près de 38 % du patrimoine mondial, tandis que la moitié la plus pauvre ne possède qu'environ 2 % (voir figure 1.9). Cette polarisation s'est accentuée après la pandémie de 2020, période durant laquelle la fortune des milliardaires a progressé de plus de 25 %. Dans les pays de l'OCDE, le revenu moyen du décile supérieur est désormais 8,4 fois plus élevé que celui du décile inférieur (OECD, 2024).

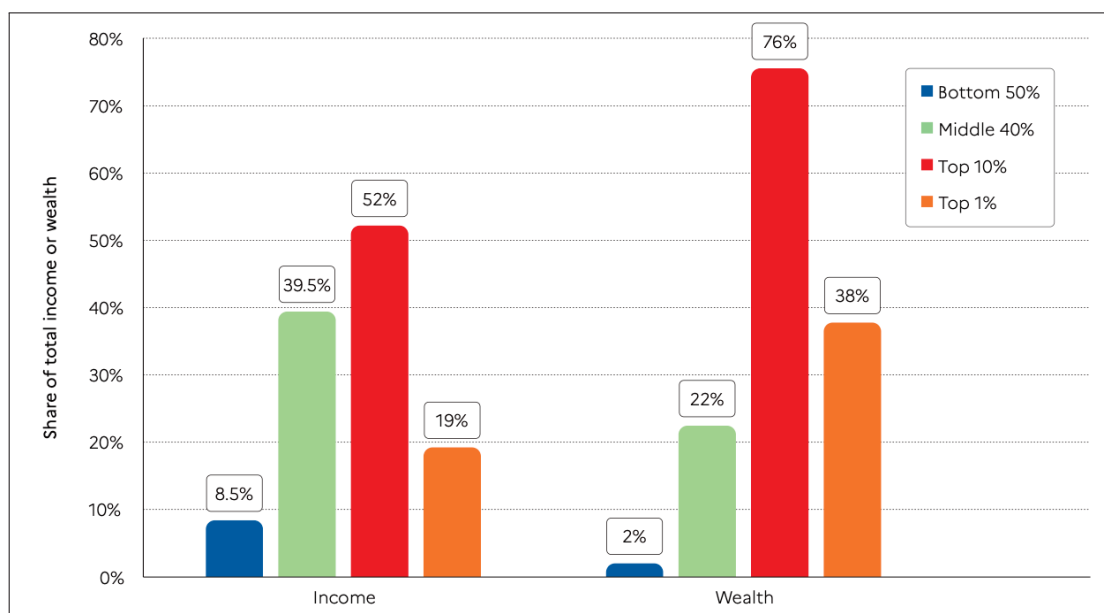


Figure 1.9 Part du revenu et du patrimoine mondial détenue par chaque groupe de la population : 50 % inférieur, 40 % intermédiaire, 10 % supérieur et 1 % supérieur

Tirée de Chancel et al. (2022)

La dimension écologique des inégalités constitue l'un des enjeux majeurs du XXI^e siècle. Les travaux de Chancel et Piketty (Chancel *et al.*, 2023) montrent que les 10 % les plus riches sont responsables d'environ 48 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone, tandis que les 50 % les plus pauvres n'en produisent que 11,5 %. Le 1 % le plus aisé émet à lui seul autant que les deux tiers les plus pauvres réunis. Comme le montre la figure 1.10, en moyenne, un individu du décile supérieur émet 28,7 tonnes de CO₂ équivalent par an, contre seulement 1,4 tonne pour la moitié inférieure.

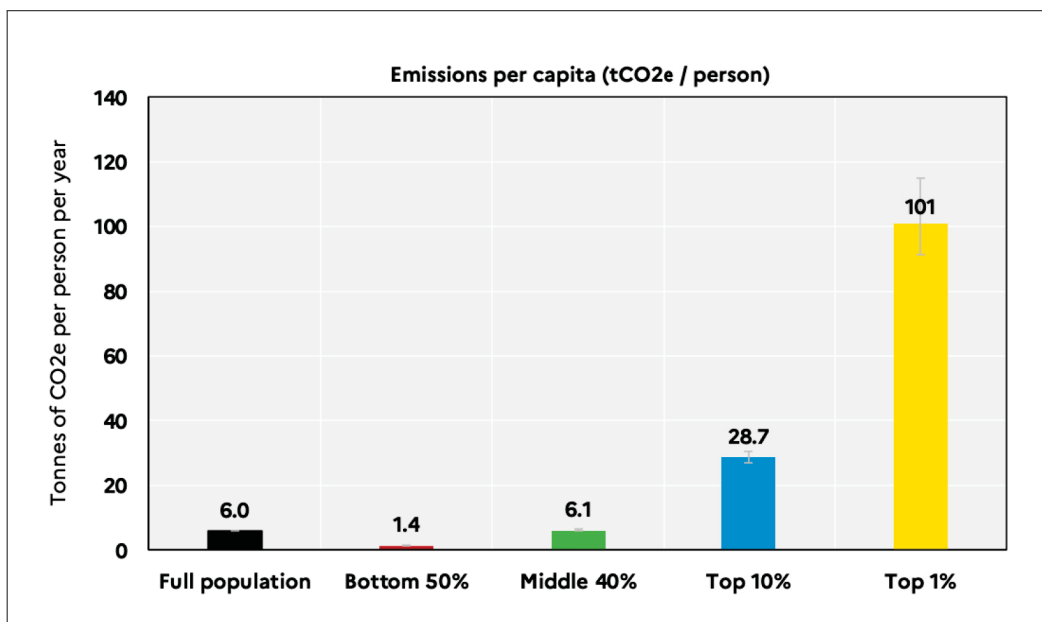


Figure 1.10 Émissions annuelles moyennes de CO₂e par habitant selon le niveau de revenu, exprimées en tonnes équivalent CO₂ par personne et par an
Chancel et al. (2023)

Les recherches récentes de Schöngart et al. (2025) confirment l'ampleur de ces disparités : depuis 1990, les 10 % les plus riches du monde seraient responsables d'environ deux tiers du réchauffement global observé, tandis que le 1 % le plus riche aurait contribué à près de 20 %. Leurs émissions ont également provoqué jusqu'à sept fois plus d'événements climatiques extrêmes que la moyenne mondiale. En parallèle, les régions à faibles revenus, responsables d'une part marginale des émissions, subissent les conséquences les plus sévères du dérèglement :

catastrophes naturelles plus fréquentes, dégradation des écosystèmes et pertes économiques majeures (GIEC, 2023).

1.4.5 Limites de la mesure des inégalités mondiales

La mesure des inégalités mondiales reste un exercice difficile, tant les données et les approches varient d'un pays à l'autre. Gradín (2024) souligne que les principales bases de données, comme la *World Inequality Database* ou la *Poverty and Inequality Platform*, reposent sur des sources très différentes : enquêtes auprès des ménages, données fiscales ou comptes nationaux. Ces différences de méthode, de couverture et de fréquence rendent les comparaisons internationales incertaines. Dans de nombreux pays à revenu faible ou intermédiaire, la faiblesse des systèmes statistiques et l'importance du secteur informel accentuent encore ces limites.

Pourtant, malgré ces écarts, toutes les sources aboutissent à la même conclusion : les inégalités persistent et s'amplifient. Elles se traduisent par une concentration du revenu, du patrimoine et des émissions de carbone au profit des plus riches, accentuant à la fois les fractures sociales et les déséquilibres écologiques.

1.5 Discussion : Pourquoi envisager une mise à jour sociale de *World3* ?

Les différentes classes sociales n'ont pas exercé la même pression sur les ressources ni contribué de manière équivalente aux déséquilibres environnementaux. Prendre en compte ces dimensions sociales dans l'analyse des limites planétaires permet de mieux comprendre la dynamique du système mondial et renforce la pertinence d'une mise à jour sociale du modèle *World3*.

1.5.1 Littérature actuelle et pertinence du modèle

Plus de cinquante ans après sa publication, le modèle *World3* demeure un outil emblématique pour analyser les interactions entre population, ressources, production industrielle, alimentation et pollution. Sa structure systémique, fondée sur des boucles de rétroaction, permet de suivre la dynamique de la croissance et de ses limites à l'échelle planétaire. Plusieurs études rétrospectives,

notamment celles de Turner (Turner, 2008, 2012, 2014) et de Herrington (Herrington, 2021), ont confirmé la pertinence du modèle, montrant que certaines trajectoires simulées dans le rapport initial reproduisent de manière frappante l'évolution observée des principaux indicateurs mondiaux.

Depuis sa première version, *World3* a fait l'objet de multiples mises à jour. Certaines ont porté sur la réévaluation empirique des paramètres (Jochaud Du Plessix, 2019) ou la calibration des fonctions (Nebel *et al.*, 2024), d'autres sur l'ajout de nouvelles dimensions thématiques, comme la gestion de l'eau (Vola, 2024), l'intelligence artificielle (Guliyeva *et al.*, 2025) ou encore les questions de genre (Raizin, 2025). Ces efforts montrent la plasticité du modèle et sa capacité à intégrer des enjeux émergents sans perdre sa cohérence structurelle. Toutefois, malgré ces enrichissements, la composante sociale y reste traitée de manière agrégée. La population mondiale y est modélisée comme un ensemble homogène, sans distinction entre groupes économiques, sociaux ou culturels.

Les données de la *World Inequality Database* (World Inequality Lab, 2023) et de la *Poverty and Inequality Platform* (Banque mondiale, 2025) mettent en évidence de fortes différences dans les modes de consommation entre groupes sociaux. Ces écarts ne relèvent pas seulement de la justice sociale : ils influencent directement le fonctionnement du système Terre, à travers des niveaux très inégaux d'émissions, de consommation énergétique et matérielle, ainsi que par un accès différencié aux services essentiels comme la santé, l'éducation ou l'alimentation.

1.5.2 L'intérêt d'un couplage social et systémique

Les modèles récents, tels que *HANDY* (Motesharrei *et al.*, 2014) ou *Earth4All* (Dixson-Declève *et al.*, 2023), montrent que la prise en compte de la stratification sociale modifie profondément les dynamiques globales. Lorsque la distribution des ressources devient inégale, la stabilité du système s'affaiblit : la surconsommation des groupes les plus aisés accélère la dégradation écologique et amplifie les pressions sur les ressources. Intégrer ces effets distributifs dans *World3*

permettrait ainsi de mieux représenter les trajectoires de transition et d'identifier les conditions d'un équilibre durable à la fois social et environnemental.

Cette approche ne remet pas en cause la logique du modèle original ; elle la prolonge. En y ajoutant un plancher social inspiré de travaux comme ceux de Raworth (2017), il deviendrait possible d'évaluer non seulement la viabilité écologique, mais aussi la justice des trajectoires envisagées. Le modèle pourrait ainsi représenter la part de la population vivant sous un seuil de vie digne, la répartition différenciée des consommations ou la contribution inégale aux émissions. Ces ajouts offriraient un cadre pour explorer des scénarios de transition équitable, où la décroissance matérielle coexiste avec une amélioration du bien-être collectif.

CHAPITRE 2

DÉVELOPPEMENT MÉTHODOLOGIQUE D'UN MODÈLE SOCIO-DÉMOGRAPHIQUE SOUS *World3*

Ce chapitre présente la démarche méthodologique adoptée pour introduire une dimension sociale dans le modèle *World3* et en quantifier les effets. Cette nouvelle base servira ensuite de support à l'analyse des résultats.

Le chapitre suit un fil conducteur assez dense, mais nécessaire pour comprendre la logique de l'adaptation. Il s'ouvre sur un rappel du fonctionnement général de *World3*, puis décrit la refonte démographique et la création de groupes sociaux différenciés. Les effets de cette segmentation sont ensuite explorés, avec une attention particulière portée au secteur industriel. Enfin, l'indice de bien-être humain est revisité grâce à l'introduction d'un indice de niveau de vie décent.

À la fin de cette partie, une synthèse méthodologique vient reprendre de manière simple la structure et les principaux choix effectués. Elle offre ainsi un fil conducteur pour garder une vue d'ensemble, y compris lorsque les détails techniques peuvent sembler plus difficiles à suivre. Afin d'alléger la lecture, les développements les plus approfondis ont été placés en annexe.

2.1 *World3* : Étude du modèle

Avant d'entrer dans le détail technique du modèle, il est utile de rappeler les principes généraux et la logique systémique de *World3*. Cette mise en contexte facilite la compréhension des adaptations méthodologiques présentées par la suite.

2.1.1 Structure globale de *World3*

Lorsqu'il est fait référence à *World3* et aux dynamiques internes qui le structurent, les explications méthodologiques et les choix de modélisation s'appuient sur l'ouvrage *Dynamics of Growth in a Finite World* (Meadows *et al.*, 1974), qui accompagne le modèle. Ce document de plus de 650 pages décrit en détail l'architecture du modèle, les hypothèses formulées, les variables

identifiées, ainsi que les interactions entre elles. Il fournit également une analyse approfondie des simulations réalisées et des sources de données mobilisées.

Dans un premier temps, une analyse globale du modèle *World3* est menée afin d'en comprendre les grandes lignes techniques. Cette étape permet ensuite d'examiner les modifications qui y sont apportées.

Comme mentionné précédemment, le modèle repose sur cinq variables fondamentales : la population, le niveau d'industrialisation par personne, la production alimentaire par personne, la pollution et les ressources naturelles. Ces variables principales sont elles-mêmes décomposées en plus de 300 sous-variables, qui détaillent leurs dynamiques et interactions. Le tableau 2.1 en présente les principales, avec leur description et leur identifiant.

Ces cinq secteurs interagissent à travers des dynamiques complexes. Toutefois, ces interactions peuvent être représentées de manière schématique en mettant en évidence les variables exogènes, c'est-à-dire celles qui proviennent d'autres secteurs.

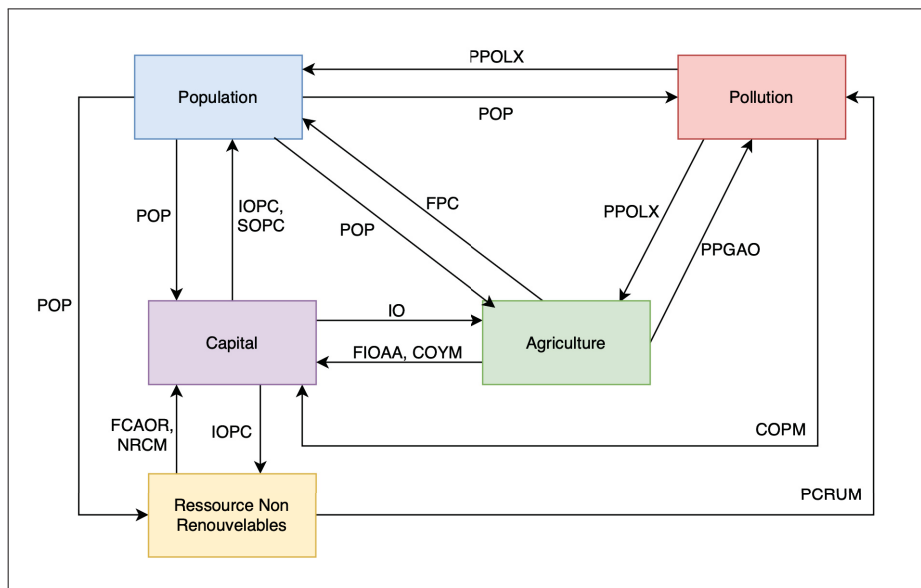


Figure 2.1 Diagramme des principaux secteurs de *World3* et de leurs interactions

Adaptée de Jochaud Du Plessix (2019)

Tableau 2.1 Définition et noms des variables et paramètres importants

ID	Nom	Type	Définition
ICDR	Industrial Capital Depreciation Rate	Flux	Taux de dépréciation du capital industriel
ICIR	Industrial Capital Investment Rate	Flux	Taux d'investissement alloué au capital industriel
ALIC	Average Life of Industrial Capital	Paramètre	Durée de vie moyenne du capital physique
DCFSN	Desired Completed Family Size Norm	Paramètre	Taille familiale souhaitée hors influences sociales
ICOR	Industrial Capital Output Ratio	Paramètre	Rapport entre capital investi et production générée
ILF	Inherent Land Fertility	Paramètre	Fertilité naturelle des terres, sans intervention humaine
LFH	Land Fraction Harvested	Paramètre	Part des terres cultivées parmi les terres arables
LYF	Land Yield Fraction	Paramètre	Coefficient ajustant le rendement des sols
MTFN	Maximum Total Fertility Normal	Paramètre	Fertilité maximale théorique par femme
RLT	Reproductive Lifetime	Paramètre	Durée moyenne de la période fertile des femmes
SFPC	Subsistence Food per Capita	Paramètre	Niveau alimentaire minimum vital par individu
IC	Industrial Capital Stock	Capital industriel	Volume total de capital industriel existant
CUFT	Capital Utilization Fraction Table	Table	Impact d'un manque de main-d'œuvre sur l'usage du capital
FPC	Food Per Capita	Variable	Quantité de nourriture disponible par habitant
POP	Population	Variable	Total des populations segmentées du modèle
COPM	Pollution control technology multiplier for capital	Variable	Effet des technologies antipollution sur la production industrielle
COYM	Capital Output Yield Multiplier	Variable	Impact des technologies agricoles sur le rendement industriel
FCAOR	Fraction of Capital Allocated to Obtaining Resources	Variable	Part du capital dédiée à l'extraction des ressources
FIOAA	Fraction of Industrial Output Allocated to Agriculture	Variable	Portion de la production industrielle affectée à l'agriculture
FIOAC	Fraction of Industrial Output Allocated to Consumption	Variable	Part de la production industrielle dédiée à la consommation
FIOAI	Fraction of Industrial Output Allocated to Industry	Variable	Part affectée au secteur industriel
FIOAS	Fraction of Industrial Output Allocated to Services	Variable	Part affectée aux services
IO	Industrial Output	Variable	Production totale de biens industriels
IOPC	Industrial Output Capital Per Capita	Variable	Production industrielle par habitant
PCRUM	Per Capita Resource Usage Multiplier	Variable	Coefficient d'usage des ressources par personne
PPGAO	Persistent Pollution Generated by Agricultural Output	Variable	Pollution durable issue des activités agricoles
PPOLX	Persistent Pollution Index	Variable	Pollution actuelle relative à celle de 1970
SOPC	Service Output Per Capita	Variable	Volume de services produits par individu
ICOR2T	Industrial Capital Output Ratio Multiplier from Resource Conservation Technology	Variable	Gain de productivité dû aux technologies de conservation des ressources

Pour plus de détails, l'Annexe I présente le schéma DYNAMO extrait du rapport technique. Avant d'approfondir l'étude des modifications apportées au modèle, une brève explication de chaque domaine et des variables clés qui les régissent est proposée.

2.1.2 Secteurs et variables clefs

Pour mieux comprendre les modifications apportées au modèle, cette section présente les principaux secteurs de World3 ainsi que les variables clés qui les structurent. Chaque domaine sera brièvement expliqué avant d'aborder ses dynamiques internes.

2.1.2.1 Population

Le secteur de la population repose sur une variable principale : la population elle-même. Il est structuré autour de trois éléments : la démographie, la fertilité et l'espérance de vie.

La fertilité agit sur la natalité, tandis que l'espérance de vie influence la mortalité. Ensemble, elles déterminent l'évolution de la population. Ces dynamiques et leurs effets sont détaillés dans une partie ultérieure.

2.1.2.2 Capital

Le secteur du capital produit principalement deux sorties : la production industrielle et la production de services, toutes deux exprimées en \$/an. Il est structuré en trois sous-secteurs : l'industrie, les services et l'emploi.

Le secteur industriel regroupe le niveau de production du secteur manufacturier, minier et des services publics (électricité et gaz). La modélisation de la production industrielle occupe une place centrale dans *World3*, car elle influence directement de nombreuses autres variables du modèle, notamment l'agriculture, les ressources non renouvelables, la pollution et la fertilité, comme le soulignent les diagrammes de causalité de la figure 2.2.

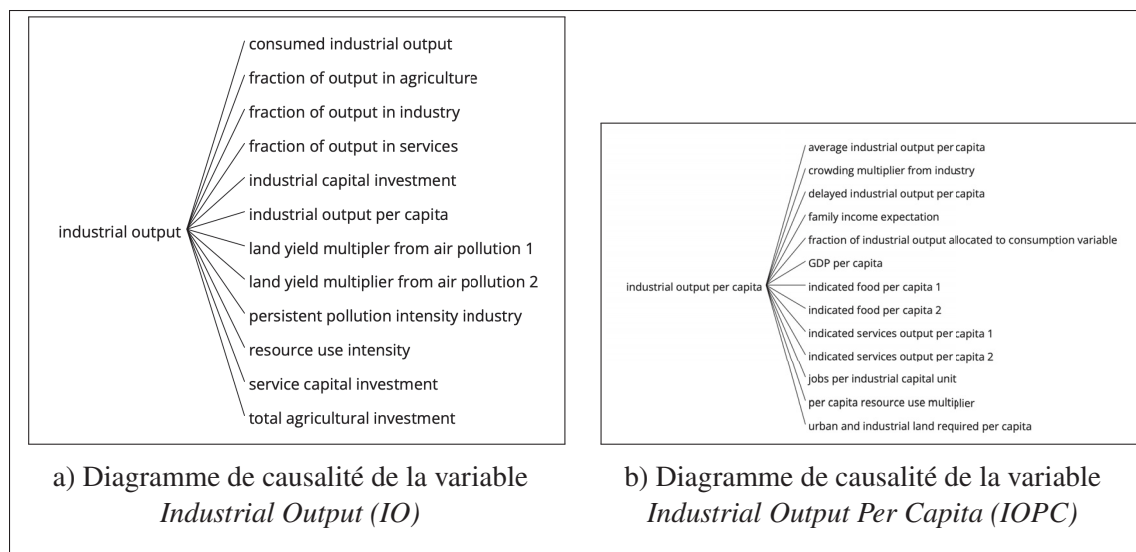


Figure 2.2 Diagrammes de causalité des variables industrielles principales du modèle *World3*

Le secteur des services représente les activités du secteur tertiaire. Il exerce une influence sur plusieurs autres variables du modèle, notamment le contrôle de la fertilité et le niveau de soins par habitant.

Enfin, le secteur de l'emploi joue un rôle moins central que les deux autres. Il ne permet pas de capturer avec précision les dynamiques de l'emploi et du chômage à l'échelle mondiale, mais vise principalement à modéliser de manière simplifiée les variations de l'emploi. Cette approche permet d'éviter des valeurs irréalistes pour la production industrielle et la production de services lorsque la population diminue plus rapidement que le capital.

Comme l'indique *Dynamics of Growth in a Finite World* : "The main effect of the sector is to avoid unrealistically high values of SOPC and IOPC during those runs in which population declines more rapidly than capital." (Meadows *et al.*, 1974)

2.1.2.3 Agriculture

La production agricole, qu'elle soit d'origine animale ou végétale, est exprimée en kilogramme équivalent végétal afin d'en permettre une lecture homogène. Pour cela, un ratio est appliqué : 1 kg de production animale est considéré comme équivalent à 7 kg de production végétale (Meadows *et al.*, 1974).

Ce secteur joue un rôle fondamental dans la modélisation de la quantité et de la qualité des sols agricoles, ainsi que de la production alimentaire pour l'humanité. Pour cela, il est structuré en trois sous-secteurs :

La productivité agricole : Elle modélise les rendements agricoles, et est fortement influencée par les indices de pollution du modèle et impacte directement la production alimentaire.

Le secteur des terres agricoles : Il prend en compte la qualité des sols à travers la modélisation de leur fertilité, ainsi que la quantité de terres arables disponibles, en intégrant des facteurs tels que l'érosion et l'urbanisation.

La production alimentaire : Elle résulte de l'interaction de plusieurs facteurs, parmi lesquels la consommation de la population, la disponibilité des terres arables, les rendements agricoles, la productivité du secteur et le développement de nouvelles surfaces cultivables. Elle constitue la principale variable de sortie du secteur agricole et exerce une influence directe sur l'espérance de vie. En ce sens, elle reflète de manière systémique des phénomènes critiques comme les famines ou les pénuries alimentaires.

2.1.2.4 Ressources Non Renouvelables

Le secteur des ressources non renouvelables regroupe l'ensemble des matériaux exploités par l'industrie et qui ne sont pas régénérables à l'échelle du modèle. Ce secteur inclut aussi bien le pétrole que des matériaux comme le cuivre, qui possèdent des unités de mesure différentes. Afin d'homogénéiser les comparaisons, ces ressources sont exprimées en fonction d'un multiple de l'usage par rapport à une année de base.

2.1.2.5 Pollution

Le secteur de la pollution prend en compte la pollution persistante, c'est-à-dire les polluants dont la durée de vie dépasse l'horizon temporel du modèle. En raison de cette définition, les particules fines ne sont pas intégrées dans cette variable.

La pollution dans *World3* est exclusivement générée par l'industrie et l'agriculture. Ses effets se manifestent principalement à travers la dégradation de la qualité des sols et son impact sur l'espérance de vie humaine.

2.2 Intégration du critère social dans le modèle *World3* : approches et faisabilité

Afin d'intégrer les dynamiques sociales dans *World3*, plusieurs solutions ont été explorées. Trois approches principales ont été envisagées : l'intégration de nouveaux indicateurs, la segmentation du modèle démographique et le développement d'un modèle socio-démographique distinct. Les trois solutions sont décrites dans cette section.

2.2.1 Intégration de nouveaux indicateurs

La première approche consiste à intégrer des indicateurs sociaux (comme l'indice de Gini, l'éducation ou la répartition des richesses) dans *World3* sans en modifier la structure. Elle est simple à mettre en œuvre et s'appuie sur des données généralement disponibles.

Cependant, cette solution reste limitée : les indicateurs ajoutés n'interagissent que peu avec la dynamique du modèle, ce qui réduit leur impact analytique. De plus, traduire des phénomènes sociaux complexes dans un cadre essentiellement physique et démographique peut nuire à la cohérence et à la pertinence des résultats.

2.2.2 Segmentation du modèle démographique

La seconde approche consiste à conserver l'architecture actuelle de *World3* tout en segmentant chaque tranche d'âge selon des classes socio-économiques. Cela permet d'intégrer une dimension sociale directement dans la dynamique démographique du modèle.

Elle présente l'avantage de préserver les comportements démographiques validés de *World3* tout en introduisant une véritable structure sociale, au-delà de simples indicateurs. Toutefois, cette méthode soulève des difficultés : elle requiert des données croisées rares (âge et statut socio-économique) et augmente fortement la complexité du modèle, pouvant aller jusqu'à 12 stocks (trois niveaux sociaux appliqués aux quatre classes d'âge). Cette surcharge complique l'analyse et peut nuire à la lisibilité des résultats.

2.2.3 Développement d'un modèle socio-démographique distinct

La troisième approche propose de remplacer la structure démographique par tranches d'âge de *World3* par une segmentation en classes socio-économiques. Cela implique de reconstruire entièrement le modèle autour des dynamiques sociales plutôt que démographiques.

Cette option présente plusieurs avantages : une représentation plus fidèle des inégalités, une plus grande flexibilité de modélisation, et une collecte de données simplifiée. Toutefois, elle comporte aussi des limites importantes. Supprimer les tranches d'âge exclut des dynamiques essentielles comme le vieillissement, remettant en cause la cohérence avec la structure initiale de *World3*. Par ailleurs, développer un modèle entièrement nouveau représente un défi méthodologique complexe, notamment en termes de calibration.

Enfin, le risque d'erreurs systémiques est accru : toute divergence par rapport au modèle de référence peut se propager aux autres secteurs (pollution, agriculture, ressources, capital), rendant l'ensemble instable en raison de la sensibilité du système aux paramètres.

2.2.4 Choix d'une approche de modélisation

Le choix s'oriente vers un modèle socio-démographique distinct, plus adapté à la représentation des inégalités sociales, offrant flexibilité et meilleur accès aux données. L'analyse comparative plus exhaustive des options (disponible à l'Annexe III) justifie ce choix de manière objective. Cette approche nécessite une méthodologie rigoureuse pour assurer la transition depuis le modèle initial, en conciliant représentativité, fiabilité des indicateurs et robustesse des dynamiques. Une attention particulière est portée à l'ajustement des paramètres et à la validation du modèle. La méthodologie détaillée figure dans la section suivante.

2.2.5 Méthodologie de développement d'un modèle socio-économique distinct

La section suivante détaille la méthodologie adoptée pour développer un modèle socio-économique distinct. Elle expose l'approche progressive et modulaire permettant de concilier rigueur, fiabilité des indicateurs et robustesse des dynamiques.

2.2.5.1 Implémentation modulaire et «step-by-step-modeling»

L'approche adoptée consiste à structurer la conception du modèle en étapes successives, chacune répondant à un objectif précis. Chaque composant est d'abord développé et testé de manière indépendante, puis intégré progressivement dans le système global. Cette méthodologie favorise une validation par étapes, limitant les perturbations et assurant une transition fluide entre les phases.

Elle présente plusieurs avantages : une décomposition claire des objectifs, une validation rigoureuse à chaque niveau, et une introduction progressive des dynamiques qui renforce la cohérence du modèle tout au long du développement. Toutefois, la nature non linéaire des systèmes dynamiques exige une attention particulière. Un élément, même validé isolément, peut générer des effets inattendus une fois intégré. Il est donc essentiel de tester chaque ajout à différentes échelles et d'ajuster les paramètres pour garantir la stabilité de l'ensemble.

2.2.5.2 Validation d'un nouveau modèle

Dans le cadre de cette démarche progressive, plusieurs modèles sont implémentés, testés et validés afin de garantir leur cohérence avec les dynamiques du modèle *World3*. La validation s'appuie sur un ensemble de critères, à la fois qualitatifs et quantitatifs, visant à encadrer les écarts tout en conservant la logique systémique du modèle d'origine.

- **Reproduction des tendances globales**

Le modèle modifié doit conserver les grandes dynamiques du modèle initial : croissance, stabilisation ou effondrement. Il ne s'agit pas de reproduire chaque valeur, mais de respecter les trajectoires systémiques majeures de *World3*.

- **Limitation des écarts quantitatifs**

Les variables clés (population, natalité, mortalité, alimentation, production industrielle, ressources naturelles, pollution) doivent rester dans une marge de $\pm 20\%$ par rapport au modèle original, sur trois points de référence : la *valeur maximale*, la *valeur minimale* et la *valeur finale en 2100*. Ce critère garantit des ordres de grandeur cohérents tout en autorisant une certaine flexibilité.

- **Stabilité des comportements**

Le modèle ne doit pas produire de divergences majeures (explosions ou effondrements non maîtrisés) qui n'existent pas dans *World3*, sauf si elles sont explicitement justifiées par les nouvelles dynamiques introduites.

- **Robustesse sur l'ensemble des scénarios**

Chaque version modifiée doit être testée sur les 10 scénarios proposés par le modèle original. Cette validation multi-scénarios permet d'assurer la robustesse et la stabilité du modèle, quelle que soit la configuration choisie.

Cette méthodologie permet une validation progressive à chaque étape du développement, en conciliant rigueur scientifique et adaptabilité. Elle vise à préserver l'intégrité structurelle de *World3* tout en ouvrant la voie à des évolutions plus complexes du modèle.

2.2.5.3 Décomposition de l'objectif principal

Dans cette perspective, l'objectif principal de ce travail est de modéliser les dynamiques sociales au sein de *World3* et d'en analyser les impacts systémiques. Pour structurer cette démarche, deux grands sous-objectifs sont définis, chacun correspondant à une étape clé du développement.

- **Intégration sociale dans le secteur démographique**

Le premier sous-objectif consiste à adapter le secteur démographique de *World3* en introduisant une segmentation de la population selon des critères socio-économiques pertinents. Cette transformation vise à faire apparaître les inégalités sociales au cœur même de la structure démographique, sans altérer les dynamiques globales du modèle. La population n'est plus représentée de manière homogène, mais répartie en sous-groupes différenciés, ce qui permet d'enrichir l'analyse tout en maintenant une certaine continuité avec la logique de *World3*.

- **Modélisation des effets des inégalités sur les autres secteurs**

Le second sous-objectif vise à quantifier l'influence des inégalités sociales sur les autres secteurs du modèle, notamment à travers la consommation différenciée et ses effets systémiques. La structure sociale ainsi définie permet d'introduire des nouvelles interactions dynamiques spécifique à la nouvelle structure socio-démographique. L'objectif est de formaliser ces influences sous une forme mathématique cohérente avec l'architecture de *World3*.

Ces deux sous-objectifs sont développés selon une méthodologie incrémentale de type *step-by-step modeling*, permettant une validation progressive à chaque étape du processus.

2.3 Développement du modèle démographique social

L'objectif de cette section consiste à répondre au premier sous-objectif ci-haut mentionné en complexifiant progressivement le modèle. L'approche retenue consiste à introduire les

dynamiques sociales par étapes, en partant d'une représentation simplifiée avant d'intégrer des interactions plus complexes.

2.3.1 Étude détaillée du secteur de la population

Afin de pouvoir comprendre les modifications qui seront apportées au modèle, il est essentiel de bien saisir le fonctionnement du secteur de la population. Celui-ci fait donc l'objet d'une analyse détaillée dans cette partie.

La modélisation de la population repose principalement sur deux paramètres : la fertilité et la mortalité, qui représentent respectivement les flux entrants et sortants du stock de population. Ces deux facteurs interagissent à travers des boucles de rétroaction, positives ou négatives, influençant la dynamique démographique. Cette interaction est illustrée à la figure 2.3.

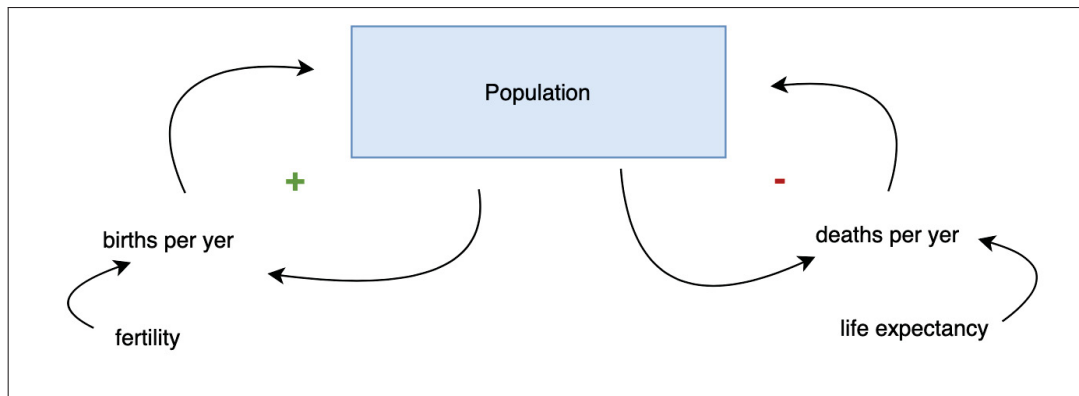


Figure 2.3 Schéma simplifié des boucles de rétroaction liées à la dynamique démographique

2.3.1.1 Fertilité

La fertilité dans *World3* est modélisée à partir d'un ensemble complexe de plus de 30 variables, dont le fonctionnement détaillé est présenté en annexe II. Trois grands facteurs principaux influencent son évolution :

- **Le contrôle des naissances**

Il dépend de l'accès aux services de planification familiale, lui-même conditionné par le niveau économique et la disponibilité des infrastructures. Cet accès agit sur la baisse de la fertilité, avec un certain délai d'adaptation.

- **Les normes sociales**

Elles déterminent le nombre d'enfants désiré par famille et évoluent en fonction de l'espérance de vie perçue, des conditions économiques et de la stabilité des structures sociales. C'est le paramètre le plus influent.

- **La fertilité maximale**

Elle représente une limite biologique modulée par le contexte. En situation de forte mortalité, la natalité peut augmenter par anticipation d'une espérance de vie réduite. Inversement, elle tend à diminuer lorsque les conditions de vie s'améliorent.

2.3.1.2 Espérance de vie

Dans *World3*, l'espérance de vie est une variable dynamique influencée par plusieurs facteurs interconnectés. Elle affecte directement la mortalité et, par conséquent, l'évolution démographique globale du modèle. Son fonctionnement détaillé est présenté en annexe II.

Les principaux déterminants de l'espérance de vie sont les suivants :

- **Les services de santé effectifs par habitant**

Leur efficacité dépend du PIB par habitant et des infrastructures médicales disponibles. Leur impact positif sur la longévité se manifeste avec un certain délai, le temps que les investissements produisent des effets tangibles sur la santé publique.

- **La disponibilité alimentaire**

Le modèle compare la quantité de nourriture disponible par habitant à un seuil de subsistance. Une insuffisance alimentaire persistante entraîne une augmentation progressive de la mortalité, soulignant le lien direct entre sécurité alimentaire et longévité.

- **La pollution**

Modélisée via un multiplicateur de mortalité, la pollution agit comme un facteur aggravant des pathologies chroniques et respiratoires. Plus elle est élevée, plus son impact négatif sur l'espérance de vie est marqué.

- **La densité de population**

Un effet de surpeuplement est également pris en compte, reflétant les dégradations des conditions de vie dans les zones densément peuplées. Cela inclut la pression sur les infrastructures et l'augmentation des risques sanitaires.

2.3.1.3 Fonctionnement du secteur démographique

Le secteur démographique de *World3* peut être analysé selon deux approches. Une lecture en *boîte noire* consiste à ne considérer que les variables d'entrée et de sortie : la fertilité et l'espérance de vie influencent la population totale ainsi que la force de travail (voir figure 2.4). Cette représentation masque cependant la complexité interne du modèle.

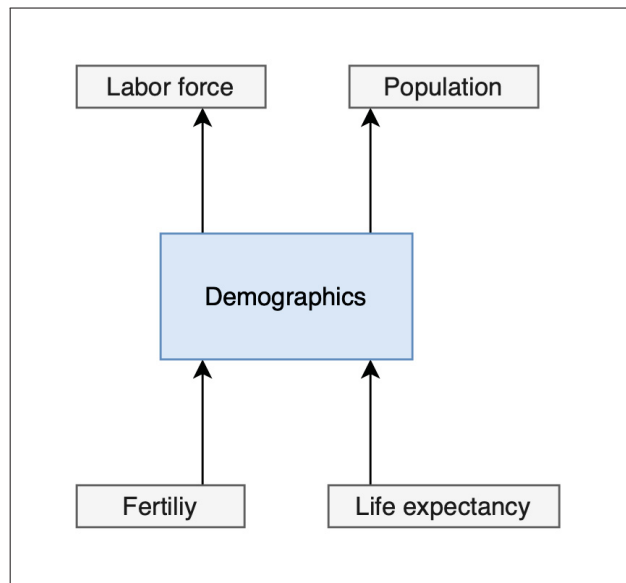


Figure 2.4 Représentation boîte noire du secteur démographique

L'approche *boîte blanche*, en revanche, met en évidence une structure interne détaillée, composée de plus de 35 variables, stocks, flux et paramètres interconnectés. Ainsi, dans une approche en *boîte blanche*, le modèle segmente la population en quatre tranches d'âge : 0–14 ans, 15–44 ans, 45–64 ans et 65 ans et plus. Chaque groupe est associé à une courbe de mortalité spécifique, dépendante de l'espérance de vie. Ces relations sont établies à partir de tables de mortalité présentées dans *Dynamics of Growth in a Finite World*, permettant de représenter des niveaux de mortalité différenciés : élevés chez les nouveau-nés et les personnes âgées, plus faibles chez les adultes. La figure 2.5 illustre les taux de mortalité appliqués à chaque groupe en fonction de l'espérance de vie.

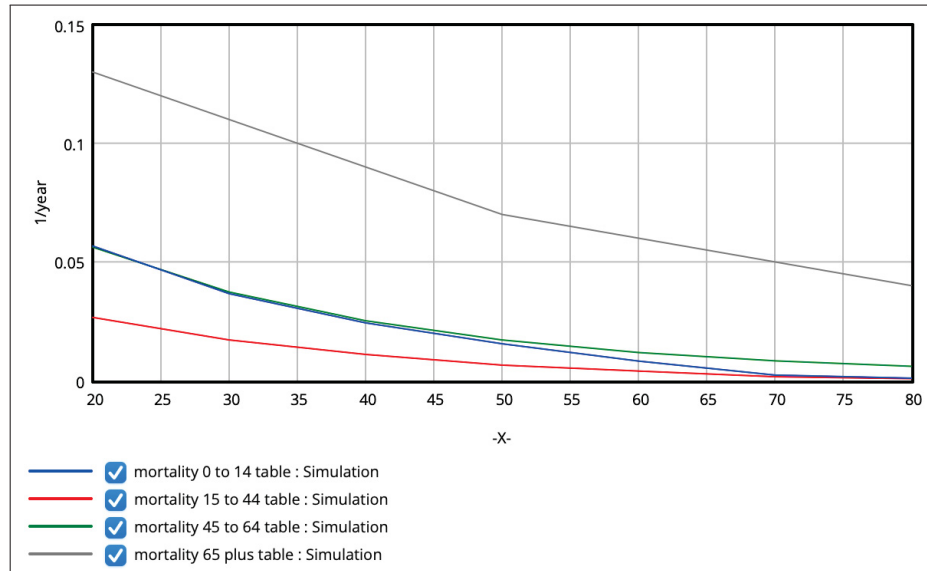


Figure 2.5 Mortalité par groupe d'âge en fonction de l'espérance de vie : 0–14 ans (bleu), 15–44 ans (rouge), 45–64 ans (vert), 65 ans et plus (gris).

La natalité est modélisée de manière plus simple. Elle dépend du nombre moyen d'enfants par femme, de la population en âge de procréer (15–44 ans), de la proportion de femmes, ainsi que de la durée de vie reproductive, selon la formule suivante :

$$Births = \frac{Total\ fertility \cdot Population_{15-44} \cdot w}{Reproductive\ lifetime} \quad (2.1)$$

- *total fertility* : nombre moyen d'enfants par femme ;
- *Population₁₅₋₄₄* : population âgée de 15 à 44 ans ;
- *w* : proportion de femmes (0,5) ;
- *reproductive lifetime* : durée de vie reproductive (30 ans).

Le diagramme de la figure 2.6 présente la structure complète du secteur démographique dans *World3*, fondée sur les flux de natalité, de mortalité et de maturation.

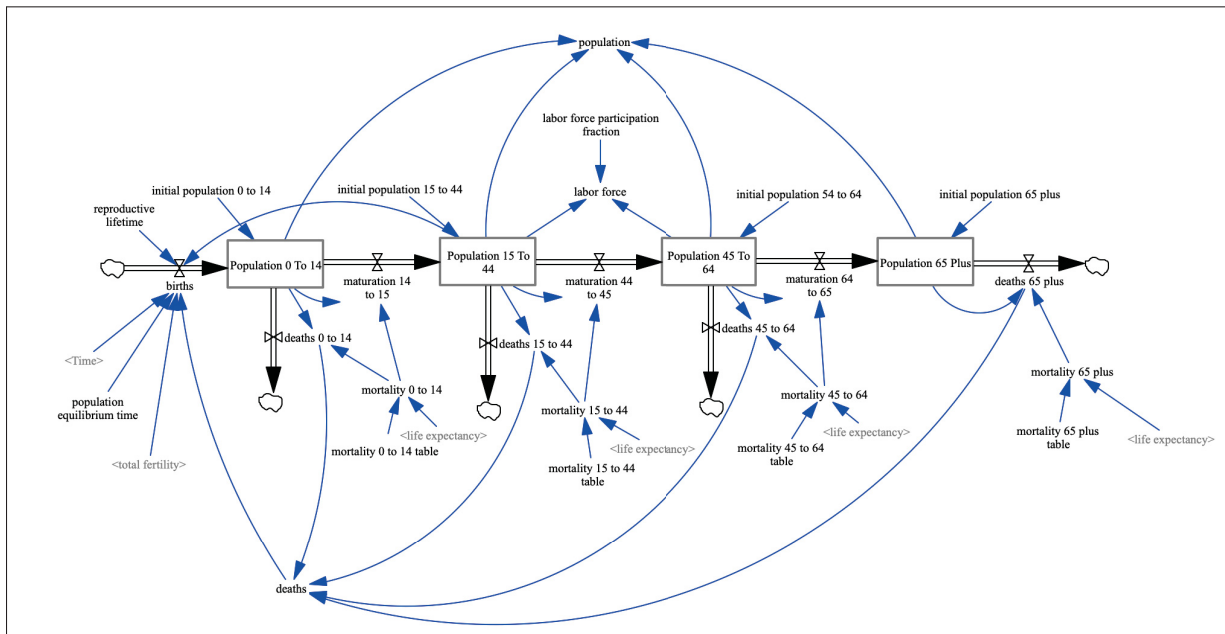


Figure 2.6 Diagramme de flux et de stock du secteur démographique de *World3*

La maturation correspond au passage des individus d'une tranche d'âge à la suivante, selon le vieillissement naturel de la population. Elle est calculée à partir de la population survivante dans chaque tranche, divisée par sa durée :

$$\text{Maturation} = \frac{\text{Population de la tranche d'âge} - \text{Décès}}{\text{Durée de la tranche d'âge}} \quad (2.2)$$

La force de travail est, quant à elle, estimée à 75 % de la population âgée de 15 à 64 ans, selon un coefficient constant défini dans le modèle (*labor force participation fraction*).

Cette structuration permet une modélisation dynamique et différenciée de l'évolution démographique. Les individus transitent d'un groupe à l'autre via la maturation : les enfants (0–14 ans), exposés à une mortalité infantile élevée, deviennent des adultes (15–64 ans), groupe caractérisé par une faible mortalité et une forte participation économique, avant d'entrer dans la dernière tranche (65 ans et plus), marquée par une mortalité plus élevée.

2.3.2 Modèle Simplifiée : Population représentée par un stock unique

Maintenant que le secteur de la population a été étudié avec attention, les premières modifications peuvent être introduites. Dans un premier temps, un modèle minimaliste de la population est développé à partir des variables fondamentales. La population est représentée par un seul stock, avec un flux d'entrée (natalité) et un flux de sortie (mortalité). L'équation associée à la force de travail est également étudiée dans ce cadre simplifié. Ce modèle sera appelé le modèle *World3* Socio-Adapted 1 (W3-SA-1).

2.3.2.1 Modélisation de la fécondité

Le modèle *World3* considère que la période de fécondité s'étend de 15 à 45 ans, soit une durée de 30 ans. La natalité est calculée de manière similaire à *World3*, mais avec une contrainte : la version simplifiée du modèle ne distingue pas explicitement la population fertile (15-44 ans). L'analyse des scénarios montre cependant que, quel que soit le cas étudié, la proportion de population fertile oscille entre 35 et 45 % (voir figure 2.7). Par souci de simplification, une valeur moyenne de 40 % est retenue.

L'équation de la natalité peut ainsi être implémentée sans difficulté dans un modèle ne distinguant pas les tranches d'âge, dès lors que la population en âge de procréer est estimée globalement.

2.3.2.2 Modélisation de la mortalité

Dans le modèle *World3*, la mortalité est ajustée selon quatre tranches d'âge distinctes, chacune ayant une table spécifique reliant le taux de décès à l'espérance de vie. Dans le cadre du modèle

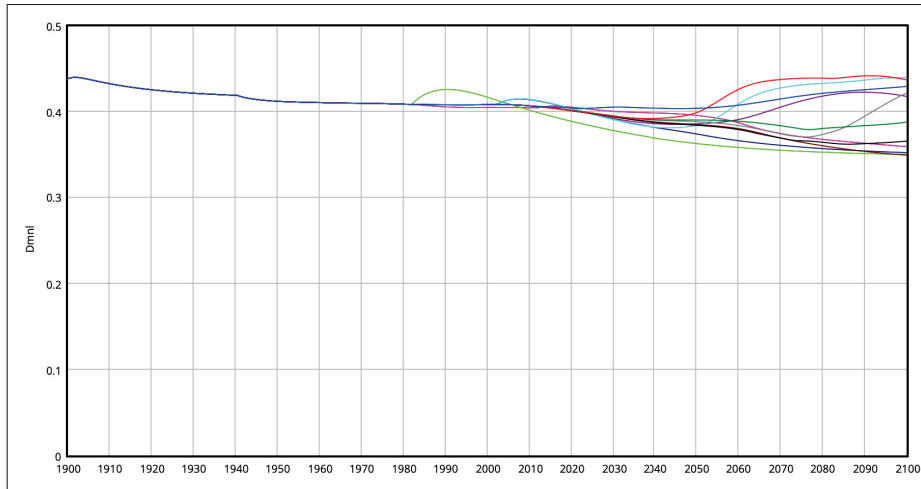


Figure 2.7 Proportion de la population en âge de procréer (15–44 ans) pour les 10 scénarios de *World3*

W3-SA-1 à un seul stock de population, il est nécessaire d’adopter une approche globale tout en conservant une cohérence avec la structure originale.

La méthode retenue consiste à moyenner les tables de mortalité de *World3* en les pondérant par la distribution initiale de la population. Cette approche permet d’intégrer, de manière approximative, l’hétérogénéité des taux de décès entre les différentes classes d’âge tout en maintenant une formulation plus simple.

La table des taux de mortalité pondérés, obtenue en appliquant cette méthode, est présentée dans la figure 2.8.

2.3.2.3 Modélisation de la force de travail

Dans *World3*, la force de travail est estimée comme la somme de la population âgée de 15 à 44 ans, à laquelle s’ajoute 75 % de la population de 45 à 65 ans. Cette approximation permet de représenter la main-d’œuvre disponible sans modéliser explicitement les taux d’activité par tranche d’âge.

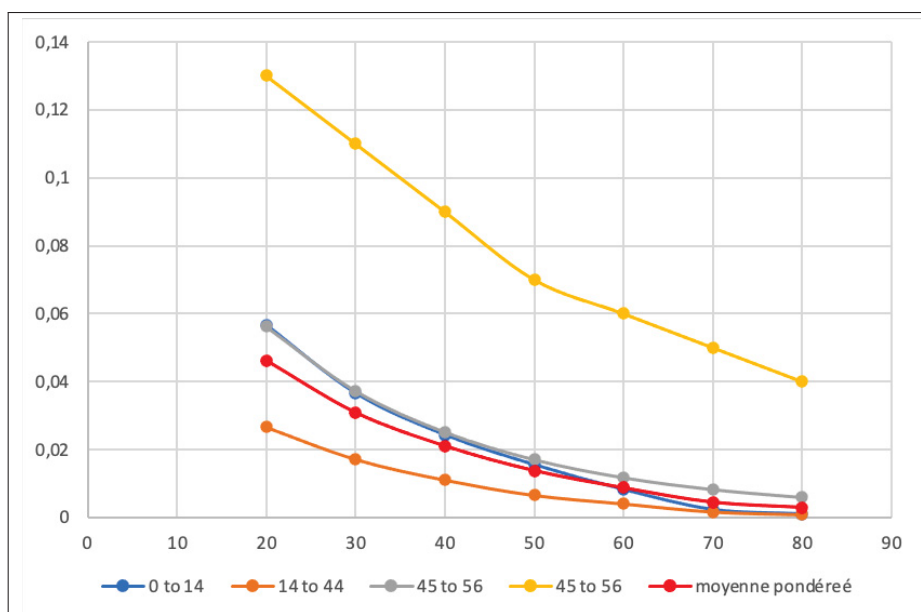


Figure 2.8 Mortalité par âge en fonction de l'espérance de vie

L'analyse des différents scénarios montre que la part de la population considérée comme active varie entre 42 % et 51 % de la population mondiale 2.9. Dans le cadre du modèle simplifié, un taux constant de 45 % sera ainsi retenu pour représenter la population active.

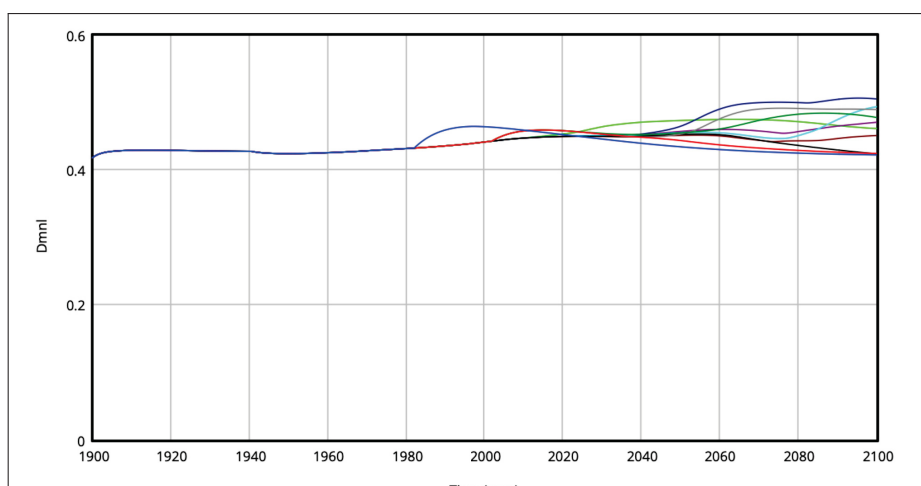


Figure 2.9 Proportion de la population active pour les 12 scénarios de *World3*

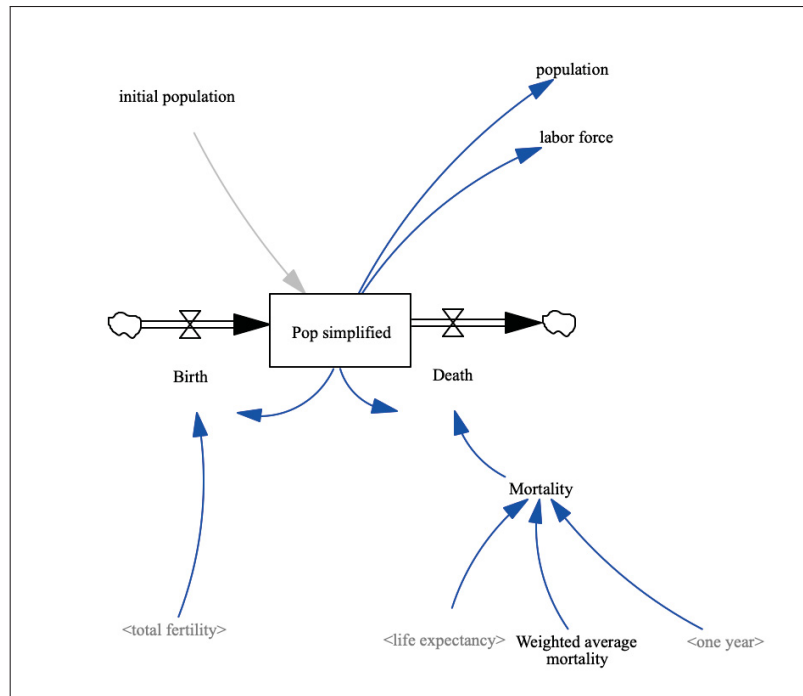


Figure 2.10 Diagramme de stock de de flux du modèle simplifié de population à stock unique

2.3.2.4 Résultats préliminaires

La structure finale du modèle W3-SA-1 repose sur un unique stock de population, avec deux sorties réinjectées dans le modèle : la population totale et la force de travail (figure 2.10). Les données initiales sont identiques à celles de *World3*, avec une population de 1,6 milliard de personnes en 1900. La mortalité et la natalité sont respectivement dépendantes de l'espérance de vie et de la fertilité.

Le modèle simplifié parvient à reproduire les dynamiques du modèle original dans certains scénarios, comme le scénario 1, où les tendances globales sont respectées. Les résultats comparés entre le modèle original et le modèle simplifié montrent des trajectoires similaires, bien qu'avec une population légèrement plus élevée. Dans ce cas, les critères de validation étant satisfaits et le modèle peut être considéré comme cohérent comme le montre les figures 2.11.

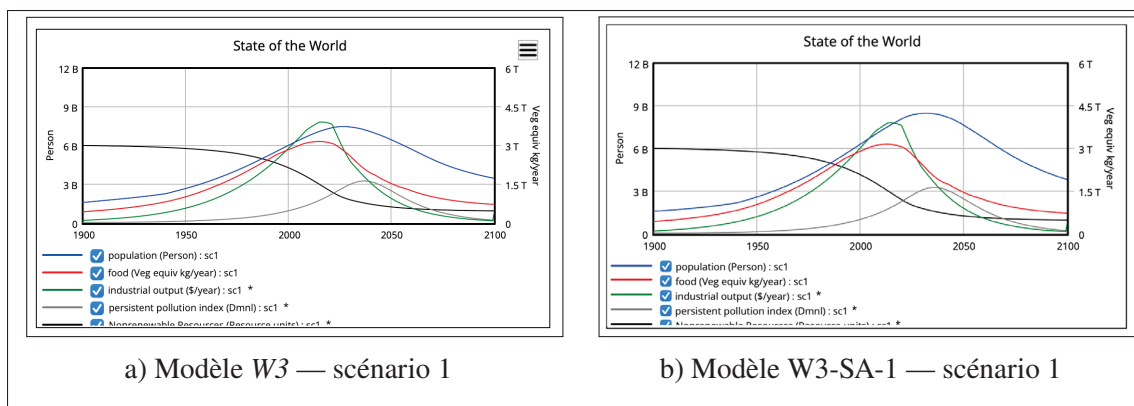


Figure 2.11 Comparaison des variables clés décrivant l'état du monde dans le scénario 1 entre W3 et W3-SA-1

Cependant, dans certains scénarios de stabilisation démographique, comme le scénario 9, des divergences apparaissent. Une analyse détaillée des taux de natalité et de mortalité met en évidence une erreur structurelle : le taux d'accroissement net de la population ne tend pas vers zéro, contrairement à ce que prévoit le modèle original. En conséquence, la population ne se stabilise pas, mais entre dans une phase de croissance excessive. Ce décalage résulte d'un écart trop important entre les taux de natalité et de mortalité dans le modèle simplifié, comme le montrent les figures 2.12c et 2.12d.

En effet, le modèle simplifié ne prend pas en compte la répartition par tranche d'âge, ce qui génère une sous-estimation de la mortalité. Dans le modèle original, l'analyse des dynamiques démographiques montre que la part des personnes âgées de 65 ans et plus augmente avec le temps (voir figure 2.13).

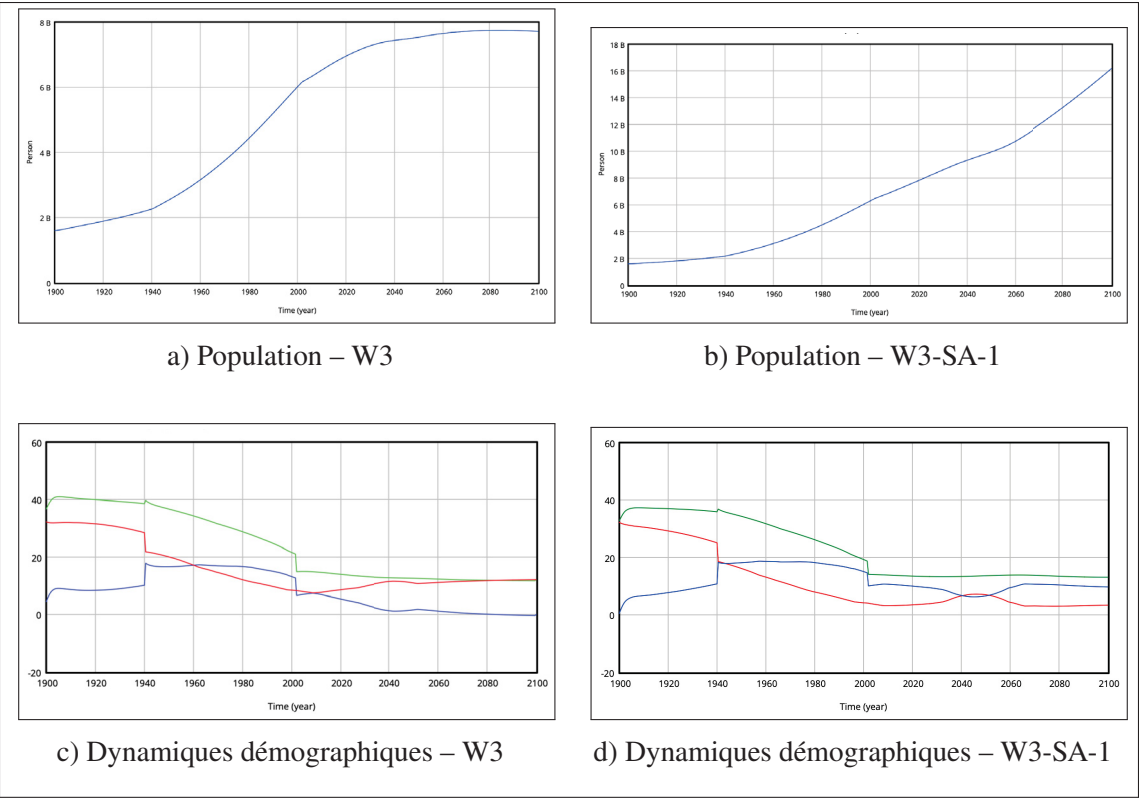


Figure 2.12 Scénario 9 – Comparaison des dynamiques démographiques entre W3 et W3-SA-1

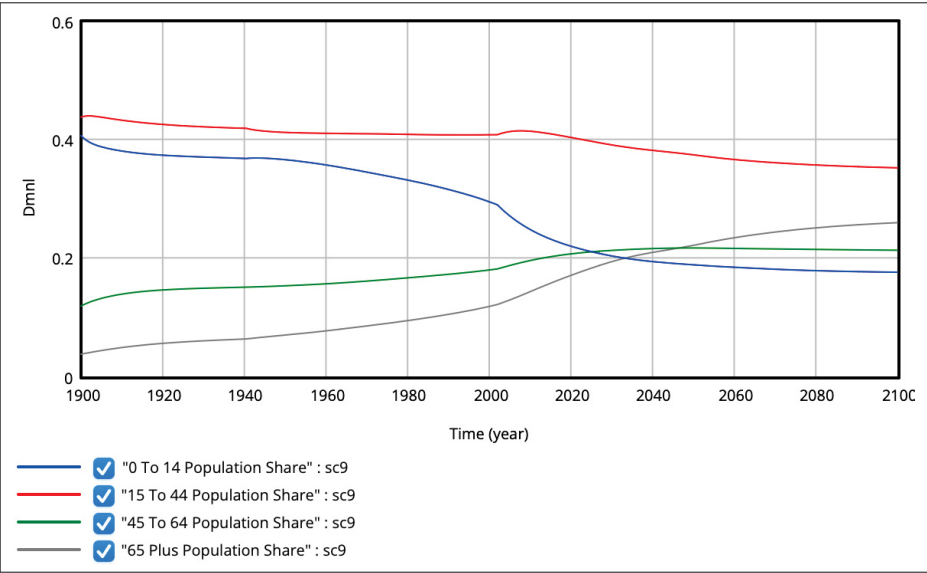


Figure 2.13 Scénario 9 - Répartition de la population selon les tranches d'âge au cours du temps - W3

Or, cette tranche de population possède le taux de mortalité le plus élevé (voir figure 2.5). Si ce facteur n'est pas pris en compte, la mortalité globale du modèle simplifié est artificiellement sous-estimée, introduisant une erreur systématique qui fausse les projections de stabilisation démographique. Afin de corriger cette erreur, un nouveau modèle simplifié sera construit, intégrant une représentation du vieillissement de la population pour mieux refléter l'évolution des taux de mortalité.

2.3.3 Modèle Simplifiée à population vieillissante

Ce modèle vise ainsi à reproduire les dynamiques du modèle précédent, tout en intégrant explicitement le vieillissement de la population. Un nouveau modèle W3-SA-2 sera ainsi mis en oeuvre.

2.3.3.1 Correction de la mortalité

Une approche pour améliorer la modélisation du vieillissement consiste à introduire une variable spécifique représentant l'âge moyen de la population. Toutefois, il est important de noter que la population ne subit pas systématiquement un vieillissement, comme c'est le cas dans le scénario 1 où l'âge moyen reste stable. Il serait donc incorrect de supposer un vieillissement constant. Une approche plus adaptée consiste à intégrer un facteur dynamique qui évolue en fonction des flux démographiques.

Une représentation simplifiée du vieillissement démographique peut être obtenue par l'introduction d'une variable d'âge moyen, ajustée dynamiquement en fonction des flux de naissances et de décès. Cette approche repose sur l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d \text{Age moyen}_{W3-SA}}{dt} = \underbrace{1}_{\text{Vieillessement naturel}} - \underbrace{\frac{\text{Naissances}}{\text{Population}} \cdot A_{\text{naissances}}}_{\text{Rajeunissement par les naissances}} - \underbrace{\frac{\text{Décès}}{\text{Population}} \cdot \text{Age moyen}}_{\text{Effet des décès sur la moyenne}} \quad (2.3)$$

L'évolution naturelle de l'âge moyen est représentée par une augmentation d'un an par an. Cette dynamique est néanmoins corrigée par deux effets :

- les naissances, qui introduisent de jeunes individus, tendent à abaisser l'âge moyen. Dans cette modélisation, les naissances étant considérées à l'âge zéro, le terme associé ($A_{\text{naissances}}$) est nul ;
- les décès, en retirant principalement des individus plus âgés, influencent également la moyenne.

Afin de valider cette approche, l'âge moyen a été calculé indépendamment dans le modèle *W3* partir de la répartition par tranches d'âge, selon la relation suivante :

$$Age\ moyen_{W3} = \sum_i \left(Age\ moyen_i \times \frac{Population_i}{Population} \right) \quad (2.4)$$

La figure 2.14 montre une bonne concordance entre l'âge moyen calculé dans *World3* et celui estimé dans *W3-SA-2*, malgré des méthodes entièrement indépendantes. L'estimation de l'âge moyen peut ainsi être considérée comme validée.

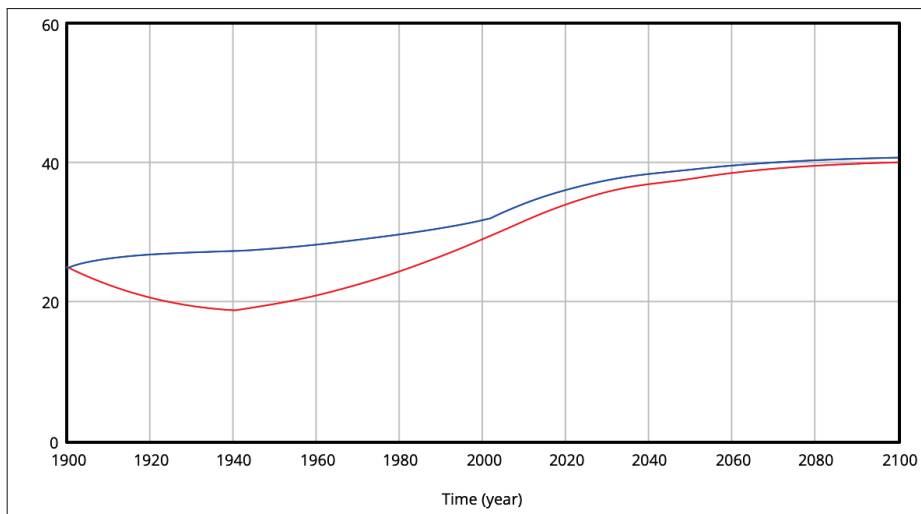


Figure 2.14 Comparaison entre l'âge moyen obtenu sur le modèle W3 (bleu) et le modèle simplifié W3-SA-2 (rouge)

À partir de cette modélisation, un coefficient correcteur peut être introduit afin d'ajuster la mortalité en fonction de l'âge moyen estimé. Cette correction permet de compenser les erreurs statiques observées dans le modèle W3-SA-1 précédent, en tenant compte du vieillissement réel de la population. La structure complète de ce nouveau modèle est présentée à la figure 2.15.

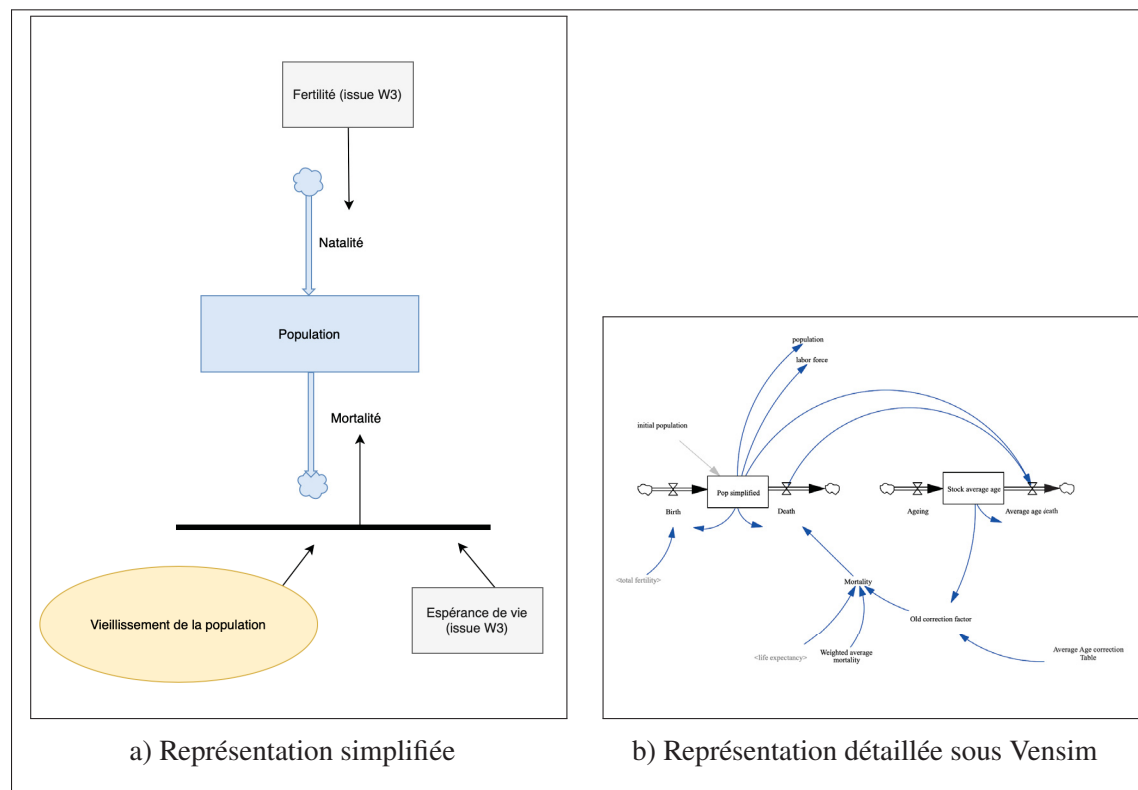


Figure 2.15 Représentation du modèle W3-SA-2

2.3.3.2 Résultats préliminaires

Cette fois-ci, les résultats obtenus sont cohérents avec les projections initiales de *World3*, et ce, quel que soit le scénario considéré. Quelques exemples illustratifs sont présentés à la figure 2.16.

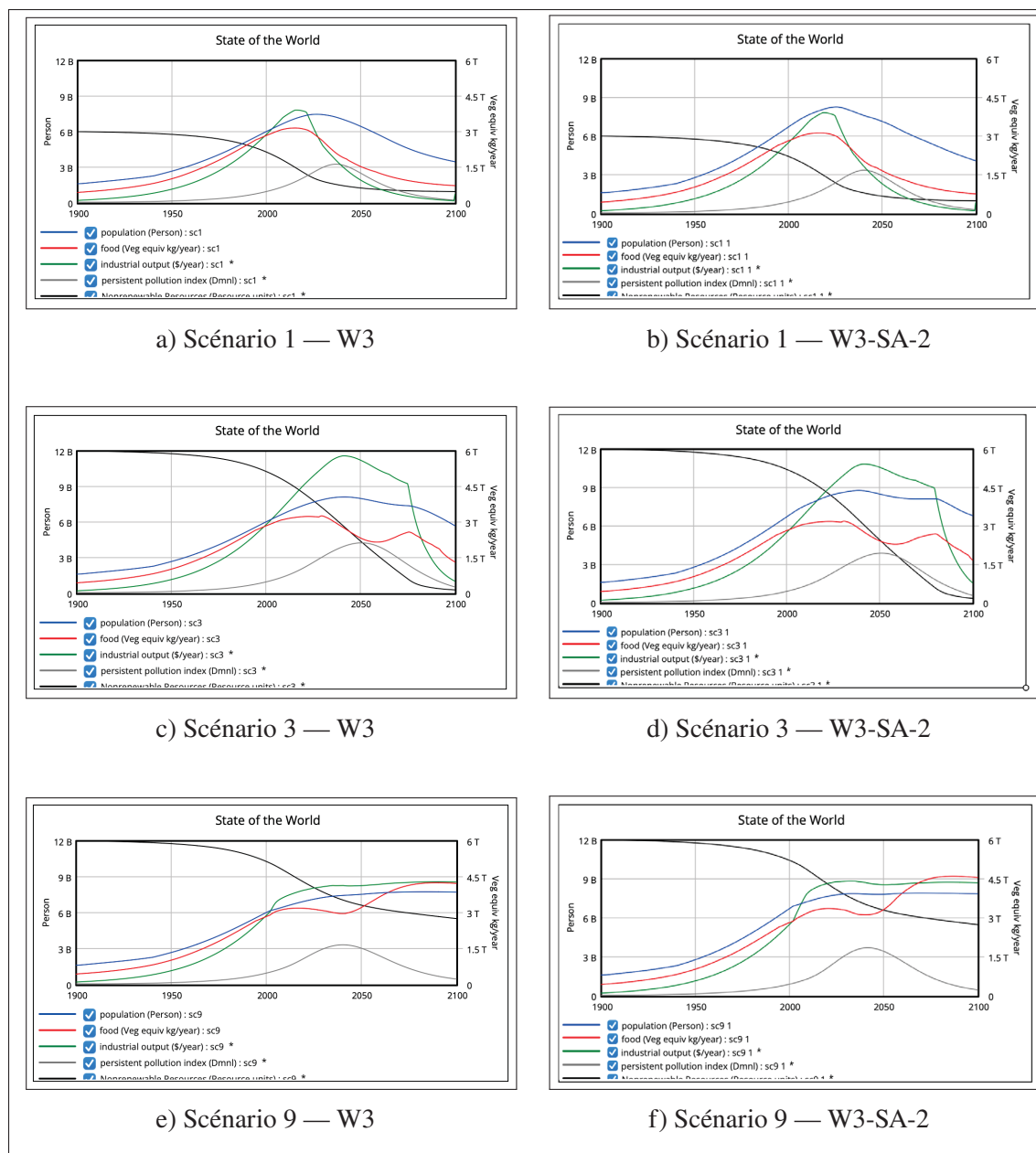


Figure 2.16 Comparaison des principales variables d'état entre les modèles W3 et W3-SA-2 (scénarios 1, 3 et 9)

2.3.4 Modèle démographique séparé par classes

Le modèle intégrant un stock unique de population a été mis en place et validé (W3-SA-1). Il a ainsi été possible de reproduire fidèlement les dynamiques de *World3* sur l'ensemble des scénarios en remplaçant la structure par âge par un facteur de correction du vieillissement de la population (W3-SA-2). L'étape suivante consiste à subdiviser ce stock unique en sous-stocks, non plus selon des critères d'âge, mais en fonction des niveaux de revenu de la population. Ce nouveau découpage constitue le modèle W3-SA-3. Une telle approche soulève une question phare : comment définir des seuils de revenu pertinents ? Cet enjeu sera précisément exploré dans la présente section.

2.3.4.1 Structuration des groupes de revenu dans *World3* : apports et limites des données en Parités de Pouvoir d'Achat (PPA)

Comme exposé dans la revue de littérature, il semble pertinent de représenter, au sein du modèle, différents groupes sociaux ayant des impacts distincts sur le système en raison de leurs niveaux de consommation.

Pour cela, les données de la plateforme *Poverty and Inequality Platform* (PIP) de la Banque mondiale seront utilisées (Banque mondiale, 2025), qui permettent d'accéder à la proportion de la population mondiale vivant sous différents seuils de revenu journalier, exprimés en dollars PPA (Parité de Pouvoir d'Achat) .

L'utilisation des PPA est particulièrement pertinente lorsqu'il s'agit d'analyser les inégalités et les niveaux de revenu, car une simple conversion par les taux de change ne permet pas d'appréhender correctement les disparités de niveau de vie. Le coût de la vie variant considérablement d'un pays à l'autre, les PPA offrent une alternative plus cohérente pour comparer les revenus à l'échelle mondiale. Elles sont calculées en fonction du prix d'un panier représentatif de plus de 3 000 biens et services, incluant la consommation des ménages, la construction, les biens d'équipement, l'éducation, la santé et les services publics (European Union, 2024). Ces enquêtes sont menées par des institutions internationales et régionales, notamment la Banque mondiale via

le Programme de Comparaison Internationale, mais aussi par des organismes comme Eurostat pour les comparaisons à l'échelle européenne.

Cependant, leur usage présente plusieurs limites, dont certaines sont mentionnées ici. Conçues avant tout pour des comparaisons spatiales, elles s'appuient sur des structures de prix et de consommation qui évoluent dans le temps, ce qui les rend moins adaptées à une analyse temporelle. Par ailleurs, elles offrent une représentation moins précise de l'économie nationale que les données issues de la comptabilité nationale et ne permettent pas d'évaluer avec exactitude la croissance économique. Enfin, leur application à des niveaux trop fins peut également conduire à des approximations, certaines catégories de biens et services n'étant pas directement comparables d'un pays à l'autre (Berger, 2015).

Dans le cadre de *World3*, c'est principalement l'utilisation des PPA sur une longue période qui soulève des interrogations. Le modèle repose sur des données remontant à 1900, or les PPA sont initialement conçues pour comparer les niveaux de vie entre pays à un instant donné, et non pour reconstituer l'évolution historique des inégalités économiques.

Malgré ces limites, l'absence de données alternatives plus fiables rend l'usage des PPA nécessaire pour structurer l'analyse des inégalités dans le modèle. Elles offrent un cadre de comparaison cohérent entre groupes de revenu et permettent d'intégrer une dimension sociale dans *World3*, à condition d'en reconnaître les approximations et les contraintes méthodologiques.

2.3.4.2 Choix des seuils de revenu pour la structuration socio-économique du modèle

Dans cette optique, le découpage de la population en groupes socio-économiques repose sur des seuils de revenus absolus, choisis de manière à refléter approximativement la répartition réelle observée autour de 2017 : les 10% les plus riches, les 50% les plus pauvres, et un groupe intermédiaire représentant les 40% restants. Ainsi, deux seuils de revenu absolus ont été retenus :

- **6,85** \$PPA2017/jour/personne ;
- **50,00** \$PPA2017/jour/personne.

L'année 2017 a été retenue comme référence, car la base *PIP* exprime tous les niveaux de revenu en \$PPA2017. Pour des raisons de lisibilité, et sauf indication contraire, tous les seuils de revenu mentionnés en dollars dans ce travail seront désormais exprimés en dollars PPA de 2017 (\$PPA2017).

D'après la *Poverty and Inequality Platform*, en 2017, environ 48,82% de la population mondiale vivaient avec moins de 6,85 \$/jour/personne, tandis que 8,22% dépassaient le seuil des 50\$/jour/personne (Banque mondiale, 2025).

Il est intéressant de noter que le seuil de 6,85 \$/jour correspond également à une valeur d'analyse centrale dans le rapport *Pathways Out of the Polycrisis* (World Bank, 2024) publié par la PIP, dans lequel plusieurs indicateurs sociaux et environnementaux sont spécifiquement analysés à ce niveau de revenu. Ce seuil pourrait ainsi faciliter une intégration future de données plus fines dans le modèle.

Enfin, d'autres seuils pourraient être explorés, notamment celui de la pauvreté extrême, fixé par la Banque mondiale à 2,15 \$PPA/jour, et qui concernait 8,96% de la population mondiale en 2022, selon les données du PIP. Toutefois, dans le cadre de cette modélisation, ce seuil s'avère moins pertinent, car les différences de consommation sont moins marquées entre les 10% les plus pauvres et les 50% les plus pauvres.

Ainsi, les deux seuils de revenu retenus (6,85 et 50 \$/jour/personne) permettent de structurer la population mondiale en trois groupes socio-économiques. Par souci de lisibilité, ces groupes seront désormais désignés par des numéros :

- **Groupe 1** : revenu inférieur à 6,85 \$/jour/personne ;
- **Groupe 2** : revenu compris entre 6,85 et 50 \$/jour/personne ;
- **Groupe 3** : revenu supérieur à 50 \$/jour/personne.

Dans la suite de ce mémoire, et pour alléger la lecture, le premier seuil sera parfois mentionné sous la forme arrondie de 7 \$/jour/personne. Il correspond en réalité à 6,85 \$/jour/personne en PPA 2017.

2.3.4.3 Structure globale du nouveau modèle démographique du mode

À partir des seuils de revenu fixés à 6,85\$ et 50\$ en parité de pouvoir d'achat, la population mondiale a été divisée en trois stocks distincts : population à bas revenu, population à revenu moyen et population à haut revenu.

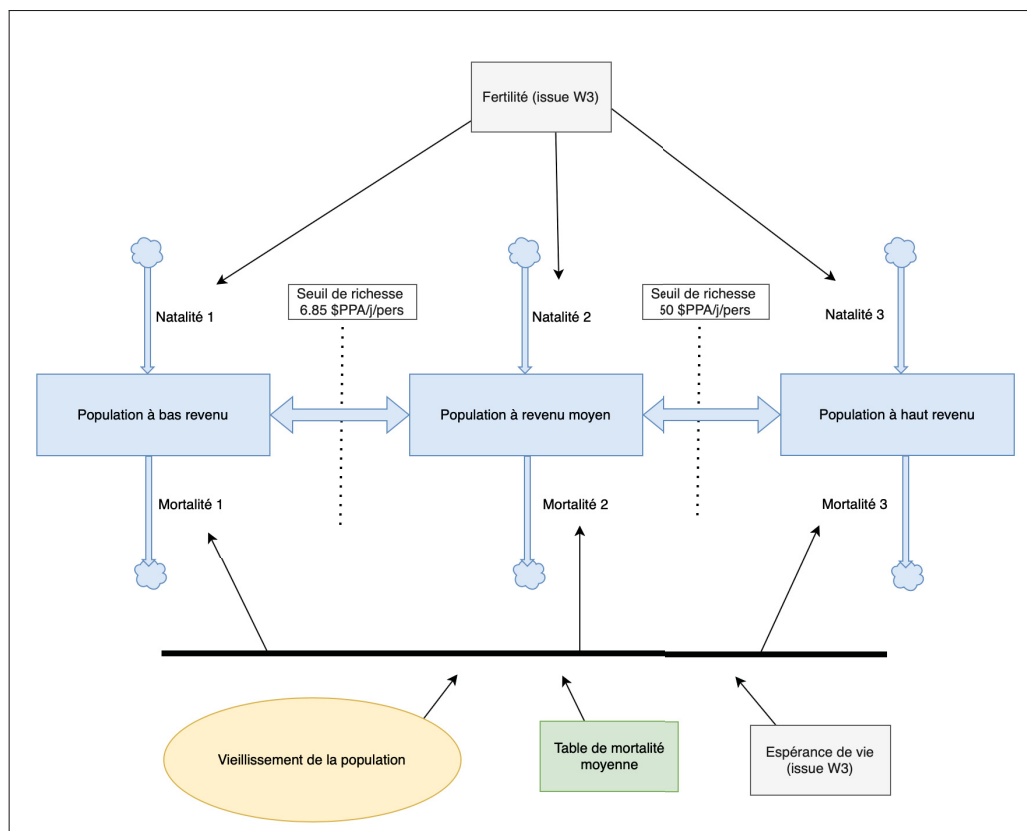


Figure 2.17 Structure simplifiée finale du modèle démographique de W3-SA-3

La structure générale du modèle est représentée de manière synthétique dans la figure 2.17. Le modèle Vensim, présenté en annexe IV, reprend les mêmes éléments avec un code couleur cohérent afin de faciliter la lecture.

Les trois stocks en bleu correspondent aux groupes sociaux définis par les seuils de revenu retenus. Les éléments en gris sont directement hérités du modèle *World3* d'origine. Enfin, le bloc jaune, introduit dans la version W3-SA-2, rend compte du vieillissement. Cette structure constitue le socle de la modélisation. Dans la section suivante, les mécanismes de transition entre groupes de revenu seront détaillés, afin de rendre compte des mobilités sociales et de construire les scénarios de projection.

2.3.4.4 Dynamiques démographiques historiques de 1900 à 2022

Le modèle dispose désormais d'une structure socialement différenciée. Il reste toutefois à gérer l'évolution quantitative de ces stocks afin de les confronter à la réalité. Pour cela, les dynamiques des trois groupes de population ont été étudiées à partir des données de la plateforme *Poverty and Inequality Database* (Banque mondiale, 2025) couvrant la période 1980–2022. Elles sont présentées dans la figure 2.18.

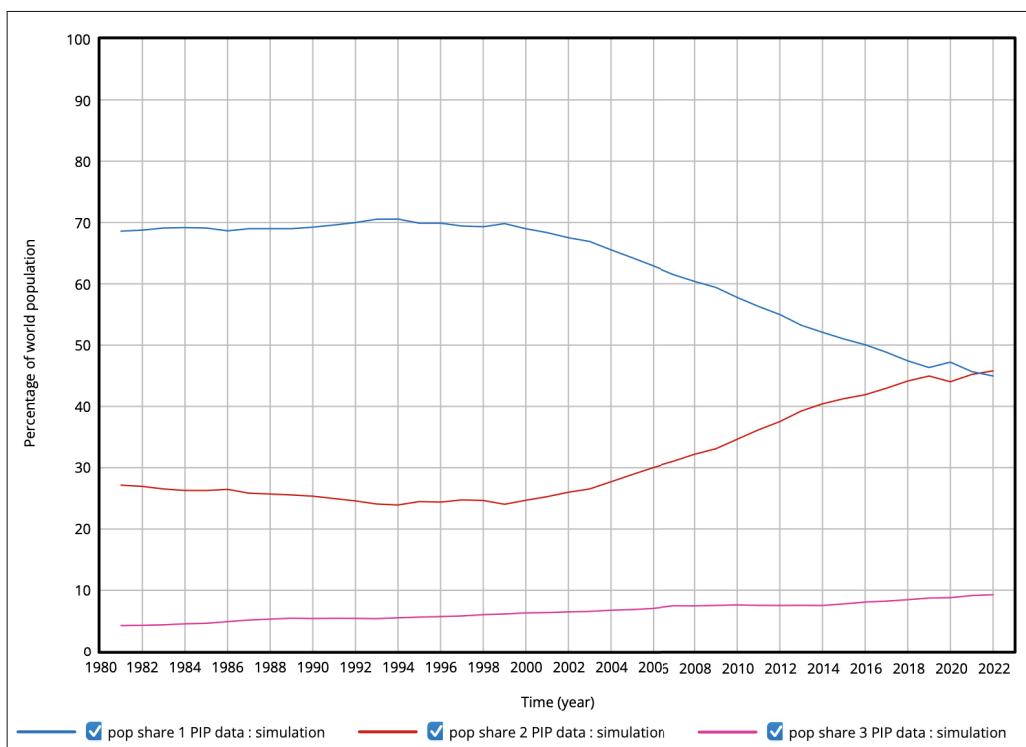


Figure 2.18 Évolution des proportions des groupes sociaux de population selon leur niveau de revenu
 en rose : population disposant de plus de 50 \$PPP/jour ;
 en rouge : entre 6,85 et 50 \$PPP/jour ;
 en bleu : moins de 6,85 \$PPP/jour

Depuis les années 1980, la distribution mondiale des revenus a profondément évolué. La part de la population vivant dans la pauvreté est passée de plus de 70 % en 1981 à environ 45 % en 2022, grâce à la croissance rapide d'économies émergentes comme la Chine et l'Inde (Zhang,

Zhang, Wan & Wu, 2020). Parallèlement, les classes moyennes se sont élargies, tandis que la population vivant avec plus de 50 \$ PPA/jour reste minoritaire et progresse lentement.

Pour représenter la période 1900–1980 sous *World3*, une répartition constante par groupes a été adoptée. Cette simplification, cohérente avec la relative stabilité observée entre 1980 et 2000 ($\pm 5\%$), reste suffisante puisque l'analyse se concentre sur la période postérieure à 2020.

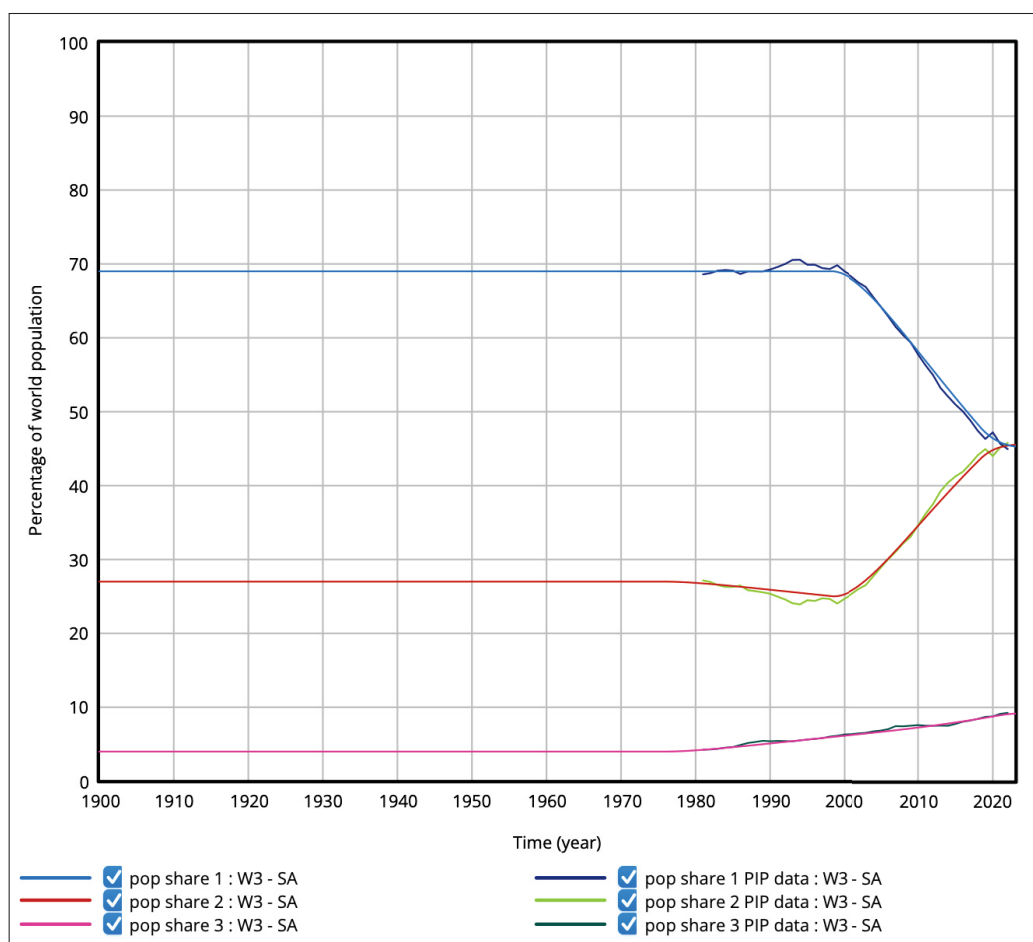


Figure 2.19 Comparaison, sur la période 1900–2023, entre la simulation du modèle et les données de la *Poverty and Inequality Platform* (2025) pour la répartition de la population mondiale entre trois groupes de revenu. En bleu et bleu foncé : population disposant de moins de 6,85 \$PPP/jour ; en rouge et vert clair : entre 6,85 et 50 \$PPP/jour ; en rose et vert foncé : plus de 50 \$PPP/jour

Le graphique 2.19 compare les résultats du modèle W3–SA–3 aux données historiques de 1900 à 2022. Les parts de population y reproduisent fidèlement les tendances observées sur la période 1970–2023, grâce à un calibrage manuel des flux entre stocks. La prochaine étape visera à formuler des hypothèses sur les trajectoires sociales après 2022.

2.3.4.5 Dynamiques démographiques historiques de 2022 à 2150 : les scénarios envisagés

La comparaison entre les résultats du modèle et les données historiques constitue un point de départ solide pour la suite de l'analyse. La question se déplace désormais vers la manière d'intégrer les dynamiques sociales futures. En théorie, celles-ci pourraient être reliées aux évolutions globales du système : une phase de croissance industrielle soutenue favoriserait les trajectoires ascendantes, tandis qu'une récession ou une crise écologique entraînerait un déclassement social.

Dans cette étude, les trajectoires sociales sont toutefois définies comme des hypothèses exogènes, sans rétroactions directes sur les flux démographiques. Ce choix vise moins à prédire l'évolution des mobilités sociales qu'à évaluer dans quelle mesure différentes structures de répartition des revenus influencent les trajectoires systémiques du modèle.

Trois scénarios majeurs ont été développés afin de traduire des hypothèses sociales contrastées. Le but est aussi que ces scénarios soient globalement parlants :

- **Structure Social 1 (SS_1) : enrichissement global de la population**

Poursuite des dynamiques actuelles : la population mondiale s'enrichit et mobilités exclusivement ascendantes (voir figure 2.20a).

- **Structure Social 2 (SS_2) : appauvrissement global de la population**

Dynamique inverse : appauvrissement progressif et mobilités exclusivement descendantes (voir figure 2.20b).

- **Structure Social 3 (SS_3) : développement de la classe moyenne**

Trajectoire intermédiaire : renforcement d'une classe moyenne et suppression des deux groupes extrêmes (voir figure 2.20c).

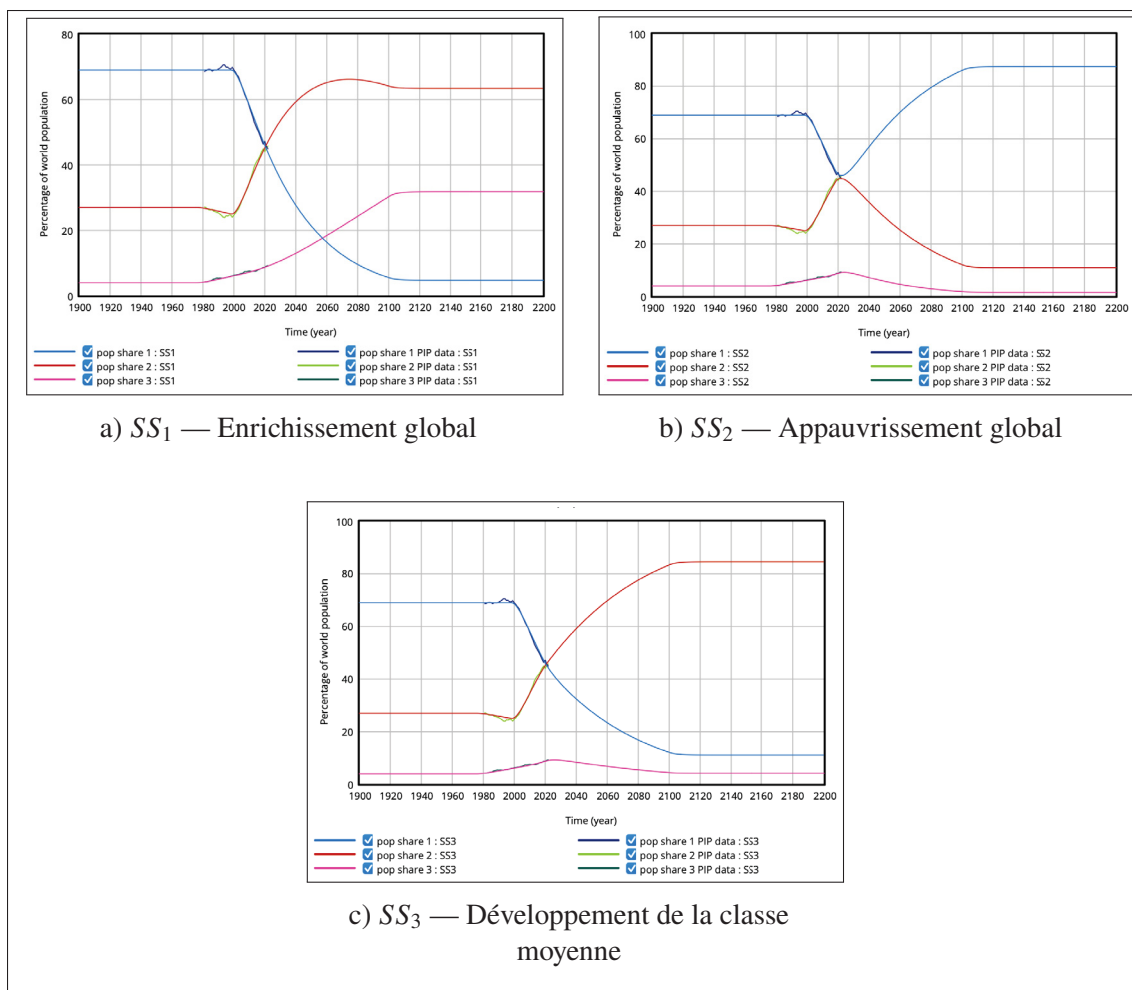


Figure 2.20 Structure sociale des scénarios $SS_{1,2,3}$
 En rose : population disposant de plus de 50 \$PPP/jour ;
 en rouge : entre 6,85 et 50 \$PPP/jour ;
 en bleu : moins de 6,85 \$PPP/jour

Ces scénarios sont considérés comme stables après 2100. Ce choix vise d'abord à simplifier la lecture des résultats en permettant de définir des valeurs stationnaires pour certains indicateurs, puisque les simulations sont prolongées au-delà de cette date. Il repose également sur une hypothèse de réalisme : un scénario où 100 % de la population deviendrait riche n'apparaît pas plausible.

2.3.4.6 Résultats préliminaires

La validité systémique du modèle a été vérifiée. Les trajectoires simulées restent alignées avec les dynamiques de *World3*, notamment les phases de croissance, de stabilisation et d'effondrement. Cette cohérence qualitative garantit la continuité avec le modèle d'origine.

Sur le plan quantitatif, les écarts relatifs aux variables clés ; démographie, alimentation, industrie, ressources, pollution, demeurent inférieurs à $\pm 20\%$ sur les trois indicateurs de référence : valeur maximale, minimale et finale en 2100. Aucune dérive excessive ou comportement instable n'a été observé.

Enfin, les 10 scénarios de *World3* ont été reproduits avec succès dans cette version sociale du modèle (W3-SA-3), assurant la robustesse des ajustements introduits. Les trajectoires projetées de la population, présentées dans deux graphiques comparatifs, illustrent cette stabilité : les tendances majeures sont systématiquement préservées, quel que soit le scénario (voir figure 2.21).

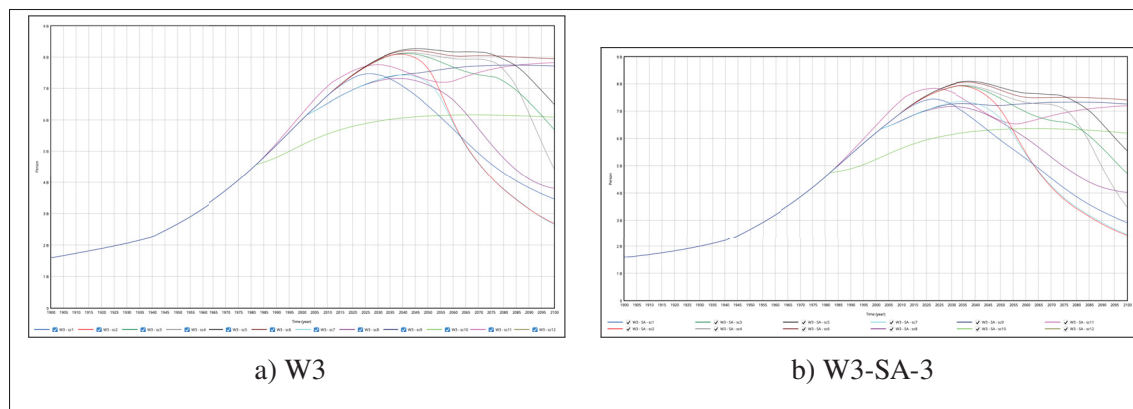


Figure 2.21 Comparaison des trajectoires de la population mondiale selon les 10 scénarios entre les modèles W3 et W3-SA-3

En synthèse, la version sociale du modèle conserve la cohérence structurelle du *World3* original tout en intégrant une segmentation socio-économique détaillée, répondant ainsi au premier sous-objectif de ce travail. Cette adaptation constitue désormais un socle robuste pour aborder la

seconde étape de la recherche, dédiée à la modélisation des effets systémiques des inégalités et à l'analyse de leurs interactions avec les autres secteurs du modèle.

2.4 Intégration des effets dynamiques de la segmentation sociale

Cette section répond au second sous-objectif du travail : évaluer l'influence des inégalités sociales sur les autres secteurs du modèle *World3*. Après avoir introduit la segmentation démographique, il s'agit désormais d'examiner comment la distribution des richesses et des niveaux de consommation modifie les dynamiques systémiques.

L'analyse débute par l'étude du secteur industriel, utilisé comme point d'entrée pour représenter les effets des richesses sur la production et l'investissement. Elle se poursuit avec l'examen de la consommation différenciée, de la création de nouveaux flux d'investissement et de la mise à jour des indicateurs de bien-être. Une synthèse méthodologique, présentée en fin de partie, en résume les principales étapes et conclusions.

2.4.1 L'Industrial Output comme indicateur des dynamiques de richesse

Pour analyser l'impact des inégalités sur les dynamiques globales, le modèle se concentre sur l'Industrial Output. Cette variable sert de point d'entrée pour relier la distribution des richesses aux effets sur la production, l'investissement et le bien-être

2.4.1.1 Pertinence de l'IO pour l'analyse des inégalités

L'Industrial Output (IO), ou production industrielle, représente le niveau matériel et technologique de vie des populations et conditionne leur capacité à produire de la nourriture et à fournir des services (Meadows *et al.*, 1974). Elle traduit à la fois le niveau global de développement matériel et la pression exercée sur le système, deux aspects étroitement liés à l'enrichissement ou à l'appauvrissement de la population.

De plus, l'IO occupe une place centrale dans l'architecture du modèle, reliant les principaux secteurs : agriculture, services, ressources, pollution et capital industriel. Toute variation de cette variable se répercute rapidement sur l'ensemble du système. Son rôle clé a d'ailleurs été confirmé par Jochaud du Plessix, dont l'analyse de sensibilité a montré que plusieurs paramètres du capital industriel, tels que ICOR, FIAOC et ALIC, figurent parmi les plus influents (Jochaud Du Plessix, 2019).

Ce positionnement central présente un intérêt méthodologique. Plutôt que d'utiliser des variables périphériques ou purement descriptives, l'IO permet de saisir directement les effets économiques et systémiques d'une variation de richesse. Ce choix s'inscrit dans les objectifs définis en introduction, qui visaient à intervenir au cœur du modèle plutôt qu'à ajouter des composantes externes sans interaction réelle avec sa dynamique interne.

Pour appuyer ce choix de manière empirique, les données de la Banque mondiale sur la valeur ajoutée manufacturière (World Bank, 2025b) et le produit intérieur brut (PIB) en \$PPP2015 (World Bank, 2025a) ont été analysées sur la période 1997–2023. La valeur ajoutée manufacturière correspond à la notion d'IO dans *World3* (Herrington, 2021), tandis que le PIB reflète la richesse et l'activité économique globales.

Le coefficient de corrélation de Pearson entre ces deux séries est de 0,996 (voir Annexe VI), ce qui indique une relation linéaire extrêmement forte. La dynamique de la production industrielle mondiale suit donc étroitement celle du PIB, ce qui justifie le recours à l'IO pour représenter l'impact économique des groupes de richesse dans le modèle. Il convient toutefois de rappeler qu'une corrélation, aussi élevée soit-elle, ne démontre pas une causalité directe, d'autres facteurs exogènes pouvant influencer simultanément ces deux variables.

2.4.1.2 Fonctionnement et interactions du secteur industriel

Dans *World3*, le secteur industriel s'articule autour de deux variables complémentaires : le capital industriel (IC) et l'output industriel (IO). Le capital industriel est modélisé comme un stock représentant l'ensemble des moyens de production (machines, usines, infrastructures).

L'output industriel est une variable dérivée de ce stock, traduisant le niveau réel de production utile. La relation est donnée par :

$$IO = \frac{IC \times (1 - f_{\text{ress}}) \times C}{ICOR} \quad (2.5)$$

où :

- IC : capital industriel [\$];
- f_{ress} : fraction du capital industriel allouée à l'obtention des ressources [$u.a.$];
- C : fraction d'utilisation de la capacité industrielle [$u.a.$];
- $ICOR$: Industrial Capital Output Ratio, quantité de capital nécessaire pour produire une unité d'output [$u.a.$].

Cette équation traduit que la production dépend du capital disponible, réduite par la part consacrée à l'extraction des ressources, puis ajustée par l'efficacité du système productif et par l'utilisation effective des capacités. L'output industriel obtenu est ensuite réparti entre différents usages : une partie est allouée à l'agriculture, une autre aux services, une troisième à la consommation finale. La fraction résiduelle constitue l'investissement industriel, qui contribue à l'accumulation du stock de capital :

$$f_{\text{inv}} = 1 - (f_{\text{agri}} + f_{\text{serv}} + f_{\text{conso}}) \quad (2.6)$$

$$I_{\text{ind}} = IO \times f_{\text{inv}} \quad (2.7)$$

où :

- f_{agri} : fraction de l'output industriel allouée à l'agriculture [$u.a.$];
- f_{serv} : fraction de l'output industriel allouée aux services [$u.a.$];
- f_{conso} : fraction de l'output industriel allouée à la consommation [$u.a.$];
- f_{inv} : fraction de l'output industriel destinée à l'investissement [$u.a.$];
- I_{ind} : investissement industriel [\$/\$an].

À ce flux d'investissement s'oppose la dépréciation du capital industriel, qui traduit son usure et son renouvellement incomplet. Elle est modélisée par :

$$D_{\text{ind}} = \frac{IC}{ALIC} \quad (2.8)$$

où :

- D_{ind} : dépréciation du capital industriel [\$/an];
- IC : capital industriel [\$];
- $ALIC$: Average Lifetime of Industrial Capital, durée de vie moyenne du capital industriel (14 ans dans la plupart des scénarios) [ans].

Ainsi, la dynamique du capital industriel résulte de la balance entre investissement (I_{ind}) et dépréciation (D_{ind}).

$$\frac{d IC(t)}{dt} = I_{\text{ind}}(t) - D_{\text{ind}}(t) \quad (2.9)$$

Enfin, une variable clé pour l'évaluation du secteur est l'Industrial Output Per Capita (IOPC), qui exprime la production industrielle rapportée à la population :

$$IOPC = \frac{IO}{POP} \quad (2.10)$$

où :

- IO : output industriel [\$];
- POP : population [pers.].

Ces dynamiques peuvent être représentées sous la forme d'un diagramme de stock et flux. La figure 2.22 illustre de manière simplifiée la structure du secteur industriel dans *World3* (l'annexe V présente la structure détaillée Vensim). On y retrouve le stock de capital industriel, alimenté par l'investissement et diminué par la dépréciation, ainsi que les principales variables qui déterminent l'output industriel et sa répartition entre agriculture, services, consommation et investissement.

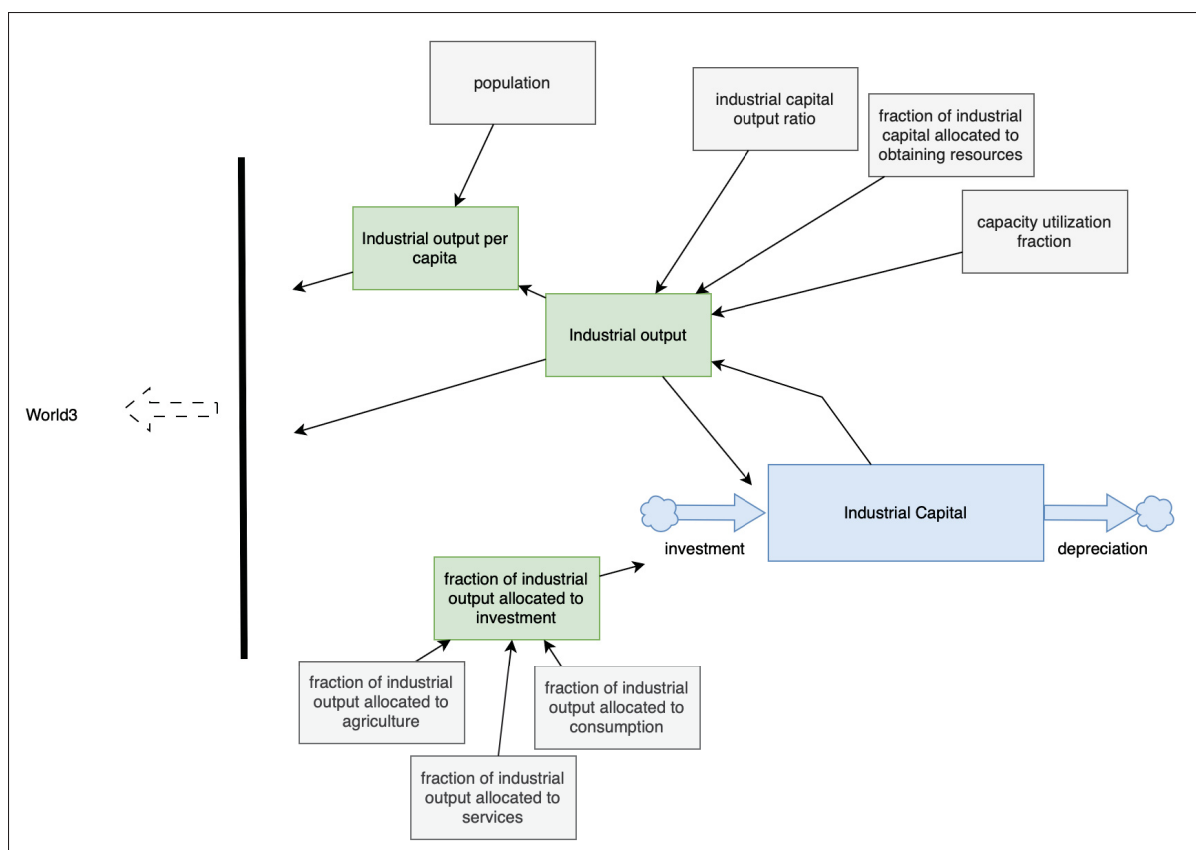


Figure 2.22 Diagramme simplifié du secteur industriel dans *World3*

Le secteur industriel est traversé par de nombreuses boucles de rétroaction, positives comme négatives, qui interagissent et se renforcent ou se limitent mutuellement. Par exemple, une boucle de renforcement apparaît lorsque l'accroissement du capital industriel élève l'IO, ce qui accroît la part investie et, par conséquent, renforce encore le capital.

2.4.2 Consommation différenciée et poids systémique des groupes de richesse

Il n'existe pas de données croisées permettant d'associer directement la consommation industrielle d'un groupe de population à partir de son revenu moyen journalier, comme c'est le cas dans le modèle développé ici. Les bases disponibles, comme celles du World Inequality Lab ou de la Banque mondiale, renseignent soit la répartition des revenus, soit celle de la consommation ou des émissions, mais sans établir de lien explicite entre un seuil absolu de revenu (par exemple

7 \$/jour ou 50 \$/jour) et un indice de consommation industrielle précis. Il est donc nécessaire de recourir à une approximation.

2.4.2.1 Un appui empirique via les émissions de carbone

Les données de 2023 du World Inequality Lab (Chancel *et al.*, 2023) constituent une base pertinente pour cette approximation. En 2019, les 10 % les plus riches de la planète étaient responsables de 48 % des émissions mondiales de CO₂, les 40 % intermédiaires de 40,4 %, et les 50 % les plus pauvres de seulement 11,5 %. Ces ordres de grandeur suggèrent des coefficients de consommation relatifs, rapportés à une consommation moyenne égale à 1 : environ $\times 4,8$ pour les plus riches, $\times 1,01$ pour les classes intermédiaires, et $\times 0,223$ pour les plus pauvres.

2.4.2.2 La justification théorique : l'équation de Kaya

Il est vrai que consommation industrielle et émissions de carbone ne se recouvrent pas parfaitement. Toutefois, leur lien peut être justifié à la fois conceptuellement et empiriquement. L'identité de Kaya (Yamaji, Matsushashi, Nagata & Kaya, 1993) formalise la relation entre population, PIB par habitant, intensité énergétique et émissions de CO₂. Elle montre qu'une hausse de la production industrielle s'accompagne mécaniquement d'une hausse des émissions, sauf progrès technique majeur. Autrement dit, les différences d'empreinte carbone entre groupes sociaux reflètent aussi des différences de consommation matérielle et d'utilisation de ressources.

2.4.2.3 Une correspondance avec les seuils absolus de revenu

Une difficulté tient au fait que les données du World Inequality Database reposent sur des fractiles relatifs (déciles, quintiles), tandis que le modèle étudié mobilise des seuils absolus de revenu. Une correspondance approximative peut néanmoins être établie. En 2020, les +50 \$/jour correspondaient grossièrement aux 10 % les plus riches, les -7 \$/jour aux 50 % les plus pauvres, et les autres aux 40 % intermédiaires. Cette approximation permet de transposer les coefficients de consommation dérivés des émissions à nos trois catégories de revenu.

2.4.2.4 Un compromis méthodologique

L'hypothèse de transposer les coefficients de consommation dérivés des émissions aux trois groupes de revenu repose sur une simplification importante : ils sont supposés constants dans le temps. En réalité, ces coefficients ont certainement varié au cours de l'histoire et continueront d'évoluer, sous l'effet des transformations économiques, sociales et technologiques.

Ce choix reste néanmoins le meilleur compromis possible compte tenu des données disponibles. Il permet d'introduire une différenciation sociale cohérente avec les inégalités observées, tout en maintenant une structure de modélisation simple et exploitable. Les écarts avec les dynamiques historiques seront corrigés par des ajustements techniques détaillés plus loin.

2.4.2.5 Bilan : coefficients de consommation industrielle

Ainsi, les coefficients de consommation différenciée associés aux trois groupes de revenu peuvent être résumés de la manière suivante :

- **Groupe 1** : coefficient de consommation industrielle $w_1 = 0,223$;
- **Groupe 2** : coefficient de consommation industrielle $w_1 = 1,01$;
- **Groupe 3** : coefficient de consommation industrielle $w_3 = 4,8$.

Ces coefficients traduisent le poids systémique différencié des groupes de richesse.

2.4.3 Application au modèle

La présente section illustre comment les coefficients de consommation des différents groupes de revenu sont intégrés dans le modèle. Elle expose la méthodologie adoptée pour relier la structure sociale à l'Industrial Pressure Index et aux dynamiques globales.

2.4.3.1 Préambule et méthodologie

La démarche de développement fondée sur le step-by-step modeling a déjà été présentée en détail dans la section consacrée à la segmentation démographique. Afin d'alléger la structure du

mémoire, déjà dense, et de préserver la clarté du propos, les différentes étapes ayant conduit à l'élaboration du modèle ne seront pas reprises de manière exhaustive. Seuls certains scénarios spécifiques seront discutés et mis en avant.

Pour éviter toute ambiguïté et limiter les répétitions, il est adopté la convention suivante. Les scénarios de référence issus de *Limits to Growth* sont notés S_X (sans mise à jour sociale). Les structures sociales développées dans ce travail sont notés SS_Y , mais ils n'apparaissent jamais seuls : dès qu'un scénario social est utilisé, il est toujours combiné avec un scénario S_X . On note alors $S_X SS_Y$, ce qui correspond au scénario X de *Limits to Growth* appliqué au modèle socio-adapté avec la structure sociale Y .

Par exemple, S_1 désigne le scénario 1 (BAU) du modèle *World3* de référence, tandis que $S_1 SS_2$ correspond à l'application de la structure sociale SS_2 dans le contexte du scénario S_1 . Autrement dit, il s'agit d'examiner ce qu'il advient si la population s'appauvrit dans un monde évoluant selon la trajectoire « Business as Usual ». Cette convention est utilisée dans l'ensemble du mémoire.

2.4.3.2 Industrial Pressure Index (IPI) : définition et interprétation

L'objectif est maintenant de quantifier l'effet de la composition sociale de la population sur la pression exercée sur le système industriel. Pour éviter les redites et conserver une ligne claire, seules les briques utiles à l'analyse sont introduites ici. Il a été vu précédemment que les coefficients de consommation différenciée sont fixés à $w_1 = 0,223$ pour le groupe 1 (revenus faibles), $w_2 = 1,01$ pour le groupe 2 (revenus intermédiaires) et $w_3 = 4,8$ pour le groupe 3 (revenus élevés). Combinés avec la répartition démographique, ils permettent de construire un indicateur synthétique mesurant la pression industrielle exercée par l'ensemble de la population mondiale. Cet indicateur, nommé *Industrial Pressure Index* (IPI), est défini comme suit :

$$IPI = \sum_{i=1}^3 \text{pop}_i \cdot w_i \quad (2.11)$$

où pop_i désigne la part relative du groupe i dans la population totale et w_i son coefficient de consommation industrielle.

L'Indice de Pression Industrielle (IPI) mesure l'effet de la structure sociale sur la pression exercée par rapport au scénario de base. Il combine les parts de population avec leurs niveaux moyens de consommation.

Concrètement :

- $IPI = 1$: la structure sociale exerce la même pression que sur le scénario de référence ;
- $IPI > 1$: il y a une surpression sur le scénario de référence (par exemple, une part plus élevée de riches augmente la pression industrielle) ;
- $IPI < 1$: il y a une sous-pression sur le scénario de référence (par exemple, une part plus élevée de pauvres réduit la pression).

Ainsi, l'indice traduit directement l'effet de la répartition sociale (davantage de riches ou de pauvres) sur la pression globale exercée sur le système. Il constitue un indicateur structurel, car il dépend uniquement de la composition de la population et non du niveau absolu d'output industriel. Pour cette raison, l'IPI est rapporté à l'IOPC plutôt qu'à l'IO total : s'il était défini relativement à l'IO, il perdrait son caractère structurel et deviendrait indépendant de la taille effective de la population, ce qu'il n'a évidemment pas de sens.

2.4.3.3 Scénarios sociaux et normalisation de l'IPI

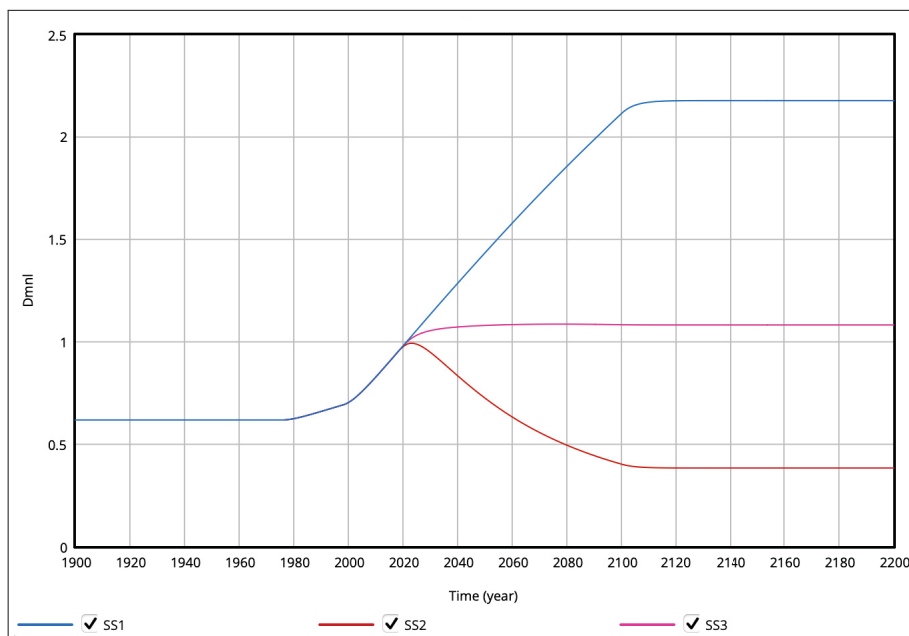


Figure 2.23 Évolution de l'indice de pression industriel (IPI) en fonction des scénarios sociaux : SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)

Les différents scénarios sociaux peuvent être simulés afin d'en mesurer l'impact sur l'IPI (voir figure 2.23).

Avant 2020, toutes les trajectoires se confondent puisque la structure sociale est calée sur les données historiques. Une incohérence apparaît toutefois : l'IPI reste inférieur à 1 entre 1900 et 2023 alors que cette période devrait constituer la référence et valoir 1.

Cette sous-évaluation s'explique d'une part par l'hypothèse d'une structure sociale stable avant 1980, qui ne reflète probablement pas les évolutions réelles, et d'autre part par le choix de fixer les coefficients de consommation industrielle constants dans le temps, ce qui tend à lisser artificiellement la pression passée.

Pour corriger cet écart, l'IPI est normalisé (IPI_n) à 1 avant 2023 (voir figure 2.24). Ce choix permet de définir le niveau historique récent (2023) comme référence. Le fait que l'indice

atteigne bien la valeur 1 en 2023 valide nos hypothèses et constitue un élément rassurant pour la cohérence de la calibration.

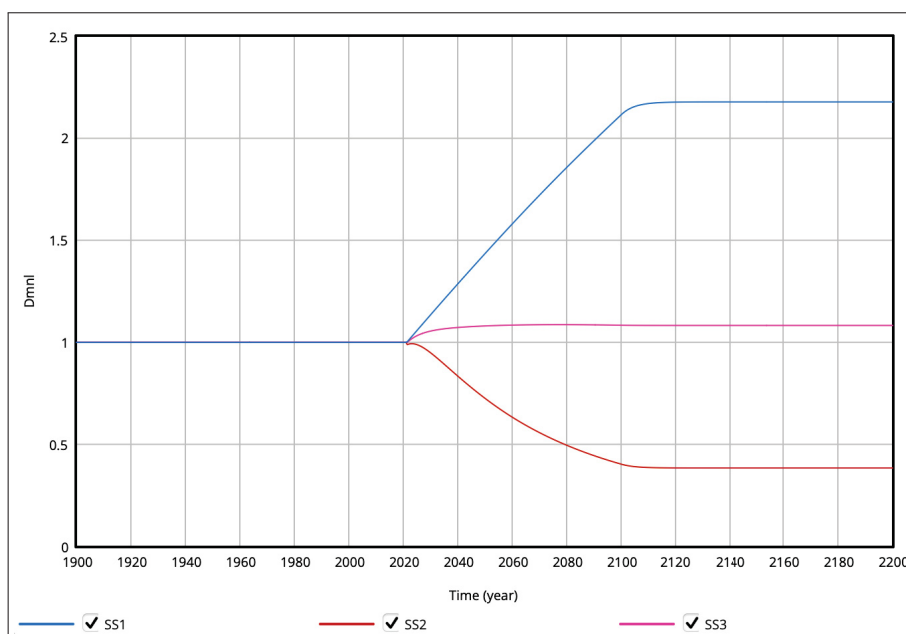


Figure 2.24 Évolution de l'indice de pression industriel normalisé (IPIn) en fonction des scénarios sociaux : SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)

Après 2020, l'IPI normalisé (IPIn) diverge selon les scénarios sociaux. Dans le cas d'enrichissement (SS_1), il croît rapidement pour dépasser 2 vers 2090, traduisant une forte intensification de la pression industrielle. En situation d'appauvrissement (SS_2), il diminue après 2030 et tombe sous 0,4 à l'horizon 2100. Enfin, dans le scénario de développement de la classe moyenne (SS_3), il se stabilise légèrement au-dessus de 1, autour de 1,08 dès 2050.

Dans la suite de ce travail, et pour alléger la lecture, l'appellation IPI renverra en réalité à l'IPIn, c'est-à-dire l'indice de pression industrielle normalisé avant 2023.

Ces trajectoires contrastées soulignent le rôle déterminant de la structure sociale dans la dynamique de la pression industrielle. La question qui se pose alors est la suivante : comment

traduire concrètement cet indice de pression dans l'architecture du modèle, de manière à ce qu'il influence directement la formation du capital industriel ?

2.4.4 Création d'un flux d'investissement industriel

La section suivante détaille la manière dont l'IPI est intégré dans le modèle. Elle présente le flux d'investissement industriel additionnel, conçu pour traduire l'effet de la pression sociale sur la dynamique du capital.

2.4.4.1 Définition du flux additionnel

Pour répondre à cette question, la solution retenue est d'introduire un flux d'investissement industriel additionnel, directement piloté par l'IPI. La justification de ce choix technique est détaillé en annexe VII. Ce nouveau flux traduit l'effet de la pression sociale sur la dynamique du capital et peut être positif ou négatif selon que la pression industrielle se situe au-dessus ou en dessous de sa valeur de référence.

Le capital industriel décrit dans l'équation 2.9, rappelée ci-dessous :

$$\frac{d IC}{dt} = I_{ind} - D_{ind},$$

devient désormais :

$$\frac{d IC}{dt} = I_{ind} - D_{ind} + I_{IPI} \quad (2.12)$$

où le terme additionnel est défini par :

$$I_{IPI} = \gamma \cdot IO \cdot (IPI - 1). \quad (2.13)$$

Dans cette relation, le paramètre γ représente un coefficient de sensibilité sans dimension qui règle l'ampleur de la réponse : une valeur élevée amplifie fortement l'effet de l'indice, tandis

qu'une valeur faible le modère. La logique de calibration de ce paramètre est détaillée en annexe VII, où il est montré qu'une valeur de $\gamma = 0.2$ s'avère la plus cohérente dans la majorité des scénarios étudiés. La variable IO joue ici le rôle de facteur d'échelle en reliant la pression sociale à la capacité de production effective. Enfin, le terme $(IPI_{\text{norm}} - 1)$ exprime l'écart de la pression industrielle par rapport à sa valeur de référence. Il induit un surcroît d'investissement lorsque $IPI > 1$, un désinvestissement lorsque $IPI < 1$, et aucun effet lorsque l'indice est à l'équilibre.

En pratique, la dynamique des investissements additionnels ne se limite pas à cette formulation de base. Dans certains scénarios combinés, elle peut provoquer des emballements ou des comportements irréalistes, tels qu'une croissance illimitée ou des désinvestissements prolongés. Pour garantir la cohérence du modèle, un mécanisme de régulation a été mis en place : les investissements additionnels sont suspendus dès que l'IOPC atteint certains seuils. La logique et les limites de ce dispositif, reposant sur des choix techniques complexes, sont détaillées en annexe VII.

2.4.4.2 Limites de la technique d'intégration

Cette approche présente toutefois certaines limites. Le flux additionnel I_{IPI} est directement ajouté à l'investissement industriel sans contrepartie explicite, ce qui introduit une rupture d'équilibre : il ne correspond pas à un arbitrage réel dans l'allocation des ressources entre consommation, investissement et autres postes. En d'autres termes, le modèle crée un apport ou un retrait de capital « à partir de rien », sans mécanisme financier ou comptable associé.

L'ampleur de ce biais n'est pas négligeable : dans les scénarios extrêmes, le flux additionnel peut atteindre jusqu'à 10 % du capital industriel, ce qui modifie sensiblement la trajectoire du système. Ce déséquilibre compromet le respect d'un bilan de ressources cohérent. Comme le souligne Ragnarsdóttir dans sa critique du modèle *Earth for All*, « any model that violates the basic principles of thermodynamics is invalid and beyond any rescue » (Ragnarsdóttir, 2024, p. 5). La question demeure donc : comment justifier ce flux d'investissement supplémentaire ?

Une interprétation possible est de lier ce flux additionnel aux dynamiques sociales sous-jacentes. Lorsque la société s'enrichit, plusieurs mécanismes peuvent justifier l'apparition d'un investissement supplémentaire :

- **capacité d'épargne accrue** : l'augmentation des revenus permet de dégager une part plus importante de ressources financières, orientées vers l'investissement productif ;
- **dynamique technologique** : les sociétés plus riches tendent à investir davantage dans l'innovation et le renouvellement du capital, ce qui stimule la croissance industrielle et renforce l'accumulation du Capital.

Dans ce cas, $I_{\text{PI}} > 0$ reflète la capacité structurelle des sociétés riches à alimenter un surcroît d'investissement industriel.

À l'inverse, dans un contexte d'appauvrissement, plusieurs mécanismes expliquent l'apparition d'un flux négatif :

- **contraction du crédit et de l'investissement** : l'incertitude et la faiblesse des revenus limitent l'accès aux financements, réduisant la capacité d'investissement des entreprises ;
- **sous-entretien et obsolescence du capital** : faute de ressources pour maintenir les infrastructures existantes, le capital industriel se déprécie plus rapidement, entraînant un désinvestissement net ;
- **conflits sociaux et instabilité** : l'appauvrissement croissant peut provoquer des tensions politiques et sociales, susceptibles de détruire du capital productif ou de freiner sa valorisation.

Dans ce cas, $I_{\text{PI}} < 0$ traduit une dynamique de désinvestissement cohérente avec le contexte social.

En définitive, cette technique reste imparfaite car elle introduit un flux qui ne repose pas sur un arbitrage comptable explicite. Néanmoins, elle constitue la seule solution trouvée pour relier les dynamiques sociales à l'investissement industriel et peut être justifiée comme un proxy d'effets socio-économiques.

2.4.5 Structure globale du nouveau secteur industriel

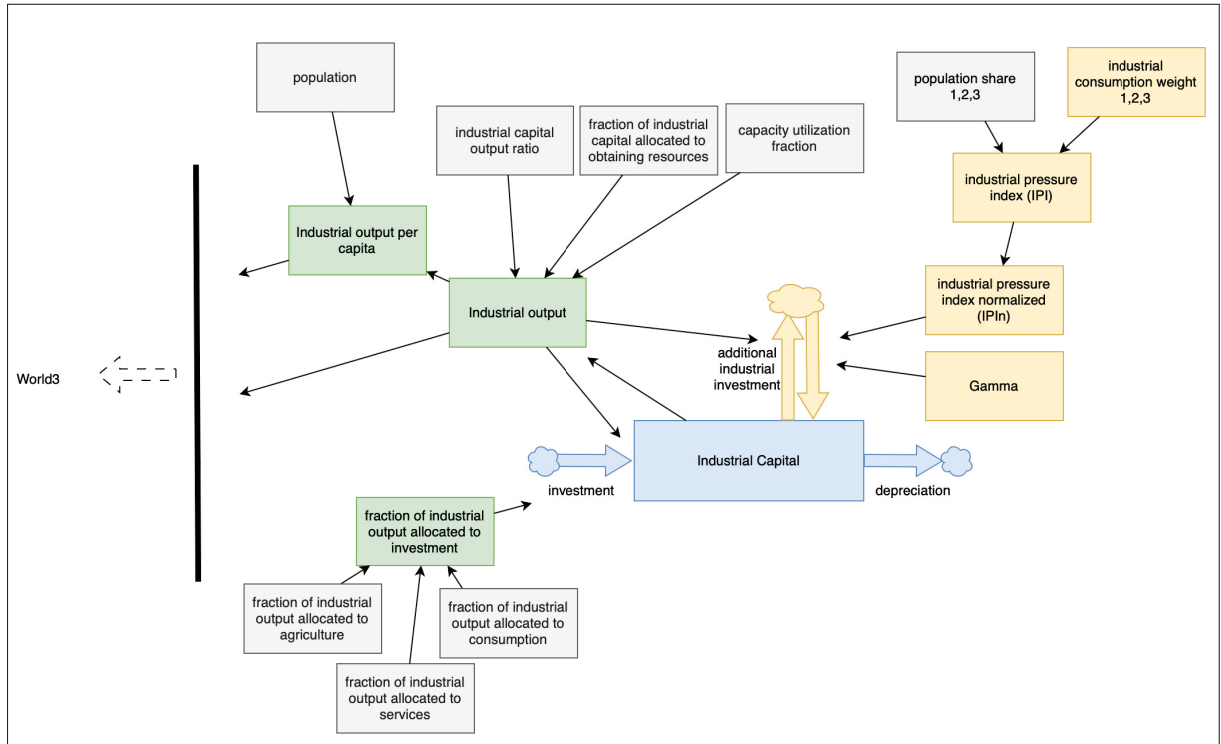


Figure 2.25 Structure globale du secteur industriel enrichi : blocs centraux issus de *World3* et blocs jaunes (IPI, IPIn, γ) introduisant la nouvelle dynamique d'investissement.

La figure 2.25 présente la structure globale du secteur industriel enrichi. La partie centrale reprend la logique issue de *World3* : le stock *Industrial Capital* est alimenté par les flux d'investissement et réduit par la dépréciation. L'investissement provient d'une fraction de l'output industriel, lui-même dépendant de plusieurs variables structurelles.

La nouveauté introduite par cette extension du modèle se situe dans les blocs représentés en jaune. Ceux-ci traduisent la dynamique additionnelle d'investissement, liée à la structure sociale de la population. L'*Industrial Pressure Index* (IPI), construit à partir des parts de population et de leurs coefficients de consommation différenciée, est d'abord normalisé (IPIn), puis combiné avec un paramètre de sensibilité γ . Ce mécanisme génère un flux *Additional Industrial Investment*,

qui vient s'ajouter au flux d'investissement classique ou, en cas de valeur négative, agir comme un désinvestissement supplémentaire.

Cette structure permet ainsi d'introduire explicitement l'influence des inégalités sociales dans la dynamique industrielle : les variations de composition sociale affectent directement l'intensité des investissements et, par conséquent, l'évolution du capital industriel.

2.5 Mise à jour de l'indice de bien être humain

Cette section présente l'indice de bien-être humain (HWI) dans *World3-3*. Dans un premier temps, sa construction et ses principales caractéristiques seront décrites, avant d'en discuter les limites et d'expliquer comment il a été redéveloppé pour les besoins de ce travail.

2.5.1 Description de l'indice dans W3-3

Le Human Welfare Index (HWI) est introduit dans la mise à jour de 2002 de *World3* (Meadows *et al.*, 2004). Il vise à représenter la qualité de vie moyenne de l'humanité. Pour rendre ce concept mesurable, Meadows et ses collègues s'appuient sur le Human Development Index (HDI), élaboré par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) (United Nations Development Programme, 2001). Le HDI combine trois dimensions : santé, éducation et niveau de vie. Ces dimensions sont traduites dans le modèle par trois sous-indices : le Life Expectancy Index (LEI), l'Education Index (EI) et le GDP Index (GDPI). Le HWI est ainsi défini comme leur moyenne arithmétique :

$$HWI = \frac{1}{3} \cdot \left(\underbrace{LEI}_{\text{Espérance de vie}} + \underbrace{EI}_{\text{Éducation}} + \underbrace{GDPI}_{\text{Niveau de vie}} \right) \quad (2.14)$$

2.5.2 Les limites de cet indicateur

Le HWI présente une limite importante : il reste fortement dépendant du Produit Intérieur Brut. Deux de ses composantes (Education Index et GDP Index) sont calculées à partir de tables corrélées positivement au PIB, lui-même déterminé par l'Industrial Output per Capita. L'espérance de vie est aussi influencée par l'IOPC via le Service Output per Capita. Ainsi, une grande partie du HWI est finalement conditionnée par les dynamiques industrielles.

Dans ce cadre, le bien-être humain est mesuré surtout à travers la croissance économique, ce qui apparaît paradoxal dans un modèle qui en critique les excès. L'indicateur doit donc être repensé. La structure sociale développée dans notre modèle offre une base pertinente pour élaborer une mesure du bien-être moins centrée sur la production industrielle, mais davantage sur la prise en compte des inégalités et de la part de population vivant dans des conditions précaires.

2.5.3 Développement d'un nouvel indice de bien-être humain

Le nouvel indicateur conserve les dimensions santé et éducation du Human Development Index, mais la composante « niveau de vie », jusque-là représentée par le GDP Index, a été repensée pour intégrer plus directement l'impact des inégalités sociales. Il ne s'agit plus seulement de mesurer un revenu moyen, mais de tenir compte de la manière dont la population se répartit entre groupes défavorisés et favorisés.

Pour ce faire, une variable auxiliaire, le *Decent Living Standard Index* (DLI), est introduite. Elle vise à évaluer la capacité d'une société à garantir des conditions de vie décentes à l'ensemble de ses membres. Sa formulation est la suivante :

$$DLI = 1 - \left(\underbrace{\frac{1}{1 + \beta} \cdot pop_1^\alpha}_{\text{Effet pauvreté}} + \underbrace{\frac{\beta}{1 + \beta} \cdot pop_1 \cdot pop_3}_{\text{Effet polarisation}} \right) \quad (2.15)$$

Dans cette expression, pop_i désigne la part du groupe i dans la population totale, tandis que α et β sont des coefficients sans unité. L'équation combine deux mécanismes : un effet pauvreté, exprimé par pop_1^α , qui fait chuter l'indice lorsque la part des plus défavorisés augmente, et un effet de polarisation, représenté par $pop_1 \cdot pop_3$, qui traduit la fragilité d'une société marquée par de forts contrastes entre riches et pauvres. Le paramètre β module l'intensité de cet effet, et le terme $(1 + \beta)$ assure la normalisation. Les valeurs retenues, $\alpha = 1.5$ et $\beta = 0.2$, proviennent d'un calibrage sur données historiques.

Ainsi, le DLI reste élevé dans les sociétés relativement homogènes et diminue lorsque la pauvreté s'accroît. La polarisation seule a un effet modéré, mais combinée à une forte proportion de pauvres, elle amplifie la dégradation du bien-être collectif (Krammer *et al.*, 2022).

Le Human Welfare Index est alors adapté : l'indice lié au produit intérieur brut disparaît au profit du DLI, et l'expression de l'indice global devient

$$HWI_{social} = \frac{1}{3} \cdot \left(\underbrace{LEI}_{\text{Espérance de vie}} + \underbrace{EI}_{\text{Éducation}} + \underbrace{DLI}_{\text{Niveau de vie}} \right) \quad (2.16)$$

2.6 Synthèse méthodologique

Le développement méthodologique présenté dans cette partie est dense, parfois même un peu lourd pour des lecteurs moins familiers avec la dynamique des systèmes ou avec les approches de modélisation scientifique. C'est pourquoi il paraît utile de proposer ici un court bilan, afin de restituer les grandes lignes de la démarche adoptée pour mettre à jour le modèle *World3*.

Dans un premier temps, il a été choisi de modifier la structure démographique du modèle. Alors que *World3* reposait initialement sur une segmentation par âge, une nouvelle approche a été introduite en séparant la population selon des classes sociales définies à partir de seuils de revenu en parité de pouvoir d'achat. Trois groupes ont été distingués :

- Groupe 1 : moins de 6,85 \$PPP/jour,

- Groupe 2 : entre 6,85 et 50 \$PPP/jour,
- Groupe 3 : plus de 50 \$PPP/jour.

À partir de cette structure, trois scénarios stylisés ont été élaborés : un enrichissement global, un appauvrissement global et un développement de la classe moyenne.

La deuxième étape a consisté à intégrer les effets de cette segmentation sociale dans le fonctionnement global du modèle. La question était simple : quel est l'impact d'une population plus riche ou plus pauvre sur la dynamique du système ? L'analyse a montré que l'industrie constituait la variable centrale la plus pertinente pour capter ces effets. Des coefficients de consommation différenciés ont donc été introduits, traduisant le fait que davantage de riches accroissent le poids industriel, tandis qu'une population plus pauvre le réduit.

Enfin, cette démarche a été complétée par une révision de l'indice de bien-être humain présent dans *World3*. L'opportunité de la nouvelle structure sociale a été saisie pour proposer une mesure fondée sur la capacité à garantir un niveau de vie décent.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Dans ce chapitre, sont présentés les résultats issus du modèle socio-adapté final. Certains résultats ont déjà été évoqués dans la partie méthodologie, mais uniquement afin de justifier ou de valider des choix de modélisation. Dans ce chapitre, il s'agit d'examiner les résultats globaux du modèle socio-démographique en fonction des différents scénarios.

Comme précédemment, la notation S_XSS_Y désigne le modèle *World3* mis à jour, combinant le scénario de base X et la structure sociale Y .

La présentation suit la structure suivante : la méthodologie retenue pour l'analyse des résultats est d'abord explicitée ; vient ensuite l'étude des dix scénarios selon les différentes structures sociales. Les principales limites de simulation sont ensuite rappelées, avant de conclure par un bilan synthétique des tendances observées. Un tableau synthèse, récapitulatif de l'ensemble des résultats, est présenté en annexe VIII.

3.1 Méthodologie de présentation des résultats

La méthode retenue pour présenter les résultats est exposée ici. Les dix scénarios sont présentés successivement, mais toujours à travers le prisme des trois structures sociales définies dans le modèle. L'accent porte sur la comparaison entre ces structures, afin d'identifier celles qui apparaissent les plus stables selon les hypothèses considérées. La population et le *Human Welfare Index* sont particulièrement mis en avant, car ils permettent de saisir les grands mécanismes du modèle et de représenter l'état global du système. En complément, d'autres variables sont mobilisées de manière ponctuelle afin d'affiner l'analyse.

Enfin, il est important de souligner que le scénario social SS_3 , correspondant au développement de la classe moyenne, se rapproche fortement du scénario de référence de *World3*. Dans ce cas, l'indice de pression industrielle demeure stable autour de 1, indiquant qu'aucune pression

supplémentaire n'est exercée sur le système. Ce scénario constitue ainsi un point de repère pour quantifier l'évolution des trajectoires d'appauvrissement et d'enrichissement.

3.2 Analyse des résultats

3.2.1 Scénario 1 — « Business as Usual »

Ce scénario, souvent désigné sous le terme Business as Usual (BAU), correspond à la trajectoire de référence la plus connue de *World3*. L'effondrement résulte de dynamiques multiples et interconnectées. On met ici en valeur seulement quelques-unes des nombreuses boucles de rétroaction présentes dans le modèle :

- la pollution croissante détériore progressivement la fertilité des sols, entraînant des famines ;
- l'industrie s'effondre sous l'effet de la raréfaction des ressources naturelles ;
- la chute de l'industrie provoque à son tour l'effondrement des services de santé et des capacités de soin.

Ces rétroactions illustrent seulement une partie du système global, qui repose en réalité sur un enchevêtrement beaucoup plus riche de boucles dynamiques. L'ensemble conduit néanmoins à une crise brutale et rapide. Dans cette simulation, l'effondrement industriel survient dès 2021, suivi par la chute de la population seulement trois ans plus tard, en 2024.

Dans ce contexte, les structures sociales définies dans le modèle socio-adapté ne jouent qu'un rôle marginal. En effet, la dynamique différenciée des classes de revenu n'est introduite qu'à partir de 2021, soit précisément au moment où l'effondrement industriel se déclenche. Dès lors, les différences de trajectoires entre les structures sociales sont neutralisées, comme l'illustrent les courbes d'*industrial output* de la figure 3.1, qui restent quasiment identiques pour les trois scénarios sociaux.

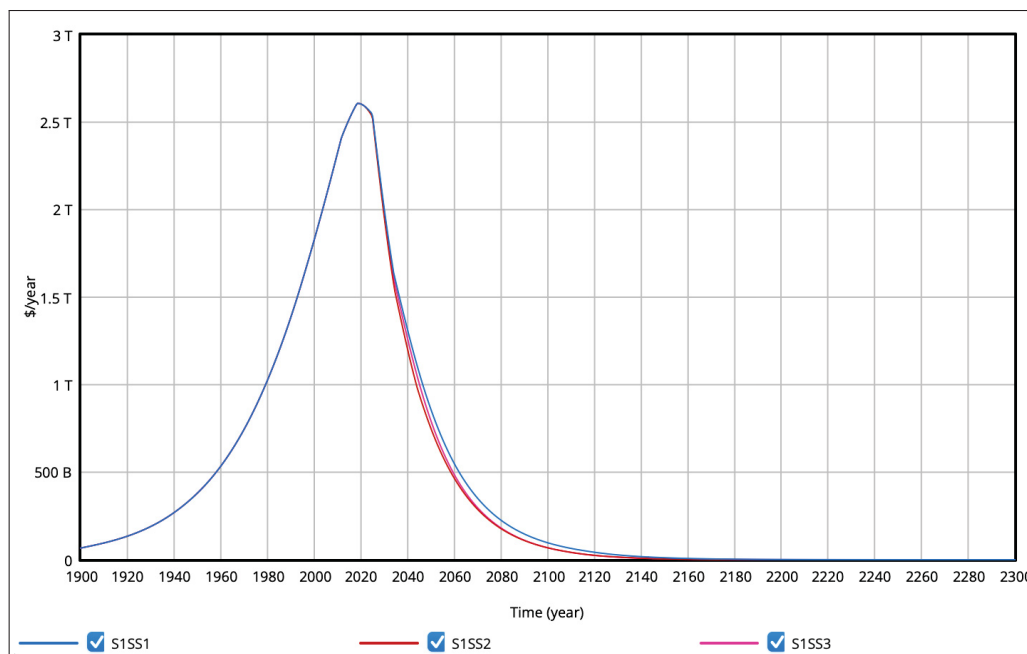


Figure 3.1 Évolution de l'*Industrial Output* selon les trois scénarios sociaux du scénario 1.

Étant donné que la segmentation par classe n'agit que sur la sphère industrielle, et que cette dernière reste quasiment inchangée, la seule conclusion solide qui puisse être formulée est la suivante : dans ce jeu d'hypothèses, l'effondrement du système apparaît inévitable. Sa brutalité est telle qu'aucune marge d'influence n'est laissée à la structure sociale de la population.

3.2.2 Scénario 2 — Ressources naturelles abondantes

Le scénario 2 mérite une attention particulière. En effet, il occupe une place centrale dans la littérature récente puisque Herrington, dans son analyse empirique de 2021, a conclu que ce scénario, avec le scénario CT (scénario 6), était l'un des plus proches des données observées. Contrairement au scénario 1, l'impact des structures sociales devient ici significatif pour l'ensemble des simulations. Comme précédemment, l'effondrement de la fertilité des sols entraîne une famine mondiale notamment à une pollution intense. Cependant, la disponibilité

accrue des ressources naturelles (multipliées par deux par rapport au scénario 1) retarde l'effondrement industriel, qui survient seulement vers 2050 dans le modèle de base de *World3*.

Les résultats du scénario S_2 mettent en évidence l'influence déterminante de la structure sociale sur la dynamique globale du système (voir figure 3.2).

Dans le scénario SS_1 (enrichissement), l'expansion rapide de la classe aisée entraîne une intensification bien plus forte de la production industrielle que dans le scénario SS_3 . Cette suractivité provoque une pollution environ 2,5 fois supérieure à celle du scénario de référence (figure 3.2c), une dégradation accélérée des sols et une raréfaction rapide des ressources naturelles (figure 3.2d). Vers 2070, le coût d'extraction devient insoutenable à cause de l'industrie surdéveloppée (figure 3.2a), provoquant l'effondrement brutal de la production. La population chute alors sous les deux milliards d'individus (figure 3.2b), conséquence directe de la détérioration des conditions sanitaires et environnementales. Le système s'épuise totalement, tant sur le plan industriel qu'écologique. Comparé au scénario SS_3 , le scénario d'enrichissement conduit à un effondrement plus rapide et plus violent, marqué par un état écologique critique et un pic de pollution nettement supérieur.

Le scénario SS_2 (appauvrissement) suit une trajectoire nettement différente de celle du scénario SS_3 . La pauvreté généralisée limite la production industrielle et la pollution (figures 3.2a et 3.2c), ce qui favorise la régénération partielle des sols et la préservation des ressources. Les résultats écologiques sont ainsi meilleurs, la pression sur les écosystèmes restant modérée. Cette moindre exploitation permet même une relance temporaire de l'activité économique : le système conserve encore des ressources exploitables (figure 3.2d), d'où une courte phase de reprise observée après la première crise (figure 3.3). Cependant, ces bénéfices environnementaux s'accompagnent d'une forte dégradation sociale. Le manque de capital industriel freine la production agricole faute d'intrants, les services de santé se détériorent et la population tombe à environ 3,5 milliards d'individus. Par rapport au scénario SS_3 , le système montre une meilleure résilience écologique mais au prix d'un affaiblissement social profond et d'un bien-être global durablement dégradé.

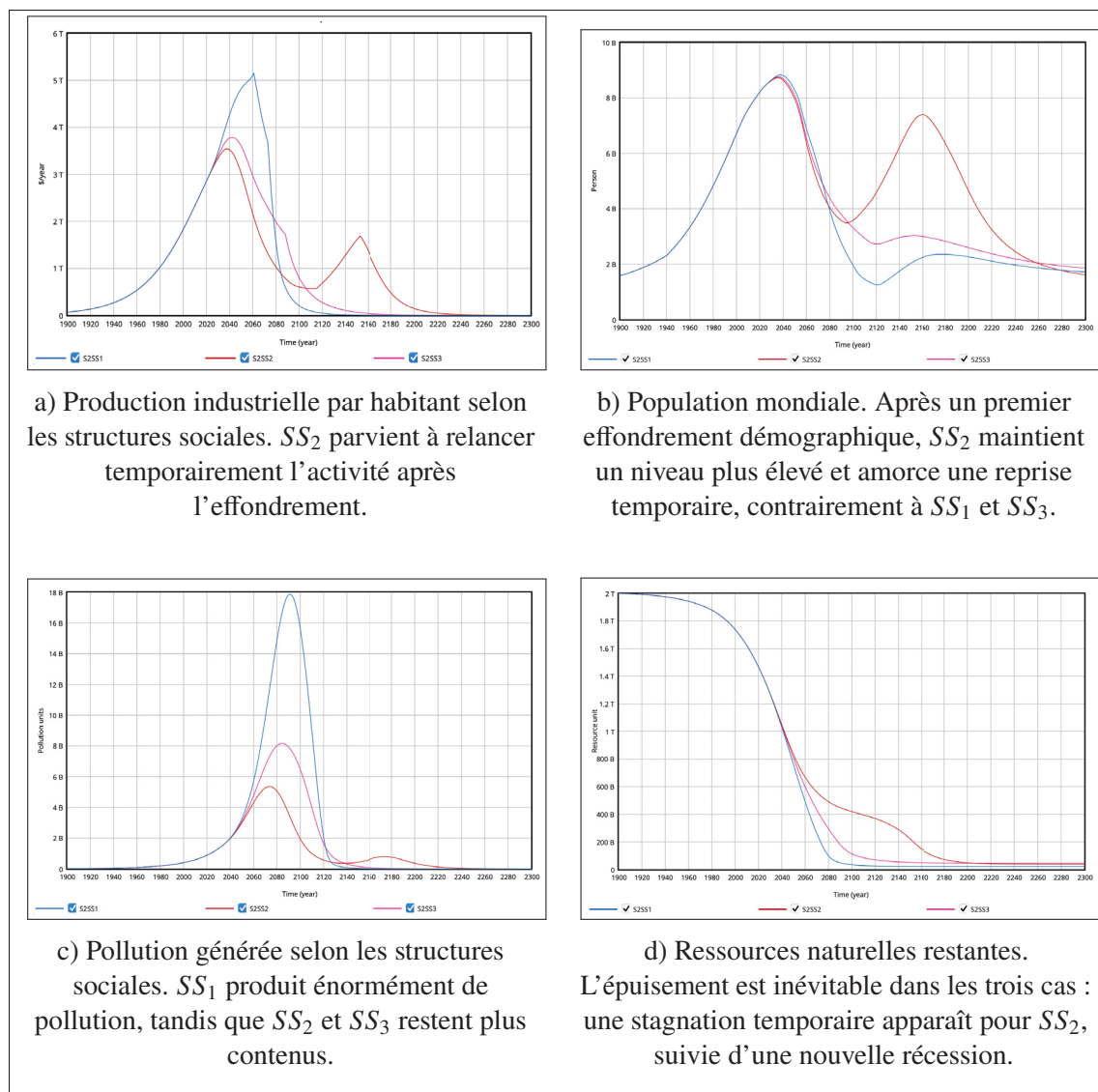


Figure 3.2 Comparaison des trajectoires du scénario 2 selon les structures sociales :
 SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)

Globalement, les trois structures sociales conduisent à une baisse significative du bien-être global (voir figure 3.4). Le Human Welfare Index reste faible dans tous les cas : il atteint son minimum sous SS_2 à cause de la pauvreté généralisée.

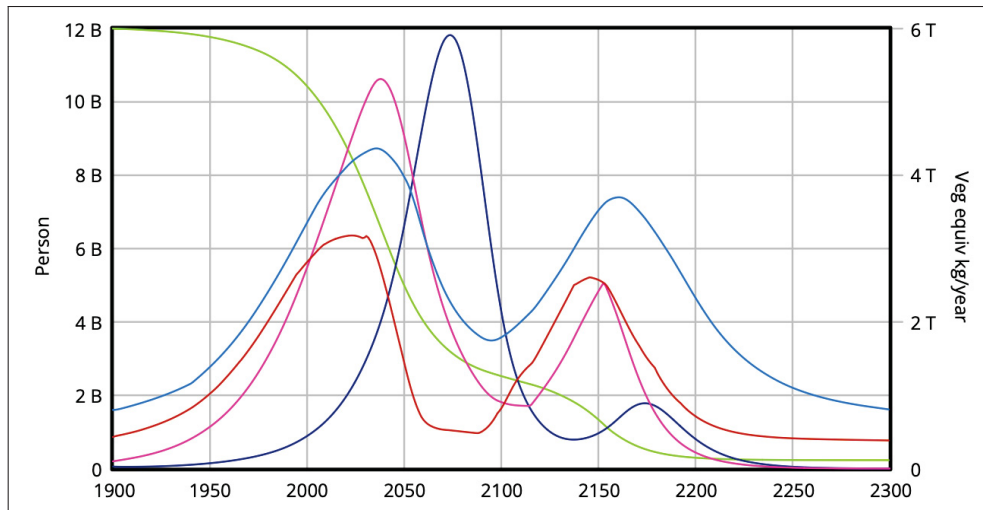


Figure 3.3 État du système dans le scénario social SS_2 (appauvrissement). La figure illustre l'évolution simultanée des principales variables sur la période 1900–2300 : population (milliards de personnes), nourriture (équivalent végétal en kg/an), output industriel (\$/an), pollution persistante (indice, adimensionnel), ressources non renouvelables (unités de ressource)

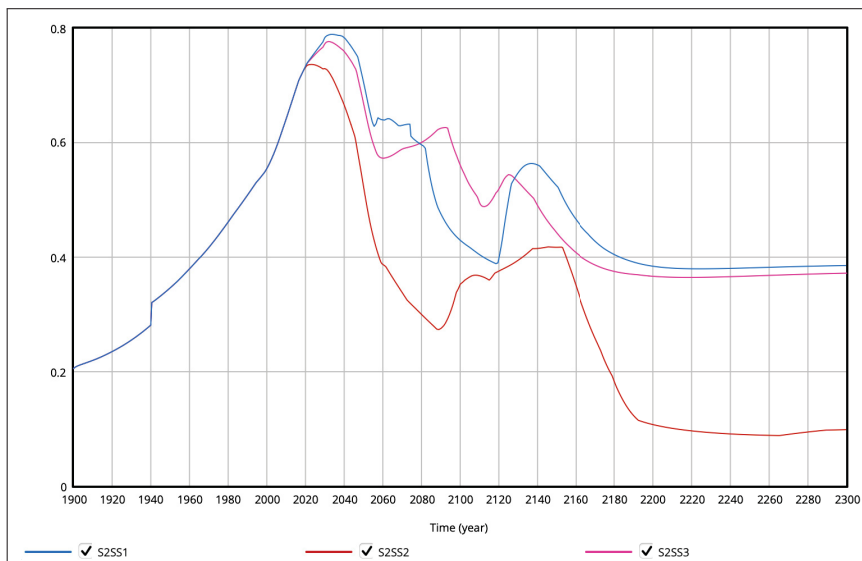


Figure 3.4 Évolution du *Human Welfare Index* dans le scénario 2, selon les trois structures sociales : SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose).

3.2.3 Scénario 3 — Contrôle technologique de la pollution

Le scénario 3 introduit une hypothèse de progrès technique : à partir de 2002, une technologie améliorée de contrôle de la pollution permet de réduire les émissions de 4% par an. L'objectif est de limiter la pression environnementale tout en poursuivant le développement industriel. Cette hypothèse se rajoute à celle du scénario 2.

Dans le scénario social SS_1 (enrichissement), la forte consommation des classes aisées exerce une pression industrielle intense sur le système. Les rendements agricoles progressent rapidement grâce aux intrants industriels, mais s'effondrent brutalement lorsque l'industrie décline (voir figure 3.5b), en raison de l'épuisement des ressources naturelles. Cette rupture provoque une famine généralisée et un effondrement démographique rapide.

À l'inverse, dans le scénario SS_2 (appauvrissement), la production industrielle plus limitée préserve partiellement les sols. Les rendements agricoles se maintiennent plus longtemps et l'effondrement démographique, bien que sévère, intervient 60 ans après le scénario d'enrichissement (voir figure 3.5a). Les ressources, moins exploitées, assurent une certaine résilience au système.

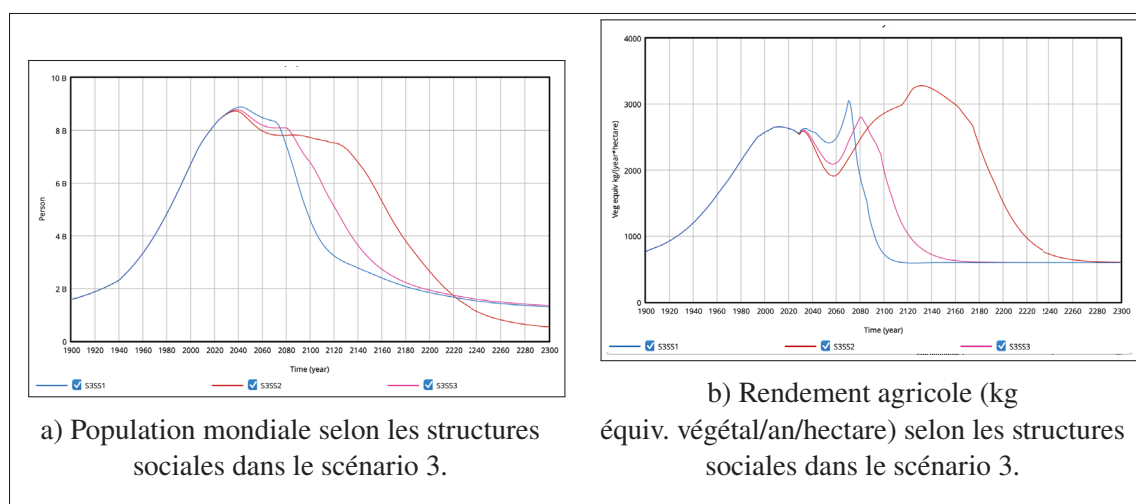


Figure 3.5 Comparaison entre l'évolution de la population et du rendement agricole pour le scénario 3, selon les structures sociales : SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)

Le scénario SS_3 (développement de la classe moyenne) occupe une position intermédiaire : la pression industrielle y est modérée, les rendements plus stables, mais la poursuite d'une agriculture intensive conduit malgré tout à une crise alimentaire.

Dans l'ensemble, les différences entre les structures sociales du scénario 3 tiennent moins à la nature des dynamiques qu'à leur intensité et à leur temporalité. La maîtrise de la pollution permet de modérer les effets de l'expansion industrielle, mais la dégradation des sols demeure inévitable dans les trois cas. Le *HWI* diminue partout sous l'effet combiné du recul de l'espérance de vie et de la dégradation des services sociaux 3.6, atteignant son niveau le plus bas dans SS_2 , où la pauvreté généralisée pèse sur le bien-être. Cependant, malgré ce contexte défavorable, la structure sociale SS_2 se révèle la plus résiliente : la pression industrielle plus faible préserve partiellement les ressources et retarde l'effondrement, offrant au système de meilleures conditions de stabilisation à long terme.

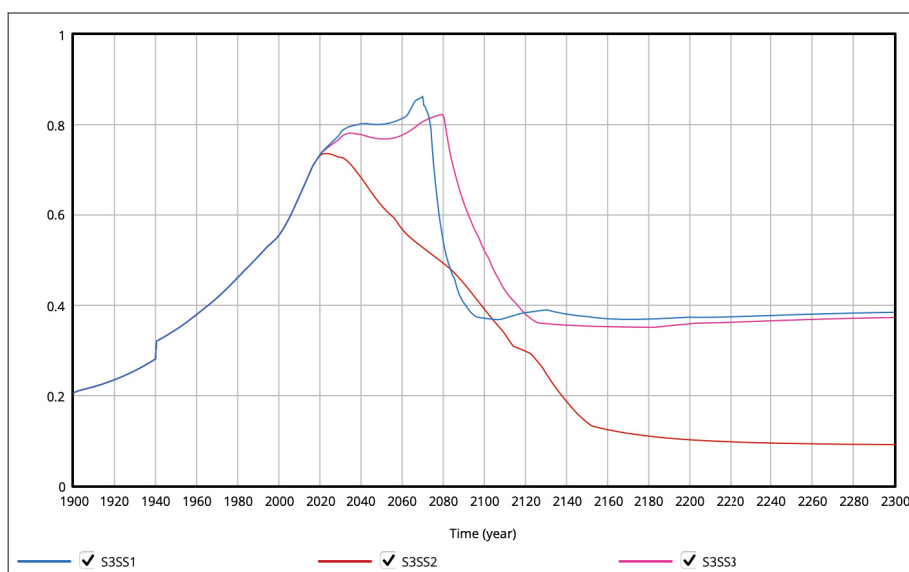


Figure 3.6 Évolution du *Human Welfare Index* (HWI) dans le scénario 3 pour les trois structures sociales : SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)

3.2.4 Scénario 4 — Amélioration des rendements agricoles

Le scénario 4 reprend les hypothèses du scénario 3, en y ajoutant une innovation agricole visant à accroître les rendements des terres arables. Dans le modèle de base de *World3*, cette stratégie permet de nourrir davantage de personnes pendant un temps limité. Cependant, la fertilité des sols décline rapidement, de sorte que l'effondrement survient finalement plus tôt que dans le scénario précédent. La croissance démographique se heurte alors à une stagnation, puis à une crise alimentaire généralisée.

Le scénario 4 ne présente pas de divergences majeures entre les différents scénarios sociaux. L'amélioration des rendements procure un répit : la disponibilité alimentaire s'accroît et retarde légèrement l'effondrement (figure 3.7b). Néanmoins, l'érosion des terres arables entraîne inévitablement un déclin dans chacun des cas (figure 3.7a).

On observe toutefois des nuances. Comme dans les scénarios précédents, mais cette fois de manière plus marquée, une différence se situe dans la disponibilité des ressources naturelles en fin de simulation : il est relevé un écart d'un facteur 12 entre le scénario *SS*₁ (enrichissement) et le scénario *SS*₂ (appauvrissement), en faveur de ce dernier (figure 3.7c). Par ailleurs, dans *SS*₂, la baisse rapide du capital industriel fragilise le système de soins, ce qui entraîne une diminution plus précoce de l'espérance de vie (figure 3.7d). Enfin, bien que les trajectoires d'effondrement restent proches, elles apparaissent toujours plus sévères dans *SS*₁, puis dans *SS*₃, et relativement moins marquées dans *SS*₂ (figures 3.7a et 3.7b).

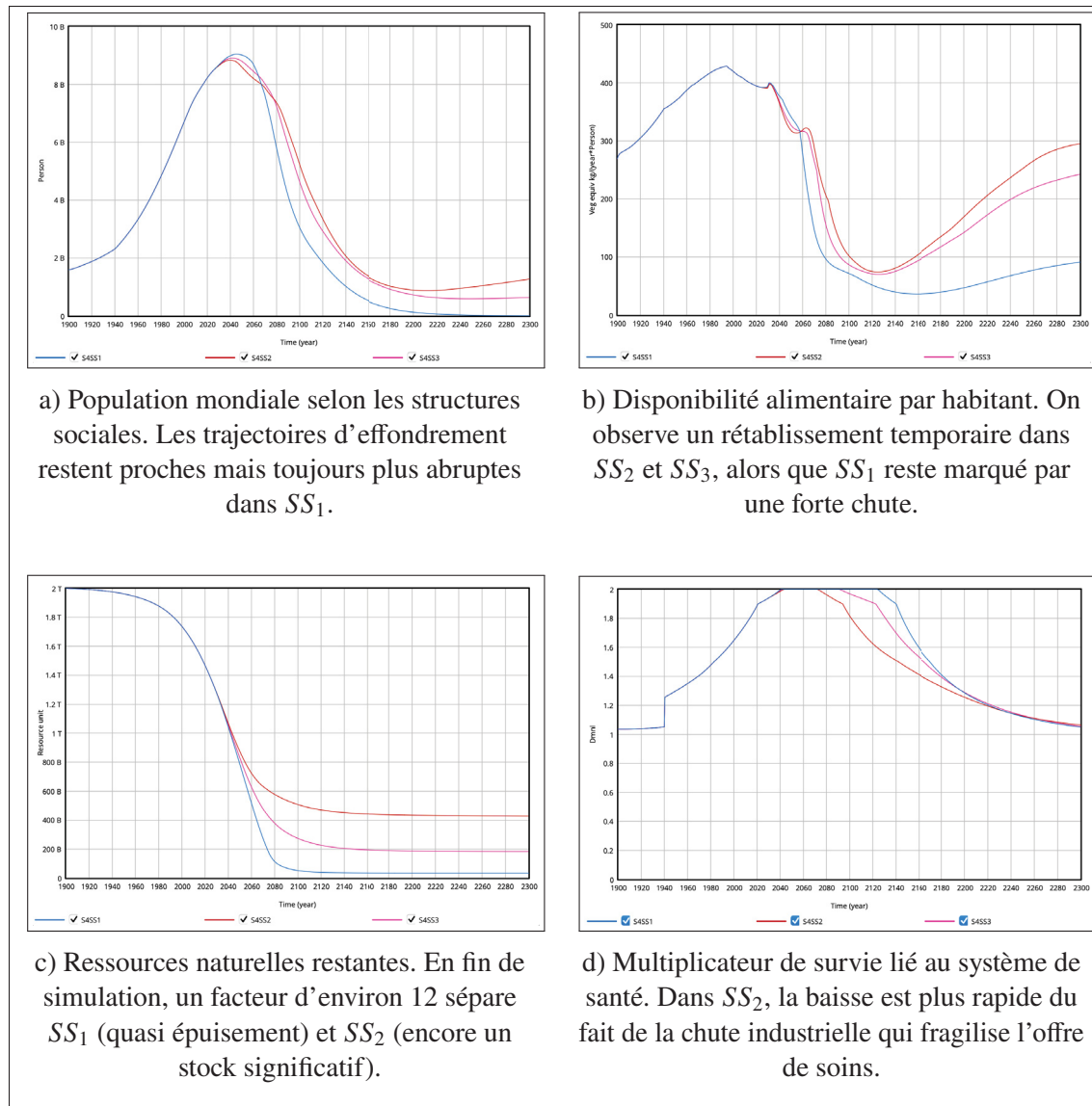


Figure 3.7 Comparaison des trajectoires du scénario 4 selon les structures sociales :
SS₁ (bleu), SS₂ (rouge) et SS₃ (rose)

3.2.5 Scénario 5 — Protection contre l'érosion

Puisque l'effondrement observé dans le scénario 4 provient principalement d'une érosion généralisée des sols, le scénario 5 introduit une politique de protection des terres arables.

Cette mesure vise à réduire significativement l'érosion en adoptant des pratiques agricoles plus durables, afin de prolonger la fertilité des sols et de retarder les dynamiques d'effondrement.

Dans le scénario 5, le facteur d'effondrement est relativement facile à identifier : il découle de la raréfaction des ressources naturelles. Cette contrainte entraîne un basculement brutal de l'économie mondiale, marqué par une chute abrupte de la production industrielle (figure 3.8). Comme dans les scénarios précédents, c'est la société la plus riche (SS_1) qui s'effondre la première, son appareil industriel étant le plus énergivore et le plus dépendant des ressources. Elle est suivie par SS_3 , puis par SS_2 , où la trajectoire est légèrement retardée mais demeure caractérisée par une pauvreté persistante.

Le *Human Welfare Index* reste faible dans les trois structures sociales, avec un niveau particulièrement bas dans SS_2 encore une fois, en raison de la fragilité du capital industriel et de la faiblesse du système de soins. Comparé au scénario 4, le scénario 5 parvient à repousser certains points de bascule grâce à la protection des sols, mais l'effondrement global n'est pas évité. Les différences observées tiennent essentiellement à la temporalité et à l'intensité des chocs selon les structures sociales.

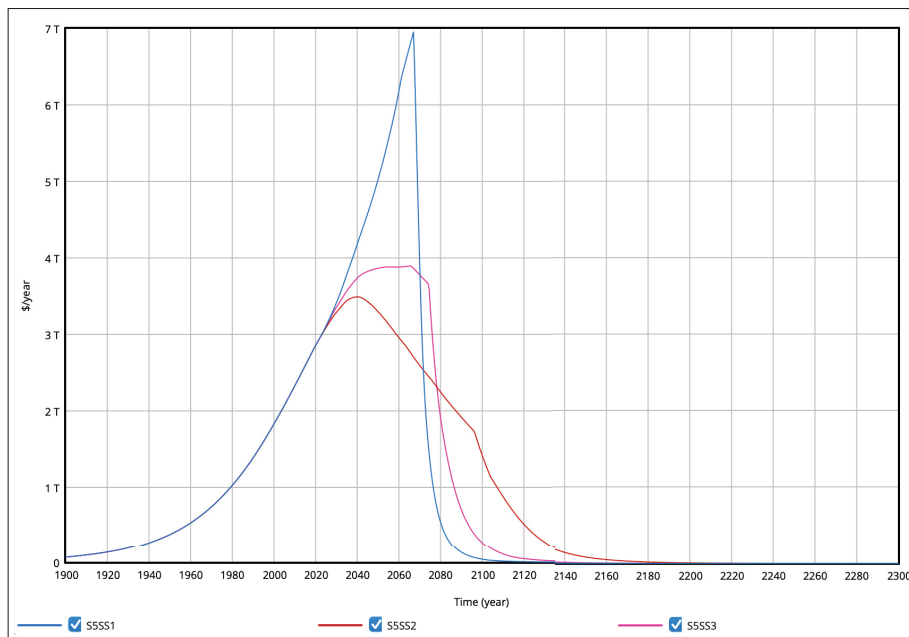


Figure 3.8 Évolution de la production industrielle dans le scénario 5 pour les trois structures sociales : SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)

3.2.6 Scénario 6 — Technologie globale (CT)

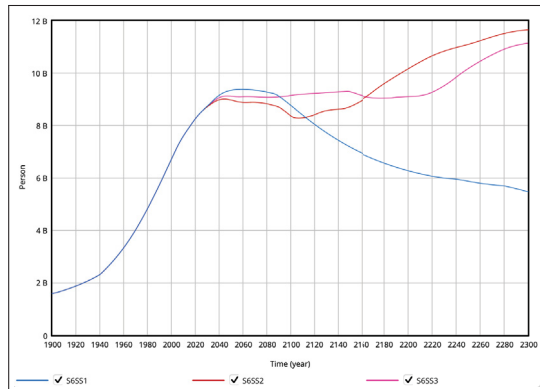
Le scénario 6 occupe une place centrale dans *W3*, puisqu'il est à la fois présenté comme l'un des scénarios les plus stables dans le rapport original et retenu comme plausible dans la mise à jour empirique de Herrington (2021). Il repose sur un recours massif aux technologies : amélioration des rendements agricoles, protection des sols, contrôle de la pollution et réduction de l'usage des ressources non renouvelables. Grâce à cette combinaison, les principales contraintes physiques du modèle sont largement neutralisées. Ce scénario illustre ainsi la trajectoire la plus optimiste de l'approche technologique : un monde où la démographie et le bien-être humain se stabilisent sans effondrement brutal lié aux limites matérielles. Toutefois, cette stabilité repose sur des investissements de plus en plus coûteux, ce qui conduit progressivement à une crise économique non pas causée par la rareté physique, mais par la pression financière et sociale (figure 3.9c).

À première vue, l'évolution démographique pourrait laisser penser que le scénario d'appauvrissement (SS_2) est le plus favorable, puisque la population y continue de croître (figure 3.9a). Pourtant, comme rappelé dans la partie méthodologique, la démographie résulte de l'équilibre entre natalité et mortalité : un solde positif n'est donc pas nécessairement synonyme de bien-être. Dans SS_2 , la hausse de population provient d'une natalité extrêmement élevée combinée à une espérance de vie très basse (stabilisée autour de 30 ans, figure 3.9b), ce qui traduit des conditions de vie très dégradées.

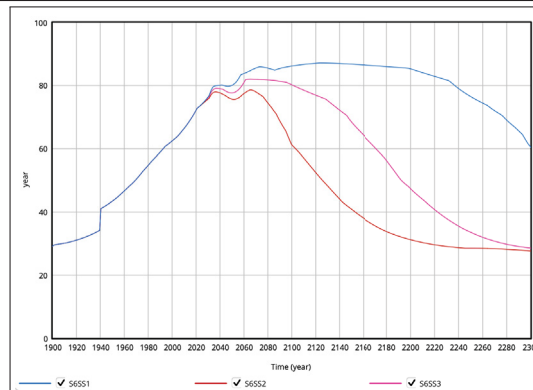
L'industrie, quant à elle, finit par s'effondrer dans les trois structures sociales (figure 3.9c). Le scénario SS_1 , cependant, connaît une phase de croissance prolongée liée à l'enrichissement de la population, avant de régresser sous l'effet de la crise des coûts. Ce résultat découle du même mécanisme que dans le modèle initial : les dépenses croissantes pour protéger la population contre la faim, la pollution, l'érosion et la raréfaction des ressources absorbent progressivement le capital disponible pour l'investissement productif.

Dans ce contexte, où les contraintes physiques sont neutralisées, une hausse de l'activité industrielle est automatiquement interprétée comme une dynamique purement positive. Plus aucune rétroaction négative ne vient contrebalancer la croissance industrielle : ni la pollution, ni la raréfaction des ressources, ni l'usage excessif des terres arables.

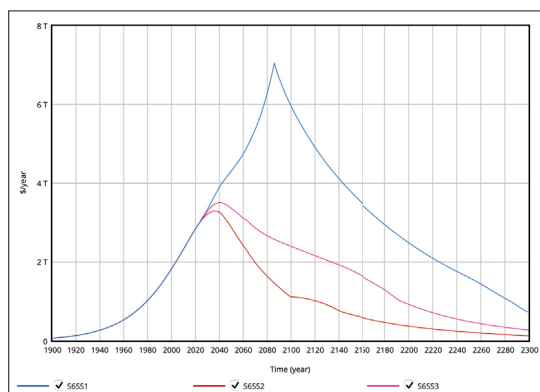
Ainsi, dans le scénario 6, la trajectoire la plus favorable correspond mécaniquement au scénario d'enrichissement (SS_1). Le scénario SS_3 présente également des résultats relativement satisfaisants, avec un compromis intermédiaire. En revanche, SS_2 reste marqué par une grande fragilité et des conditions de vie très difficiles, notamment à cause de l'effondrement du système de santé lié à la faiblesse du capital industriel. Ce phénomène est clairement illustré par le *Human Welfare Index* du SS_2 (figure 3.9d), qui chute rapidement sous 0.2.



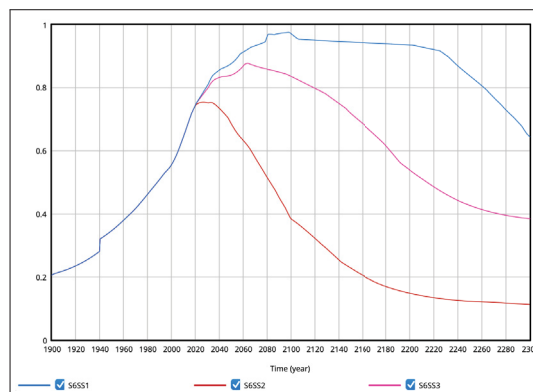
a) Population mondiale. SS_2 et SS_3 continuent de croître au-delà de 2100, tandis que SS_1 décline progressivement après 2050.



b) Espérance de vie. SS_1 maintient un niveau élevé et stable, SS_3 adopte une trajectoire intermédiaire avec un recul progressif, tandis que SS_2 se distingue par un effondrement marqué.



c) Production industrielle. Les trois scénarios connaissent une régression à long terme, mais SS_1 se distingue par une phase préalable de forte croissance.



d) *Human Welfare Index*. Très bon niveau pour SS_1 , intermédiaire pour SS_3 , et effondrement brutal pour SS_2 .

Figure 3.9 Comparaison des trajectoires du scénario 6 selon les structures sociales :
 SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)

3.2.7 Scénario 7 — Régulation démographique

Le scénario 7 retire toutes les hypothèses technologiques introduites jusqu'au scénario 6. Il conserve uniquement l'hypothèse de ressources naturelles initiales doublées (comme dans le scénario BAU2) et introduit une régulation démographique stricte : à partir de 2002, la taille désirée des familles est fixée à deux enfants, avec une efficacité de contrôle des naissances de 100 %. Cette mesure entraîne un ralentissement de la croissance démographique : la population mondiale atteint un pic légèrement plus bas et anticipé par rapport au scénario BAU2, mais les autres dynamiques globales du système (production industrielle, pollution, alimentation) restent très proches de celles observées dans le scénario 2.

Les différences entre structures sociales dominant largement les résultats du scénario 7, qui reproduit globalement les dynamiques observées dans le scénario 2. Dans le cas de l'enrichissement (SS_1), la forte intensité industrielle provoque une pollution massive qui dégrade rapidement les sols, épuise les ressources et conduit à un effondrement global du système. Cette pollution affecte directement l'espérance de vie, qui chute brutalement sous son effet. À l'inverse, la structure d'appauvrissement (SS_2) se montre plus résiliente. La moindre activité industrielle limite la pollution et préserve partiellement les ressources naturelles, retardant la dégradation des rendements agricoles et l'effondrement démographique. Le scénario SS_3 , intermédiaire, demeure proche de SS_1 , avec une pression industrielle encore trop élevée pour éviter la crise. Un léger rebond apparaît toutefois, comme dans le scénario S_2SS_2 , lié à une meilleure santé biophysique du système. En somme, comme dans le scénario 2, la structure sociale SS_2 reste la plus stable et la plus durable : elle atténue les déséquilibres globaux sans en modifier les mécanismes fondamentaux. Néanmoins, cette trajectoire se dégrade sur le plan social : la chute du capital industriel réduit la disponibilité des intrants agricoles, affaiblit les services de santé et compromet l'éducation, entraînant une baisse généralisée du bien-être..

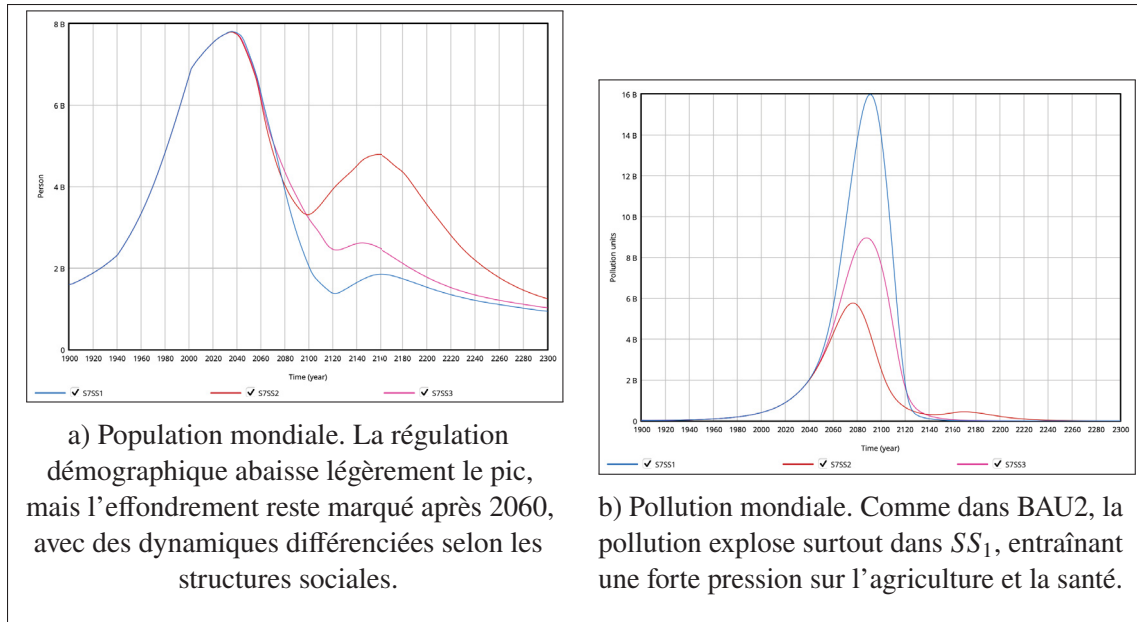


Figure 3.10 Comparaison des trajectoires de la population et de la pollution dans le scénario 7 pour les trois structures sociales : SS_1 (bleu), SS_2 (rouge) et SS_3 (rose)

3.2.8 Scénarios 8 à 11 — Équilibre industriel

Les scénarios 8, 9, 10 et 11 de *Limits to Growth* introduisent une hypothèse commune : celle d'un équilibre industriel. L'idée consiste à stabiliser la production industrielle autour d'un niveau cible d'environ 350\$/an/personne, en ajustant continuellement les investissements pour maintenir cet objectif. Ce modèle décrit une société post-croissance, cherchant à orienter son appareil productif vers la durabilité plutôt que vers la consommation.

Cependant, cette logique n'est pas compatible avec la structure du modèle socio-adapté développée ici. En effet, le mécanisme d'équilibre industriel agit directement sur les flux d'investissement, tout comme la logique des scénarios sociaux. Dans un scénario hybride, les deux dynamiques se superposeraient : d'un côté, la pression industrielle liée à la structure sociale stimulerait les investissements ; de l'autre, la régulation vers un *IOPC* cible générerait

des flux correctifs inverses. Ces effets contradictoires annuleraient partiellement leurs impacts et produiraient des trajectoires peu représentatives.

Ainsi, bien que les scénarios 8 à 11 soient théoriquement intéressants, leur logique de pilotage des investissements rend leur intégration incompatible avec celle du modèle social. Pour cette raison, ils ne seront pas étudiés dans la suite de cette analyse.

3.3 Synthèse des résultats

3.3.1 Place et interprétation de la pollution dans le modèle

La pollution n'occupe pas une place centrale dans l'analyse des résultats. Parmi l'ensemble des trajectoires simulées, elle n'apparaît clairement que dans les scénarios 2 et 7, où l'industrialisation rapide ou le maintien d'une forte activité productive entraînent une hausse marquée des émissions. Dans les autres configurations, ses effets sont largement atténués par les dispositifs techniques de dépollution introduits dès le scénario 3.

Pourtant, dans *World3*, la pollution reste une composante structurelle du système. Elle agit à la fois sur la fertilité des sols et sur la santé de la population, et peut, lorsqu'elle s'accumule, provoquer des ruptures rapides dans les équilibres économiques et démographiques, comme le montrent les scénarios 2 et 7.

Dans la réalité contemporaine, la pollution joue un rôle beaucoup plus central que ne le suggèrent ces simulations. Sa faible présence dans les résultats ne traduit pas une moindre importance, mais un choix de modélisation visant à neutraliser son effet pour mieux isoler d'autres dynamiques. Elle demeure pourtant l'un des principaux moteurs des déséquilibres écologiques et sociaux actuels.

3.3.2 Enrichissement (SS_1) : puissance et fragilité

Les investissements supplémentaires liés à l'enrichissement stimulent fortement la production industrielle, mais au prix d'une intensification de l'extraction, d'une surmobilisation des sols et d'une forte hausse de la pollution. Ce schéma structurel conduit, dans la quasi-totalité des scénarios, à des effondrements plus rapides et plus violents : plus la croissance s'accélère, plus le système se déséquilibre ($S_{1,2,3,4,5,7}SS_1$).

Le scénario 6 (CT) constitue une exception partielle, les contraintes physiques y étant temporairement levées par les technologies. Dans ce cas précis, l'enrichissement apparaît comme un facteur uniquement positif, car aucune rétroaction négative ne vient compenser la hausse de l'activité industrielle. Le modèle considère alors la prospérité comme durable, et les résultats sont effectivement meilleurs que dans le scénario d'expansion de la classe moyenne. La crise qui survient ensuite relève davantage du fonctionnement du modèle de base que de la dynamique d'enrichissement elle-même. Cette simulation illustre ainsi une vision technosolutionniste bien connue : celle d'un système capable de repousser indéfiniment ses limites par l'innovation, permettant un enrichissement total de la population.

Il est toutefois essentiel de souligner que cet équilibre n'est atteignable que si les innovations sont globales, c'est-à-dire appliquées simultanément à l'ensemble des secteurs du modèle. Si ces progrès ne concernent qu'une partie du système, par exemple la pollution sans l'agriculture ni la gestion des ressources, les pressions industrielles s'emballent et le système finit par se déséquilibrer. L'apparente stabilité du scénario 6 repose donc sur une hypothèse très ambitieuse : celle d'une mise en œuvre universelle, simultanée et parfaitement coordonnée des solutions technologiques.

3.3.3 Appauvrissement (SS_2) : résilience environnementale, coût social

L'appauvrissement agit en sens inverse de l'enrichissement. La baisse des investissements réduit la production industrielle, ce qui diminue mécaniquement la pression sur les ressources, les sols et la pollution. L'effondrement est ainsi retardé, parfois de plusieurs décennies, et le système

conserve davantage de ressources naturelles et de terres fertiles en fin de simulation, contrairement au SS_1 , qui épuise systématiquement les stocks disponibles (sauf dans le scénario 6). Un rebond est même parfois observé.

Cependant, même si le système se maintient dans de meilleures conditions biophysiques, il peine à atteindre un état prospère. La contraction industrielle réduit la production agricole et affaiblit les services de santé, entraînant un coût social élevé. Le *Human Welfare Index* y chute nettement, reflet d'un accès restreint aux services essentiels et d'une dégradation générale des conditions de vie. Autrement dit, la stabilité environnementale s'obtient au prix d'un affaiblissement du bien-être collectif.

Ainsi, la sous-consommation industrielle, bien qu'elle réduise les pressions physiques sur le système, ne constitue pas pour autant une condition suffisante de stabilité dans *World3*.

3.3.4 Développement de la classe moyenne (SS_3) : compromis mais limites

Le scénario SS_3 se rapproche du modèle de base de *World3*, avec une pression industrielle égale à 1, ce qui ne modifie pas le comportement industriel du modèle. Sa pertinence ne réside donc pas dans ses résultats absolus, mais dans la comparaison avec les deux autres structures sociales.

Ce scénario présente des résultats plus équilibrés : des pics industriels et une pollution moins marqués que dans SS_1 , et un *Human Welfare Index* généralement proche de celui du scénario d'enrichissement. Comme ce dernier, il tend à exploiter l'ensemble des ressources naturelles disponibles au cours de la simulation. Il reste toutefois moins performant sur le plan écologique que le scénario d'appauvrissement.

Cependant, ce compromis ne conduit pas à une stabilisation durable. Comme dans le modèle de base, les limites physiques finissent par s'imposer, et seule la combinaison technologique du scénario S_6SS_3 permet une atténuation partielle des déséquilibres, comparable à celle observée dans S_6SS_1 .

De façon robuste, le scénario de développement de la classe moyenne apparaît plus souhaitable que celui de l'enrichissement : il maintient un niveau de bien-être similaire tout en retardant l'effondrement. Il est également plus performant socialement que le scénario d'appauvrissement, bien qu'il le soit moins du point de vue des limites planétaires.

3.3.5 Enseignements généraux

Un tableau synthétique récapitulatif de l'ensemble des résultats est présenté en annexe VIII. Ces résultats permettent de dégager plusieurs conclusions robustes :

- les structures sociales influent avant tout sur la temporalité et la violence des crises, mais aucune ne constitue une condition de stabilité à elle seule ;
- un scénario d'enrichissement (SS_1) engendre des niveaux de pollution extrêmement élevés et un état final du système fortement dégradé, même lorsque la pollution est neutralisée dans le modèle ;
- un scénario d'appauvrissement (SS_2) permet une certaine résilience environnementale : l'effondrement y est plus tardif et moins violent, mais le bien-être et les conditions de vie se détériorent considérablement ;
- une société de classe moyenne (SS_3) constitue le meilleur compromis entre stabilité écologique et bien-être humain, sans toutefois garantir un équilibre durable.

En somme, deux voies opposées permettent d'obtenir un système écologiquement plus stable : soit une série d'avancées technologiques majeures capables de neutraliser les rétroactions industrielles, soit une sous-industrialisation liée à l'appauvrissement de la population. Cependant, cette dernière trajectoire se traduit par un effondrement du bien-être humain. Or, si le principal défaut du scénario d'appauvrissement réside dans la chute du bien-être, ne pourrait-on pas interroger ce lien entre pauvreté et bonheur ? Autrement dit, est-il possible de redéfinir la pauvreté dans *World3*, non plus comme un échec social, mais comme une forme de sobriété choisie, tout en conservant ses implications systémiques ?

Cette question ouvre la voie à une réflexion sur la manière dont un modèle de sous-industrialisation planifiée pourrait maintenir le bien-être humain sans rompre les équilibres écologiques.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Ce dernier chapitre vise à interpréter les résultats obtenus à la lumière du cadre théorique et des éléments de littérature présentés précédemment. L'objectif n'est pas de proposer de nouvelles simulations, mais d'examiner la portée et les limites des dynamiques observées dans le modèle.

La discussion s'ouvre ainsi par l'interprétation de chacun des trois scénarios sociaux (société de classe moyenne, enrichissement et appauvrissement) avant d'aborder, dans un second temps, les limites structurelles du modèle et les pistes de réflexion qu'elles suggèrent.

4.1 Scénario de développement de la classe moyenne

Le scénario de classe moyenne constitue avant tout un repère : il se rapproche fortement du comportement du modèle *World3* original et sert de point d'équilibre entre les scénarios d'enrichissement et d'appauvrissement. Son intérêt réside donc moins dans ses résultats propres que dans la fonction comparative qu'il remplit. Il permet de situer les effets de la répartition des richesses sur la dynamique globale du système et d'évaluer la portée des transformations introduites dans les deux autres scénarios.

4.2 Analyse du scénario d'enrichissement de la population

Il est présenté dans cette partie une analyse groupée du scénario d'enrichissement de la population.

4.2.1 Lecture globale du scénario

Le scénario d'enrichissement (SS_1) met en évidence l'impossibilité d'un développement fondé sur la croissance continue de la consommation et du capital industriel. Dans ce cadre, l'intensification des activités productives conduit à une série de rétroactions déstabilisatrices, provoquant un effondrement plus rapide et plus violent que dans le scénario de référence. Cette

trajectoire illustre, à l'échelle du modèle, la promesse illusoire d'un monde consumériste dont l'objectif premier serait l'accumulation matérielle. Elle interroge la soutenabilité du paradigme de croissance en montrant qu'au-delà d'un certain seuil de prospérité, les gains économiques se transforment en pressions écologiques et sociales susceptibles de déstabiliser le système tout entier.

4.2.2 Représentation structurelle de l'enrichissement dans le modèle

Dans le modèle, l'enrichissement ne désigne pas un changement de comportement individuel, mais une transformation structurelle de la répartition des revenus. Il correspond à une société qui tend, à l'horizon 2100, vers une configuration où environ 30 % de la population vit avec un revenu supérieur à 50 \$ PPP par jour, tandis qu'il n'existe plus de population vivant sous le seuil de pauvreté fixé à 7 \$ PPP par jour.

Ce niveau de vie n'apparaît pas irréaliste au regard des standards actuels : en 2021, plus de 70 % de la population canadienne dépassait ce seuil, et en France, plus de 60 % en 2023 (Banque mondiale, 2025). Imaginer qu'en 2100, 30 % de la population mondiale atteigne un tel niveau tandis que la pauvreté extrême disparaisse pourrait donc, en apparence, sembler plausible. Dans le cadre du modèle, cette hypothèse est conservée comme exogène pour ce qu'elle permet d'analyser. Elle offre un point de comparaison permettant d'examiner ce qu'il adviendrait, d'un point de vue physique et systémique, si l'ensemble de la population mondiale adoptait un niveau de consommation équivalent à celui d'une personne vivant avec plus de 50 \$ PPP par jour.

4.2.3 Place centrale de la pollution

La pollution occupe une place centrale dans la dynamique du scénario d'enrichissement. Dans le modèle, elle est représentée par un indice global de pollution persistante, sans distinction entre les différents polluants ni prise en compte explicite des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ce choix, cohérent pour un modèle conçu au début des années 1970, conduit à une représentation simplifiée des dynamiques environnementales contemporaines.

Contrairement à des modèles plus récents, comme *World7* développé par Sverdrup (Sverdrup *et al.*, 2019a), *World3* ne considère pas les mécanismes complexes du changement climatique ni les effets différenciés des polluants sur les écosystèmes.

Malgré cette simplification, le constat demeure clair : un enrichissement généralisé de la population provoque une explosion de la pollution globale, avec des niveaux trois à quatre fois supérieurs à ceux observés dans le scénario de classe moyenne (*SS₃*). Un tel monde paraît invivable : à l'horizon 2100, la pollution y est multipliée par près de dix-sept par rapport à son niveau de 2020. Il convient cependant de rappeler que l'indice utilisé ne se limite pas à la pollution atmosphérique ; il englobe l'ensemble des pressions environnementales du système, dont les effets s'accumulent jusqu'à congestionner la dynamique globale du modèle.

Dans les scénarios originaux du *Limits to Growth*, la pollution est maintenue sous contrôle artificiel afin de permettre l'étude d'autres dynamiques systémiques, comme la croissance démographique ou les transformations sociales. Ce traitement vise à éviter que la dégradation environnementale ne domine toutes les autres boucles de rétroaction et n'empêche l'analyse des effets propres aux variables socio-économiques.

Cependant, l'hypothèse même de maîtrise de la pollution demeure discutable. Le modèle suppose une réduction annuelle de 4 % à partir de 2002. Or, les données empiriques montrent l'inverse : depuis cette date, la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone est passée d'environ 365 en 2002 à plus de 420 ppm aujourd'hui (GIEC, 2023), soit une augmentation d'environ 15 % en un peu plus de deux décennies. Cela correspond à une hausse moyenne de 0,65 % par an, un rythme soutenu et constant qui contredit directement l'hypothèse de réduction inscrite dans le modèle. Loin d'amorcer une décrue, la pollution atmosphérique poursuit donc une progression régulière remettant en question les hypothèses de *LTG*.

4.2.4 Dynamiques excluant la pollution

Lorsque la pollution est neutralisée, les dynamiques systémiques demeurent inchangées. L'effondrement du système est observé dans tous les cas où un enrichissement généralisé

de la population est simulé. Une pression excessive continue d'être exercée sur les terres arables et sur les ressources naturelles, jusqu'à provoquer leur épuisement progressif. L'élévation du niveau de vie entraîne mécaniquement une intensification de la production industrielle, ce qui accroît la demande en biens et matières premières. Cette dynamique se traduit, dans les scénarios techniques (S_1SS_3 , S_1SS_4 , S_1SS_5), par une dégradation accélérée des stocks de ressources et une chute des capacités de production agricole. L'instabilité observée ne découle donc pas uniquement de la dégradation environnementale, mais résulte avant tout de la dynamique interne d'un modèle productiviste exacerbé, dans lequel la production et l'exploitation des ressources dépassent rapidement la capacité de régénération du système terrestre.

4.2.5 Conditions de stabilité d'un système d'enrichissement

Le seul cas de stabilité observé dans le scénario d'enrichissement correspond à une situation où le système est placé sous l'hypothèse d'un progrès technologique illimité. La réduction de la pollution y est supposée effective, de même qu'un ensemble d'avancées techniques majeures, notamment dans l'extraction des ressources et l'efficacité industrielle. Ces hypothèses, particulièrement ambitieuses, relèvent d'une approche technosolutionniste selon laquelle toute contrainte physique pourrait être compensée par l'innovation.

Dans un tel contexte, l'équilibre du système est mécaniquement maintenu : lorsque les limites matérielles sont abolies, les rétroactions négatives disparaissent et la population peut s'enrichir sans engendrer de tensions majeures. Le modèle simule alors un monde idéal où croissance économique, stabilité écologique et bien-être humain coexistent sans conflit apparent.

4.3 Analyse du scénario d'appauvrissement

Cette section se concentre sur l'analyse groupée du scénario d'appauvrissement de la population.

4.3.1 Représentation structurelle de l'enrichissement dans le modèle

De la même manière que pour le scénario d'enrichissement, le scénario d'appauvrissement (SS_2) ne doit pas être interprété comme une projection réaliste, mais comme une expérience de pensée visant à évaluer les conséquences physiques et systémiques d'une structure sociale extrême. Il s'agit d'un cadre théorique dans lequel la grande majorité de la population vit avec un revenu inférieur à 7 \$ PPP par jour, tandis qu'aucun groupe à haut revenu n'existe à l'horizon 2100. Une telle configuration demeure néanmoins difficile à envisager.

En effet, ce scénario impliquerait un déclassement massif des pays les plus riches, hypothèse peu crédible au regard des dynamiques actuelles. Comme le rappellent les travaux récents du GIEC (2023), les populations les plus pauvres et les pays du Sud sont aujourd'hui les plus exposés aux effets du dérèglement climatique et aux chocs environnementaux. Les pays développés, déjà responsables de la majorité de la consommation mondiale, restent quant à eux moins directement menacés à court terme. Imaginer leur appauvrissement global supposerait donc une redistribution profonde des richesses et des vulnérabilités, un processus hautement improbable dans le contexte socio-économique actuel.

4.3.2 Lecture globale du scénario : points positifs

Le scénario d'appauvrissement (SS_2) se distingue par un effondrement plus tardif et moins brutal que dans les autres structures sociales. La dynamique globale y demeure plus stable, le système restant plus longtemps en équilibre avant d'entrer dans une phase de déclin. Ce comportement s'explique par une moindre pression exercée sur le système : la réduction de la consommation et de la production industrielle limite les tensions internes, permettant au modèle d'être beaucoup plus résilient. En fin de simulation, les ressources naturelles présentent encore un niveau relativement élevé, ce qui rend parfois possible un redémarrage du système. Il convient toutefois de replacer ce phénomène dans son contexte. Comme le rappellent les auteurs du *Limits to Growth* dans la mise à jour de 2003 :

The exact model behavior after investment capital becomes insufficient is not important. We do not pretend to be able to predict what the world would do if it actually came to such a pass ; we pay no attention to the model runs after the point when an important variable begins rapid decline. (Meadows *et al.*, 2004, p.218)

Ainsi, l'intérêt de l'analyse ne réside pas dans le comportement post-effondrement, mais dans les conditions du système au moment de la rupture. Lorsqu'un rebond est observé, comme dans les scénarios S_2SS_2 ou S_7SS_2 , il ne doit pas être interprété comme une prédiction d'un redémarrage réel du monde, mais plutôt comme le signe que le système dispose encore, à ce stade, des ressources suffisantes pour en rendre un possible. Inversement, d'autres scénarios comme le S_4SS_2 ne montrent aucun redressement, malgré des stocks de ressources restants, en raison d'une dynamique industrielle trop dégradée pour permettre un redémarrage.

Une conclusion robuste peut ainsi être formulée : dans le scénario d'appauvrissement, l'effondrement est retardé, moins violent et laisse un système en meilleure santé à long terme. Cette trajectoire illustre qu'une réduction de l'activité économique peut, dans une certaine mesure, restaurer la capacité du système à se régénérer.

4.3.3 Lecture globale du scénario : points négatifs

Le scénario d'appauvrissement apparaît donc, à première vue, comme une trajectoire souhaitable du point de vue environnemental : il incarne une forte résilience écologique et exerce une pression moindre sur le système global.

Cependant, cette stabilité relative se fait au prix d'une détérioration marquée des conditions de vie. Sur le plan social, le scénario se traduit mécaniquement par une baisse significative du bien-être humain et par une fragilisation générale des populations. L'espérance de vie diminue, car la réduction du capital industriel limite à la fois la production agricole et l'accès aux services essentiels, notamment les soins de santé. La contraction du secteur industriel affecte ainsi directement la qualité de vie et la sécurité alimentaire.

L'*Human Welfare Index* (HWI) enregistre une baisse particulièrement prononcée. Comme rappelé dans l'équation 2.16, expliquée précédemment, cet indice dépend de trois composantes principales : l'espérance de vie, le niveau d'éducation et le niveau de vie décent. Le niveau d'éducation y est formulé comme une fonction croissante de la production industrielle par habitant (*IOPC*), tandis que le niveau de vie décent est directement déterminé par la structure sociale. Dans le scénario *SS₂*, ces deux variables connaissent une diminution marquée, entraînant mécaniquement une chute du HWI. Ainsi dans le scénario d'appauvrissement, même si les conditions environnementales s'améliorent nettement, les conditions de vie humaine connaissent une dégradation rapide.

4.4 Pauvreté subie et sobriété choisie

Bien que le scénario d'appauvrissement apparaisse comme le plus viable sur le plan systémique, il ne suffit pas à garantir un état stable et soutenable à long terme. Il convient donc d'explorer comment ces contraintes matérielles peuvent être orientées consciemment vers un modèle de sobriété planifiée, où la réduction de la consommation et de l'utilisation des ressources n'est plus subie, mais choisie et organisée.

4.4.1 Vers un scénario de sobriété planifiée

Dans un entretien donné à *ThinkerView* en septembre 2023 (Thinkerview, 2023), Jean-Marc Jancovici rappelait que la seule différence entre pauvreté et sobriété n'est pas physique mais sociale. Sur le plan matériel, ces deux situations se traduisent par des effets identiques : une réduction de la consommation, une moindre utilisation des ressources et un ralentissement de la production industrielle. Autrement dit, du point de vue physique, pauvreté et sobriété sont équivalentes.

À partir de cette distinction, il devient possible de différencier deux formes de contraction économique face à une même contrainte planétaire : la *pauvreté subie*, issue d'un effondrement non maîtrisé, et la *sobriété choisie*, fruit d'un choix collectif, délibéré et planifié.

Cette distinction éclaire sous un nouveau jour les résultats du scénario d'appauvrissement (SS_2). Ce dernier montre qu'une contraction économique non organisée permet de préserver les ressources naturelles et de renforcer la résilience écologique du système, mais au prix d'une forte dégradation du bien-être humain. Les secteurs vitaux, qui réagissent le plus mal à la baisse du capital industriel, en subissent directement les conséquences : la production alimentaire se contracte, les services de santé s'effondrent et l'éducation régresse. Ces trois dimensions constituent les principaux points de fragilité du modèle et expliquent la chute marquée du *Human Welfare Index* dans le scénario SS_2 .

Dans cette perspective, la sobriété planifiée peut être envisagée comme une réponse systémique aux résultats observés dans SS_2 . Si, d'un point de vue individuel, pauvreté et sobriété partagent la même réalité physique, d'un point de vue collectif, la différence tient à l'organisation : la sobriété est choisie, orientée et structurée. Elle ne viserait pas à relancer la croissance industrielle, mais à réorienter l'allocation du capital vers les secteurs qui soutiennent directement la résilience humaine du système :

- **l'agriculture**, pour stabiliser la production alimentaire et éviter les crises alimentaires ;
- **les infrastructures de soins**, afin de préserver l'espérance de vie et le bien-être général ;
- **l'éducation**, dont le niveau dépend du capital industriel par habitant et influence directement le HWI ;
- **la recherche**, pour maintenir une capacité minimale d'adaptation et d'innovation dans un monde contraint.

Une telle réallocation permet d'imaginer un nouveau scénario, noté SS_4 , que l'on pourrait qualifier de *sobriété planifiée*. Celui-ci reprendrait la structure sociale du scénario d'appauvrissement (SS_2), mais replacée dans un contexte d'organisation collective et d'allocation stratégique du capital. Parvenir à un monde stable impliquerait ainsi d'accepter une réduction du niveau matériel de vie, tout en investissant prioritairement dans les activités qui soutiennent durablement la vie humaine.

4.4.2 **Modèle exploratoire du scénario de sobriété planifiée (SS_4)**

Un modèle simplifié et non robuste a été élaboré afin d'explorer le scénario de *sobriété planifiée* (SS_4). Il reprend la structure démographique du scénario d'appauvrissement (SS_2), tout en forçant artificiellement certaines variables clés comme le système de santé, le système alimentaire et le système d'éducation à conserver des valeurs élevées au cours du temps. Ce modèle vise ainsi à représenter un monde où les ressources industrielles seraient prioritairement allouées à la préservation du bien-être humain.

Il convient toutefois de préciser que ce modèle n'a qu'une valeur illustrative. Il ne repose pas sur une dynamique interne cohérente et ne prend pas en compte les conditions politiques ou institutionnelles nécessaires à la mise en œuvre de telles mesures. En imposant directement le bon comportement de certaines variables, il contourne les boucles d'investissement propres à *World3*, rompant ainsi avec ses principes d'équilibre et de rétroaction.

Malgré ces limites, les résultats obtenus restent instructifs. Pour l'ensemble des scénarios techniques exploitables (de S_1 à S_8), le système apparaît nettement plus résilient : la population se stabilise, voire augmente légèrement, la base industrielle demeure modérée, héritée de la dynamique du scénario d'appauvrissement, et le *Human Welfare Index* se maintient à des niveaux élevés. Ces résultats, présentés à titre indicatif en figure 4.1, suggèrent qu'une réallocation ciblée du capital couplée à un appauvrissement matériel de la population pourrait représenter un système stable.

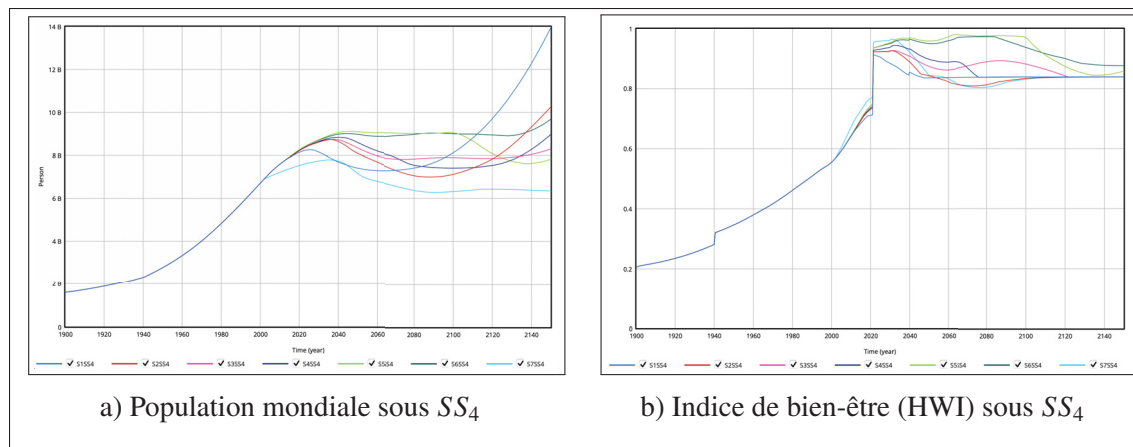


Figure 4.1 Évolution de la population et du HWI pour les scénarios techniques S_1 à S_8 sous la structure sociale SS_4

À titre indicatif, le scénario d'enrichissement (SS_1) a également été testé avec les mêmes mesures forcées que précédemment, visant à maintenir artificiellement de bonnes performances dans les secteurs de l'agriculture, de la santé et de l'éducation. Toutefois, ces ajustements ne suffisent pas à stabiliser le système. Comme le montre la figure 4.2, l'intensité industrielle propre à SS_1 exerce une pression trop forte sur les ressources naturelles et amplifie la pollution.

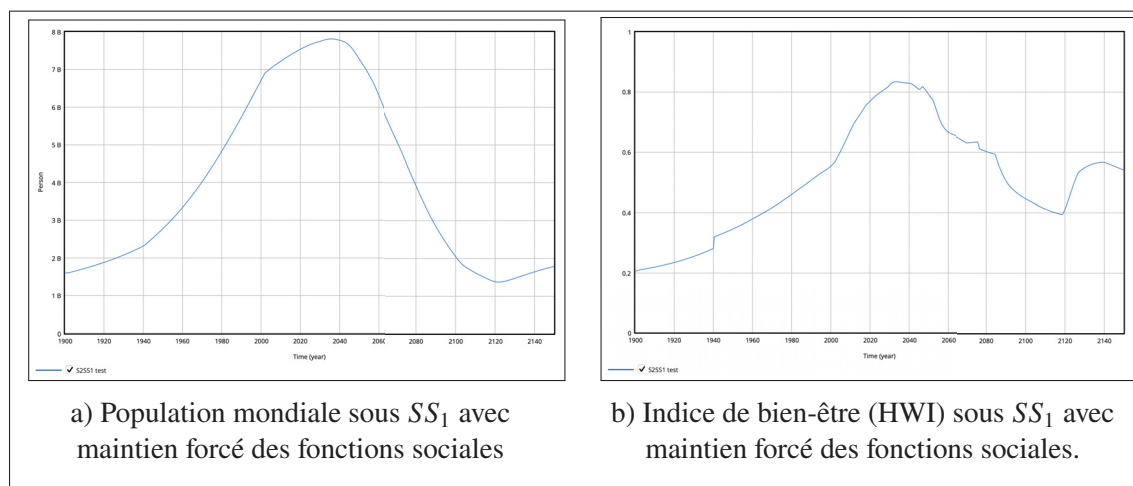


Figure 4.2 Évolution de la population et du HWI pour le scénario d'enrichissement (SS_1) couplé à un maintien artificiel des secteurs clés : santé, éducation et agriculture

Ce modèle, bien que non robuste, semble indiquer qu’aucune stabilité durable ne peut être atteinte sans une réduction significative de l’activité industrielle. Même lorsque des efforts considérables sont consentis dans les domaines de l’agriculture, de l’éducation ou des soins, ils ne suffisent pas à compenser le poids excessif de l’industrie sur le système.

Autrement dit, la stabilité du système mondial ne pourrait émerger que d’une combinaison entre sobriété matérielle et allocation ciblée du capital, privilégiant les domaines vitaux tels que l’agriculture, la santé, l’éducation, la recherche et la sécurité.

4.5 Principales limites du modèle

Les résultats présentés précédemment doivent être interprétés à la lumière des limites structurelles du modèle. Comme tout modèle systémique agrégé, celui-ci repose sur des hypothèses simplificatrices qui conditionnent la portée des scénarios étudiés. Cette section vise à expliciter les principales limites méthodologiques et conceptuelles de l’approche retenue, afin de mieux circonscrire ce que les dynamiques simulées permettent d’éclairer, mais aussi ce qu’elles laissent nécessairement de côté.

4.5.1 Problème de bilan de matière et d’énergie

La principale limite du modèle réside dans l’absence d’un véritable bilan de matière et d’énergie. Comme évoqué précédemment (voir section 2.4.4.2), la logique sous-jacente consiste à ajouter ou retrancher des investissements au capital industriel afin d’en moduler l’intensité. Ce mécanisme, bien que fonctionnel sur le plan dynamique, demeure empiriquement fragile : il engendre des créations ou des destructions de capital sans base matérielle ou énergétique clairement définie.

Cette simplification constitue une faiblesse importante du système, mais elle représentait le seul moyen efficace de faire varier la production industrielle sans altérer la structure de base du modèle *World3*. Les auteurs de *The Limits to Growth* avaient d’ailleurs adopté une approche similaire pour équilibrer les investissements dans les scénarios 8 à 10, en supposant que ces variations

provenaient de fluctuations de la consommation. Ce choix leur permettait de contourner la même contrainte structurelle.

Dans le présent modèle, cette contrainte a été assumée plutôt que contournée. Les variations d'investissement ou de dépréciation sont justifiées qualitativement par certains mécanismes endogènes :

- **surinvestissement** : la dynamique technologique et l'épargne peuvent entraîner une intensification des investissements productifs ;
- **sous-entretien et dépréciation** : le manque d'entretien des infrastructures ou les périodes de conflit peuvent provoquer une destruction accélérée du capital industriel ;
- **absence de base empirique** : ces mécanismes reposent sur des justifications qualitatives sans fondement physique ou financier explicite, ce qui empêche un suivi cohérent des flux de matière et d'énergie.

4.5.2 Risque de double comptage

Un autre problème, rarement évoqué mais pourtant important, concerne la possibilité d'un double comptage de l'enrichissement de la population. Il est en effet plausible que, dans le modèle initial du MIT, certaines dynamiques industrielles traduisent déjà implicitement une amélioration du niveau de vie, sans que cela soit formalisé comme tel. Après une relecture approfondie de l'ouvrage technique de référence (Meadows *et al.*, 1974), aucune mention explicite d'un tel mécanisme n'a toutefois été trouvée. Il reste donc difficile de déterminer si cet enrichissement est véritablement intégré dans la structure du modèle ou s'il en découle de manière indirecte à travers les relations entre capital, production et population.

Dans ce contexte, l'approche retenue, fondée sur la comparaison entre plusieurs structures sociales (enrichissement, appauvrissement et classe moyenne), ne vise pas à éliminer ce risque mais à mieux l'encadrer. En travaillant sur des écarts relatifs plutôt que sur des valeurs absolues, il devient plus cohérent d'interpréter les dynamiques observées : l'enjeu n'est plus de quantifier un enrichissement global, mais de comprendre comment une modification de la structure sociale

influence les trajectoires industrielles et démographiques. Ce raisonnement en relatif offre donc un cadre plus robuste pour discuter d'éventuels doublons implicites, sans pour autant les supprimer complètement.

4.5.3 Hypothèse de coefficients de pression industrielle constants

Une autre limite importante du modèle concerne l'hypothèse selon laquelle les coefficients de pression industrielle sont considérés comme constants dans le temps. Leur définition repose sur plusieurs approximations successives : le rapprochement entre émissions de carbone et activité industrielle, la conversion de données relatives (par fractiles de revenu) en seuils absolus de revenu, puis la transposition de ces rapports en coefficients de consommation industrielle. Ces transformations ont été nécessaires faute de données croisées reliant directement le revenu moyen d'un groupe à sa consommation matérielle, mais elles introduisent inévitablement une perte de robustesse empirique.

4.5.4 Problème de modélisation dans le HWI

Une autre limite importante concerne la construction du nouvel indice de bien-être (HWI), étroitement liée au Decent Living Standard Index (DLI). Dans sa forme actuelle, le DLI (et donc le HWI) repose sur une évaluation relative du niveau de vie, mesurant la satisfaction d'un groupe par rapport à une structure de référence plutôt qu'à un seuil absolu de conditions matérielles.

Cette approche comparative est pertinente pour analyser les inégalités sociales, mais elle introduit une ambiguïté conceptuelle dès lors que le modèle oscille entre logiques relatives (structure sociale) et absolues (niveau de vie réel). Selon la configuration, cette mécanique peut produire des effets inverses : dans un monde pauvre, c'est-à-dire à industrialisation très basse, une population composée uniquement de groupes riches peut afficher un HWI artificiellement élevé, tandis que dans un monde très industrialisé, la présence d'une majorité de populations modestes peut encore donner un HWI relativement faible, malgré des conditions globalement favorables.

Autrement dit, la cohérence entre richesse relative et bien-être absolu n'est pas garantie par la structure actuelle du modèle.

Pour limiter ce biais, il serait envisageable d'introduire dans le DLI des bornes absolues, définissant un seuil plancher et un seuil plafond d'IOPC correspondant respectivement à la satisfaction des besoins essentiels et à la saturation du bien-être matériel.

4.5.5 Absence de différenciation fonctionnelle entre classes sociales

Le modèle ne prend pas en compte plusieurs dynamiques sociales fondamentales, notamment la participation différenciée des groupes dans l'économie réelle. En pratique, les classes les plus pauvres assurent la majorité des fonctions productives, tandis que les élites exercent des rôles de contrôle et de captation du surplus. Cette répartition inégale du travail et du pouvoir, absente du modèle, influence pourtant fortement la stabilité des sociétés.

Le modèle *HANDY* de Motesharrei et al. (2014) illustre bien ce point en distinguant deux classes : les Commoners (travailleurs) et les Elites (accumulateurs). Il montre que la dépendance du système à la main-d'œuvre productive peut conduire à un effondrement social, lorsque les élites s'approprient une part excessive des ressources.

Il serait donc pertinent de formuler explicitement cette hypothèse dans le modèle socio-adapté de *World3*, en considérant que les classes les plus pauvres représentent le socle productif et que les plus riches en captent les bénéfices. Une telle structure permettrait de mieux saisir les effets de déséquilibre entre travail, consommation et pouvoir économique sur la stabilité globale du système.

4.6 Recommandations de recherche

Premièrement, travailler directement sur *World3* demeure un exercice particulièrement exigeant. Le modèle est à la fois complexe, densément interconnecté et déjà très abouti, ce qui rend toute modification délicate : la moindre altération peut rompre les équilibres internes qui en assurent

la cohérence. Lors d'échanges personnels, Ugo Bardi a d'ailleurs souligné l'intérêt de recréer un modèle plus simple avant d'aborder *World3*. Dans son article sur les mind-sized models (Bardi, 2013), il met en avant la valeur illustrative et exploratoire de ces micro-modèles, capables de tester des hypothèses précises sans la lourdeur structurelle d'un système global. Dans cette perspective, développer un micro-modèle dédié aux inégalités de consommation constituerait une piste pertinente pour isoler et mieux comprendre les effets redistributifs au sein du système socio-économique mondial.

Sur un plan plus technique, une orientation importante consisterait à affiner la structure démographique et sociale du modèle. Il s'agirait d'introduire des rétroactions plus détaillées entre population, classes sociales et fonctions économiques, en distinguant explicitement les rôles de production, de gouvernance, d'entretien du capital et de reproduction sociale. Une telle extension permettrait d'enrichir la dimension sociale du modèle tout en répondant aux limites techniques précédemment identifiées.

Un autre enjeu majeur serait de trouver des techniques de modélisation respectant les bilans de matière et d'énergie, afin d'éviter les créations ou pertes artificielles de capital industriel.

Parallèlement, il serait pertinent d'étendre la réflexion au-delà des inégalités de consommation pour y inclure les inégalités sociales au sens large. L'introduction d'un coefficient de Gini dynamique pourrait constituer un outil intéressant pour représenter ces écarts, tout en intégrant des boucles de rétroaction reliant la croissance économique, la cohésion sociale et le bien-être collectif. À titre d'exemple, une croissance rapide pourrait accentuer les écarts entre riches et pauvres, tandis qu'une dégradation des services publics ou des conditions sanitaires pourrait fragiliser la classe moyenne. Ce type de mécanismes, encore exploratoires, ouvrirait la voie à une analyse systémique de la polarisation sociale.

De manière complémentaire, la mise en place d'un indice de conflit représenterait un enrichissement conceptuel important. Cet indice pourrait mesurer les tensions socio-environnementales liées à la raréfaction des ressources et dépendre de la pollution, de la structure sociale ou encore des inégalités d'accès à l'eau, à l'alimentation et à l'énergie. Il pourrait exercer une rétroaction sur

la mortalité ou la stabilité sociale, traduisant les effets de la compétition pour les ressources dans un monde soumis à des contraintes croissantes.

Enfin, de nouveaux scénarios exploratoires pourraient être développés, tels que des trajectoires de polarisation (suppression de la classe moyenne) ou la disparition du groupe des revenus supérieurs à 50 \$ PPA/jour.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Afin de mieux comprendre la démarche entreprise, il convient de rappeler la problématique centrale qui a guidé ce travail : dans quelle mesure la structure sociale conditionne-t-elle la stabilité du système mondial face aux limites à la croissance ?

L'objectif principal était d'introduire une différenciation sociale au sein du modèle *World3*, afin d'évaluer comment la répartition des richesses et des consommations influence la trajectoire globale du système. Sur le plan méthodologique, il s'agissait de modifier certaines variables au cœur du modèle pour s'insérer directement dans ses boucles de rétroaction internes, tout en préservant la structure et la logique dynamiques originales.

Après une étude approfondie de la littérature consacrée à la dynamique des systèmes et aux modèles dérivés de *World3*, un nouveau modèle socio-adapté a été développé. L'ensemble des dynamiques démographiques a été reconstruit afin d'introduire une segmentation de la population selon trois groupes de revenu journalier. Ces groupes ont ensuite été associés à différents niveaux de consommation industrielle, permettant d'analyser leurs effets sur la production et les variables qui en découlent. Trois structures sociales ont été testées : un scénario d'enrichissement global, un scénario d'appauvrissement, et un scénario de développement de la classe moyenne. Les modifications ont été réalisées sur des secteurs centraux, notamment l'industrie, qui joue un rôle déterminant dans la dynamique du système global.

Les résultats obtenus sont particulièrement éclairants. Un enrichissement généralisé de la population entraîne une détérioration accélérée du système : la pression sur les ressources augmente, la pollution s'intensifie, les sols se dégradent et l'effondrement survient plus tôt. À l'inverse, un appauvrissement global ralentit ces dégradations et confère une plus grande résilience physique au système, mais au prix d'une fragilisation des structures sociales, notamment dans les domaines de la santé, de l'agriculture et de l'éducation.

Ce constat appelle une distinction essentielle entre pauvreté subie et sobriété choisie. Individuellement ces deux situations traduisent une baisse de la consommation matérielle, mais leur signification diffère profondément sur le plan collectif. La pauvreté est subie, désorganisée et source d'instabilité sociale, tandis que la sobriété repose sur une réduction planifiée et maîtrisée des flux matériels, pensée pour maintenir les conditions essentielles de bien-être et de stabilité.

Dans cette perspective, la solution ne réside pas dans la croissance, mais dans une réduction planifiée de la pression exercée sur le système-Terre, autrement dit, dans une forme d'appauvrissement organisé du monde industriel. En effet, le secteur industriel, responsable de la majorité des perturbations planétaires (épuiement des ressources, émissions polluantes, destruction de la biodiversité), doit être réduit à son strict nécessaire. L'idéal est donc un monde sobre matériellement, où l'industrie, bien que minimale, est utilisée de manière ciblée et intelligente pour soutenir quelques secteurs essentiels à la résilience humaine :

- l'agriculture, garante de la sécurité alimentaire ;
- l'éducation et la recherche, sources d'innovation et de cohésion collective ;
- la santé et la sécurité, garantes de la stabilité sociale.

Une première modélisation exploratoire, bien que non robuste, a confirmé cette hypothèse : la réduction de la capacité industrielle globale, lorsqu'elle est accompagnée d'une réallocation stratégique vers ces secteurs-clés, constitue la condition principale d'un avenir stable et durable.

Cette conclusion rejoint le propos de Donella Meadows dans *Leverage Points : Places to Intervene in a System* (Meadows, 1999) : les leviers d'action les plus puissants ne résident pas dans les paramètres techniques, mais dans le changement de paradigme, c'est-à-dire la transformation des valeurs et des finalités qui orientent un système. Le modèle développé ici ne prétend pas révéler des dynamiques inédites, mais s'inscrit dans la continuité du travail des auteurs de *The Limits to Growth*. Il réaffirme, sous un angle social, que la durabilité du système

mondial dépend moins de la croissance que de la capacité des sociétés à redéfinir leurs priorités et à réorienter l'usage du capital industriel vers la soutenabilité humaine.

Le monde de demain devra ainsi trouver un équilibre entre sobriété et planification, entre bien-être social et soutenabilité matérielle. Les logiques consuméristes actuelles, fondées sur l'enrichissement illimité, apparaissent dans le modèle comme fondamentalement incompatibles avec les limites planétaires. À l'inverse, une organisation collective et sociale consciente de ces contraintes pourrait transformer la réduction de la consommation matérielle en un choix éclairé, juste et émancipateur, condition nécessaire à la résilience du système global.

ANNEXE I

SCHÉMA DYNAMO DE *WORLD3*

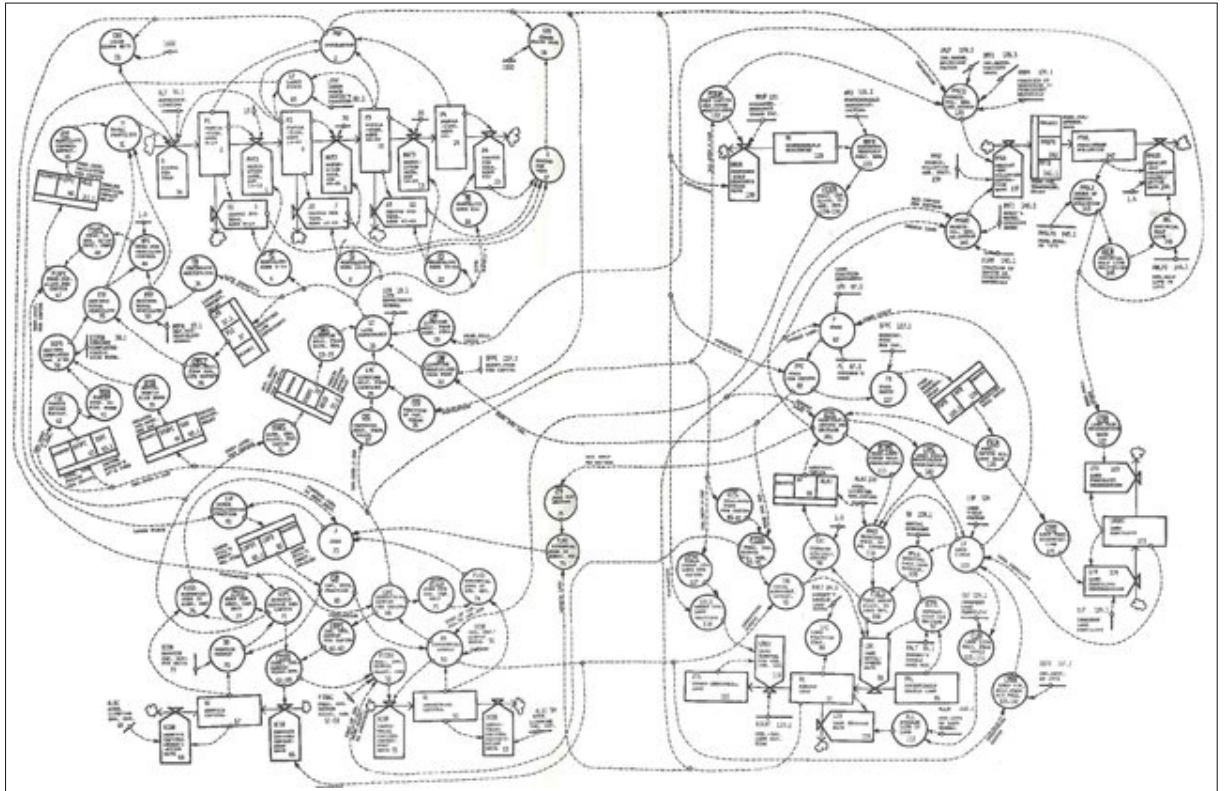


Figure-A I-1 Diagramme de stocks et de flux (représentation Dynamo) de la structure du modèle *World3*
Tirée de Meadows et al. (1974)

ANNEXE II

DIAGRAMMES LIÉS À LA DÉMOGRAPHIE DE *WORLD3*

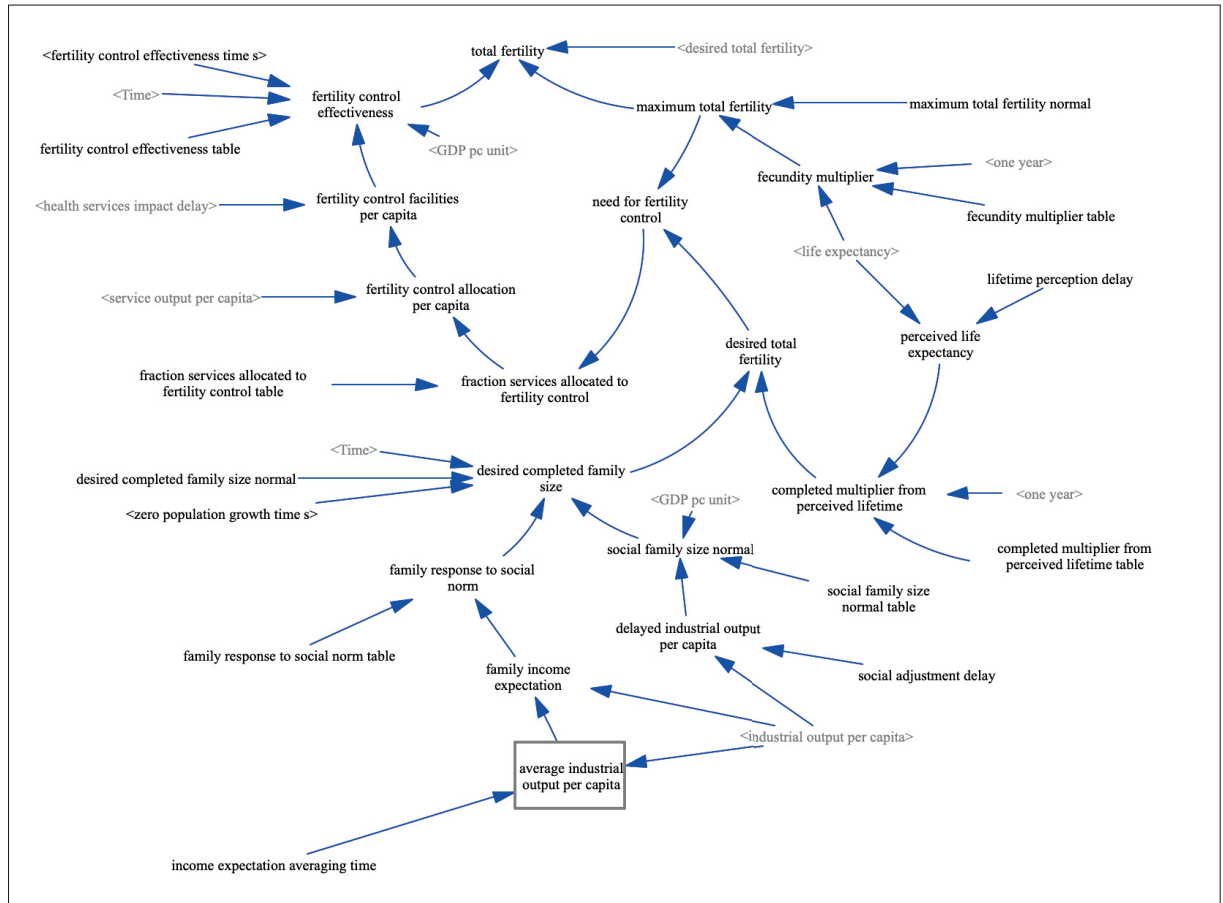


Figure-A II-1 Diagramme de stocks et de flux du secteur de la fertilité sous *World3*

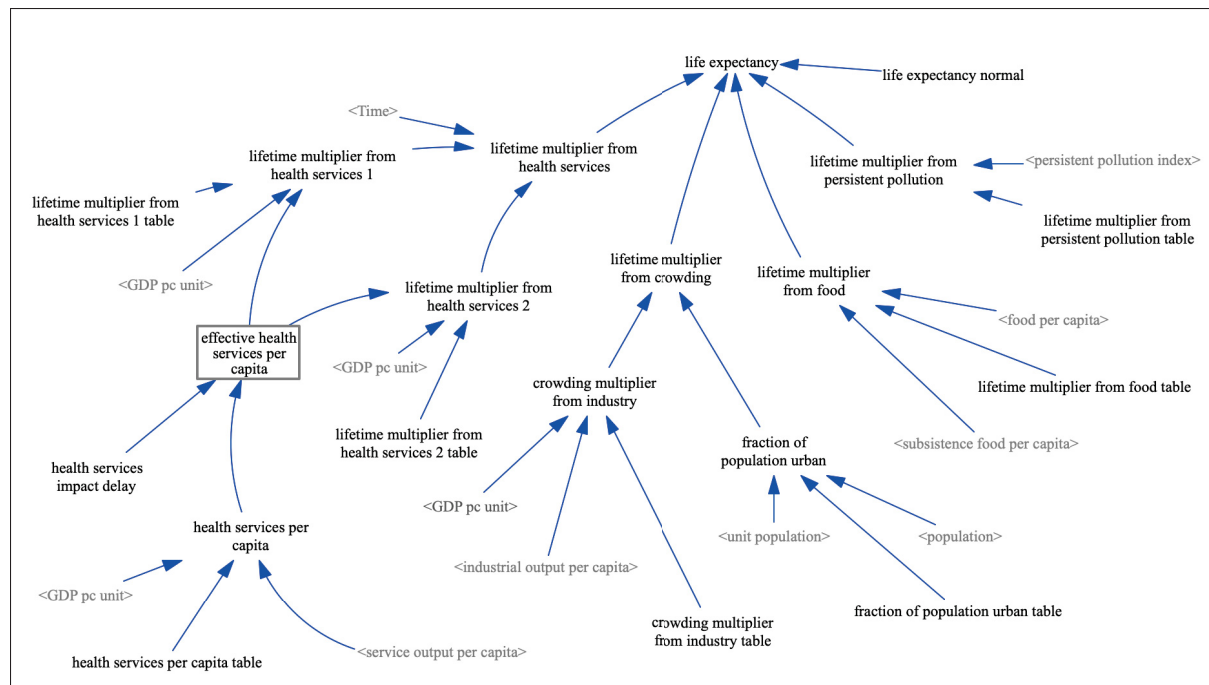


Figure-A II-2 Diagramme de stocks et de flux du secteur de l'espérance de vie sous *World3*

ANNEXE III

COMPARAISON DES MÉTHODES D'AJOUT D'UNE DIMENSION SOCIALE AU MODÈLE *WORLD3*

Tableau-A III-1 Comparaison des solutions de modélisation sociale

Solutions Critères	Intégration de nouveaux indicateurs	Segmentation du modèle existant	Modèle socio-démographique distinct
Représentativité sociale du modèle (5)	1	3	3
Facilité d'implémentation (2)	3	1	1
Disponibilité des données (3)	3	1	2
Fiabilité du modèle global (2)	3	3	2
Propagation d'erreur (1)	3	2	1
Lisibilité du modèle (2)	3	1	3
Flexibilité de modélisation (2)	1	1	3
Score	37	32	40

Ce tableau présente une analyse comparative des principales stratégies envisagées pour intégrer un volet social au modèle *World3*. Trois approches sont évaluées : l'ajout de nouveaux indicateurs sociaux au modèle existant, la segmentation des dynamiques internes selon des groupes sociaux distincts, et le développement d'un modèle socio-démographique séparé, couplé à *World3*.

La comparaison repose sur sept critères pondérés selon leur importance relative (entre parenthèses), tels que la représentativité sociale du modèle, la facilité d'implémentation, ou encore la lisibilité de l'ensemble. Chaque solution est notée sur chacun de ces critères, et un score global pondéré est ensuite calculé afin de dégager une préférence.

L'approche basée sur un modèle socio-démographique distinct se détache par son score total (40), notamment en raison de sa flexibilité et de sa lisibilité, bien qu'elle soit moins favorable en termes de facilité d'implémentation. Cette démarche multicritère, pondérée par coefficients, permet ainsi de justifier rationnellement le choix d'une solution en fonction des objectifs et des contraintes du projet.

ANNEXE IV

STRUCTURE DÉTAILLÉE DU SECTEUR DÉMOGRAPHIQUE SÉPARÉ PAR CLASSE SOUS VENSIM

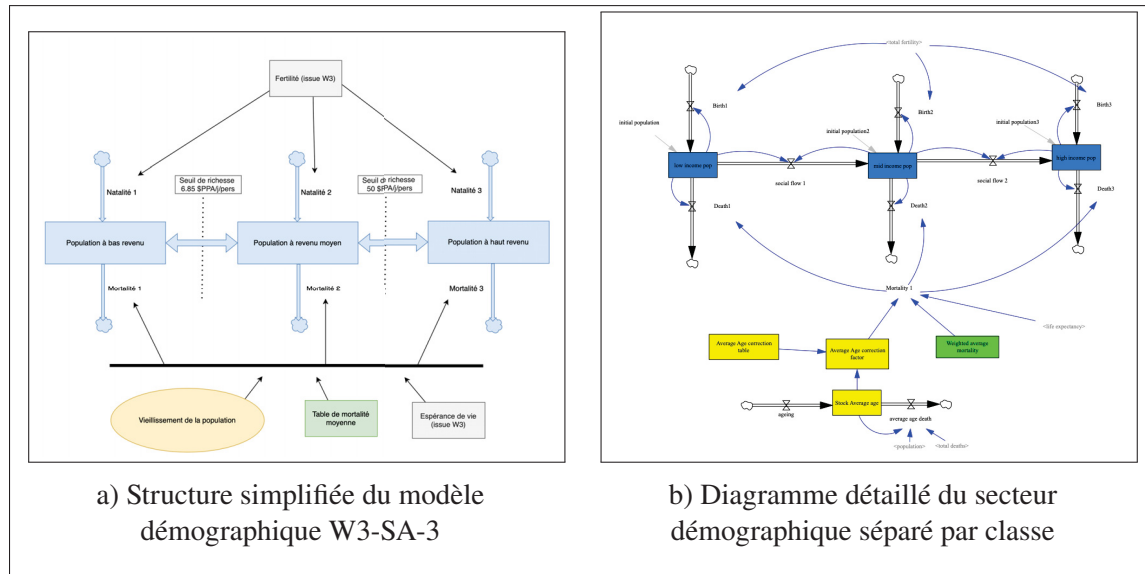


Figure-A IV-1 Comparaison entre le modèle démographique simplifié et le modèle détaillé pour W3-SA-3

Dans ces schémas, les trois stocks en bleu correspondent aux groupes sociaux définis par les seuils de revenu retenus.

Les éléments en gris représentent des variables endogènes héritées directement du modèle W3, assurant la continuité avec la structure initiale. La table de mortalité, représentée en vert, a été moyennée afin d'agréger les mortalités par âge et d'appliquer une mortalité globale commune aux groupes.

Enfin, le bloc jaune, introduit dans la version W3-SA-2, rend compte du mécanisme de vieillissement de la population, ce qui améliore la capacité du modèle à reproduire les évolutions démographiques de long terme.

ANNEXE V

STRUCTURE DÉTAILLÉE DU SECTEUR INDUSTRIEL DANS *WORLD3* SOUS VENSIM

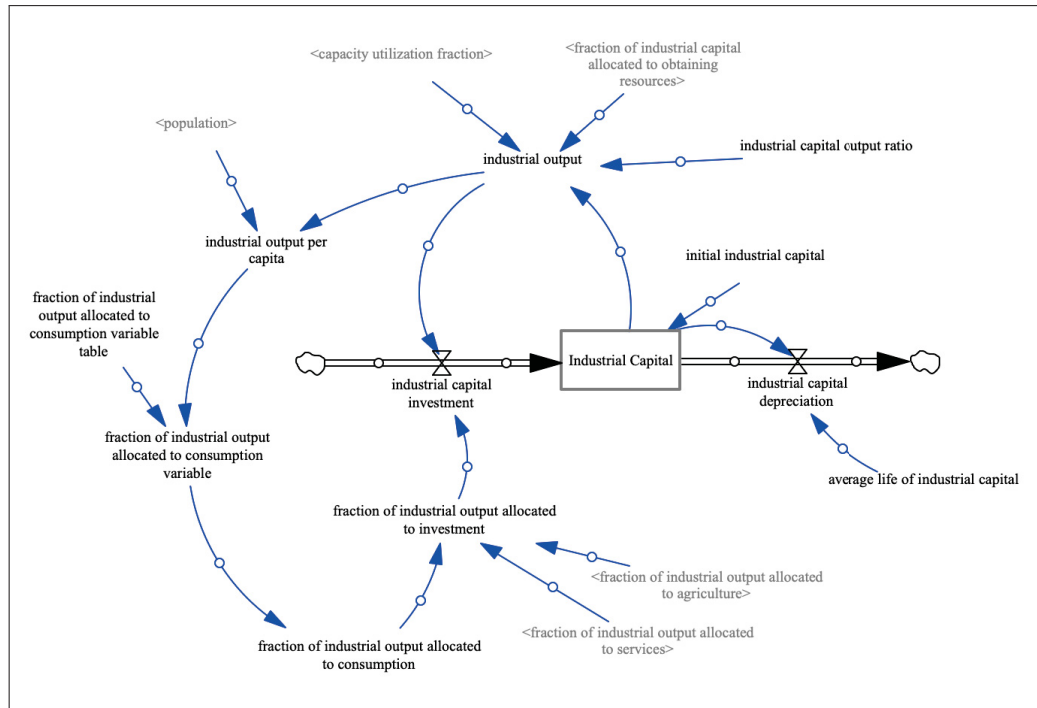


Figure-A V-1 Diagramme détaillé de stock et de flux du secteur industriel dans *World3*

ANNEXE VI

CALCUL DU COEFFICIENT DE CORRÉLATION DE PEARSON ENTRE PIB ET VALEUR MANUFACTURIÈRE

Objectif

L'objectif est de mesurer la proximité statistique entre la valeur ajoutée manufacturière (analogue à l'output industriel, IO) et le produit intérieur brut (analogue à la richesse de la population), sur la période 1997–2023. Pour cela, le coefficient de corrélation de Pearson a été utilisé. Ce coefficient, compris entre -1 et 1 , évalue la force et la direction d'une relation linéaire entre deux variables quantitatives.

Les données ont été recueillies auprès de la Banque mondiale (World Bank, 2025b,a), puis analysées dans *Python* afin de calculer le coefficient de corrélation de Pearson. Le script correspondant est présenté ici.

Code Python

```

1 import numpy as np
2
3 gdp_list = [7.82848E+12, 7.95752E+12, 8.05454E+12, 8.20651E+12, 8.46644E+12,
4             8.61636E+12, 8.59945E+12, 8.95281E+12, 9.2533E+12, 9.93813E+12,
5             1.04715E+13, 1.04358E+13, 9.87899E+12, 1.03523E+13, 1.07457E+13,
6             1.10787E+13, 1.12939E+13, 1.18445E+13, 1.23078E+13, 1.22607E+13,
7             1.27175E+13, 1.31289E+13, 1.3539E+13, 1.30825E+13, 1.37134E+13,
8             1.37295E+13, 1.46498E+13]
9
10
11 industry_list = [4.35422E+13, 4.47839E+13, 4.63944E+13, 4.85017E+13, 4.94912E+13,
12                  5.0645E+13, 5.22196E+13, 5.45617E+13, 5.67652E+13, 5.93033E+13,
13                  6.19041E+13, 6.3188E+13, 6.23542E+13, 6.5177E+13, 6.73587E+13,
14                  6.91823E+13, 7.1181E+13, 7.34222E+13, 7.57236E+13, 7.78548E+13,
15                  8.05457E+13, 8.32006E+13, 8.54553E+13, 8.30206E+13, 8.83502E+13,
16                  9.13187E+13, 9.40065E+13]
17
18
19 M = np.column_stack((gdp_list, industry_list))
20 corr = np.corrcoef(M.T)[0, 1]
21 print("\nCorrelation_de_Pearson:", round(corr, 6))

```

Extrait VI.1 Script Python pour le calcul du coefficient de Pearson

Résultats

L'exécution du programme retourne une corrélation de Pearson de 0,996139. Cette valeur, très proche de 1, traduit une corrélation linéaire positive quasi parfaite entre la croissance du PIB mondial et celle de la valeur ajoutée manufacturière.

ANNEXE VII

APPROFONDISSEMENT SUR LA LOGIQUE DU FLUX D'INVESTISSEMENT INDUSTRIEL

Comparaison des méthodes d'intégration de la pression sociale dans l'investissement industriel

Plusieurs pistes ont été envisagées avant d'aboutir à l'introduction du flux additionnel basé sur l'indice I_{PI} .

Dans une première approche, il paraissait naturel de chercher à multiplier directement $IOPC$ par IPI_{norm} afin d'intégrer l'effet de la structure sociale sur la production industrielle par tête. Toutefois, une telle formulation conduit immédiatement à une boucle de rétroaction positive sans limite : plus $IOPC$ augmente, plus l'investissement s'accroît, et ainsi de suite, ce qui entraîne une divergence du système. Ce comportement est symptomatique d'une tentative d'introduire une logique linéaire dans une structure fondamentalement non linéaire.

Une seconde possibilité consistait à définir une trajectoire cible dans une simulation annexe $IOPC_{target}(t) = IOPC(t) \cdot IPI_{norm}(t)$, puis à piloter le modèle en boucle fermée pour que l'output industriel suive cette commande. Cette solution contourne effectivement le problème de linéarité, mais elle reste insatisfaisante : elle force les variables à adopter des valeurs prédéterminées, sans tenir compte des limites physiques et endogènes du système (ressources, pollution, inerties). Une telle approche s'écarte de la logique même de la dynamique des systèmes.

L'option retenue consiste donc à introduire un flux d'investissement additionnel proportionnel à l'écart de l'indice de pression industrielle :

$$I_{PI}(t) = \gamma \cdot IOPC(t) \cdot (IPI_{norm}(t) - 1) \quad (A \text{ VII-1})$$

Cette formulation présente l'avantage de laisser évoluer librement les boucles existantes, l'ajustement passant par le capital industriel IC et non par une contrainte imposée sur $IOPC$. Elle respecte ainsi les inerties et les limites structurelles du modèle, tout en introduisant une sensibilité sociale explicite.

Calibration du paramètre γ

La question du dimensionnement de γ reste cependant centrale. Pour cela, la variable $IOPC_{\text{target}}$ conserve une utilité, non pas comme consigne imposée, mais comme point de comparaison. Elle fournit un ordre de grandeur des effets attendus d'une variation de l'indice de pression. Le calibrage de γ consiste alors à ajuster ce paramètre de sorte que la trajectoire du modèle avec I_{PI} s'approche transitoirement de $IOPC_{\text{target}}$, tout en laissant ensuite les contraintes physiques et endogènes reprendre le contrôle de la dynamique. Cette démarche permet de garantir à la fois la cohérence théorique et la plausibilité numérique des résultats.

Pour illustrer la démarche de calibration du paramètre γ , il est pris le cas du scénario 3 de $W3$ avec un enrichissement de la population (S_3SS_1). Dans cette configuration, l'indice de pression industrielle augmente fortement et conduit à une intensification de la demande de production par tête.

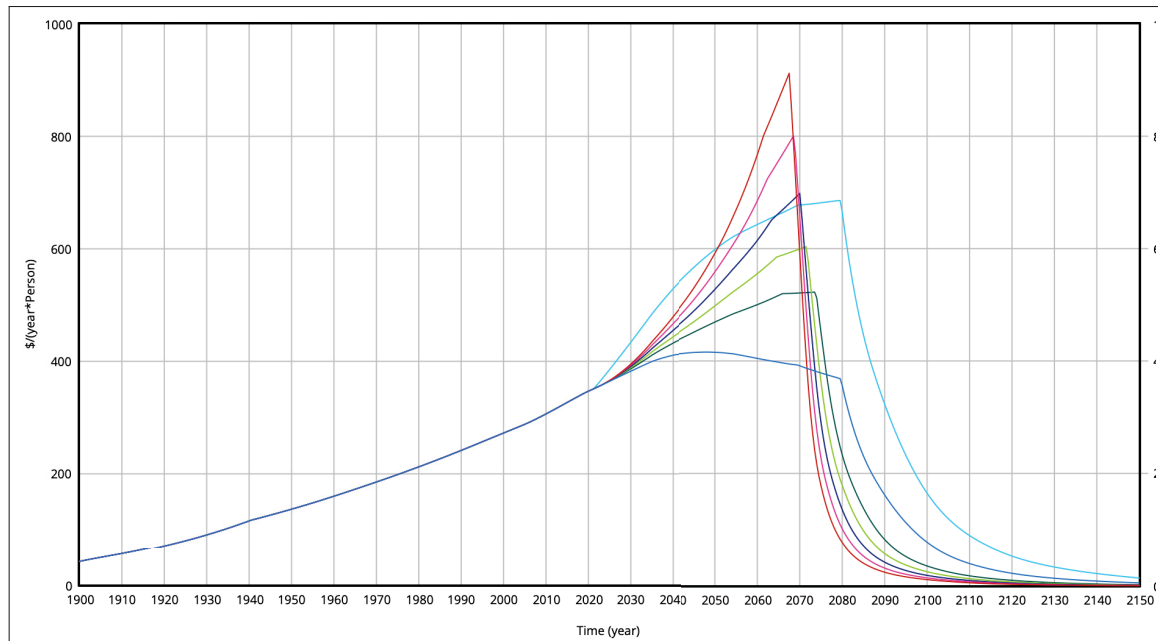


Figure-A VII-1 Calibration de γ dans le scénario S_3SS_1
 Courbe bleu foncé : $IOPC_{base}$; courbe bleu turquoise : $IOPC_{target}$; courbes colorées : $IOPC$ simulé pour $\gamma \in [0.1, 0.3]$; courbe noire ($\gamma = 0.2$) retenue comme référence

Une première référence est donnée par la trajectoire cible $IOPC_{target} = IOPC_{base} \cdot IPI_{norm}$. Comme le montre la courbe bleu turquoise, cette trajectoire est irréaliste : elle traduit une croissance industrielle par tête sans limite physique, aboutissant à une production artificiellement élevée et dépourvue d'effondrement anticipé. Ce résultat confirme qu'il n'est pas possible de forcer directement le système à suivre $IOPC_{target}$.

Il a été fait varier γ entre 0.1 et 0.3 afin de moduler la puissance du flux additionnel I_{PI} . La courbe bleu foncé représente le scénario de base de *World3* (sans investissement additionnel). Les courbes colorées montrent les différentes trajectoires obtenues avec I_{PI} : plus la valeur de γ est élevée, plus l'accumulation de capital est rapide et plus l'effondrement survient tôt, en raison de l'épuisement accéléré des ressources.

Le choix du paramètre γ repose sur la recherche d'une cohérence tendancielle avec $IOPC_{target}$, tout en respectant les inerties et les contraintes physiques du système. Dans ce cas, la trajectoire

obtenue avec $\gamma = 0.2$ (courbe noire) apparaît comme la plus satisfaisante : elle suit la tendance générale de la cible, tout en intégrant un délai compatible avec la dynamique sociale et sans créer de dérive irréaliste.

Sans détailler ici l'ensemble des 30 combinaisons simulées (10 scénarios de *World3* croisés avec 3 structure sociales), le calibrage global conduit à retenir une valeur de $\gamma = 0.2$, qui s'avère la plus robuste et la plus cohérente dans la majorité des cas.

Limites et mise en place d'un garde-fou

L'introduction du flux I_{PI} vise à rapprocher transitoirement la trajectoire du modèle de la consigne $IOPC_{target}$, tout en préservant son caractère endogène. Ainsi, les contraintes physiques (ressources, sols, pollution) continuent d'agir comme régulateurs principaux du système.

Problèmes identifiés

Certains scénarios (par exemple S_6SS_1 ou S_XSS_2) révèlent néanmoins des comportements extrêmes. Dans le premier cas, l'absence de limites physiques suffisantes conduit à une croissance illimitée des investissements, entraînant une explosion de l'output industriel. Dans le second, les investissements additionnels peuvent rester négatifs alors même que l'IOPC est déjà très faible, ce qui accentue artificiellement l'effondrement du système.

Définition des seuils

Pour encadrer ces dynamiques, il a été décidé d'annuler les investissements additionnels ($I_{add} = 0$) dès que l'IOPC franchit certaines valeurs seuils. Ces seuils visent à représenter les limites physiques implicites contenues dans l'indice de pression industrielle (IPI). Leur rôle est de borner la dynamique du modèle en évitant qu'elle ne s'emballe à la hausse ou à la baisse.

La solution retenue est de prendre comme point de référence la valeur observée en 2021, fixée à $IOPC_{2021} = 350$, et de la pondérer par la valeur stationnaire de l'IPI. Par stationnaire, il est

entendu la valeur de l'IPI atteinte à long terme lorsque la structure démographique se stabilise, c'est-à-dire autour de 2100.

$$IOPC_{\text{seuil},i} = IPI_{\text{stationnaire},i} \times IOPC_{2021} \quad (\text{A VII-2})$$

Ainsi, dans les scénarios d'enrichissement ou de développement de la classe moyenne, le seuil est supérieur à $IOPC_{2021}$, tandis qu'il devient inférieur dans les scénarios d'appauvrissement. Cette approche reste imparfaite, car elle introduit une certaine rigidité et repose sur une valeur arbitraire ($IOPC_{2021}$) choisie comme référence. Néanmoins, elle est retenue comme compromis : elle permet d'intégrer une borne exogène à la dynamique de l' IO , afin de gérer certains cas limites et d'éviter des trajectoires irréalistes.

Méthode

Sur cette base, le flux d'investissements additionnels I_{add} est défini comme suit :

$$I_{\text{add}} = \begin{cases} 0, & \text{si Trigger} = 1 \vee \\ & (\text{scenario social} = 1 \wedge IOPC \geq IOPC_{\text{sat1}}) \vee \\ & (\text{scenario social} = 2 \wedge IOPC \leq IOPC_{\text{sat2}}) \vee \\ & (\text{scenario social} = 4 \wedge IOPC \geq IOPC_{\text{sat3}}) \\ (IPI_{\text{structure pop norm}} - 1) \cdot \gamma \cdot IO, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A VII-3})$$

Tant qu'aucune condition n'est remplie, le flux dépend de la pression industrielle liée à la structure démographique. Dès qu'un seuil est franchi, ou que le verrou est activé, les investissements sont annulés.

Verrouillage (Trigger)

Afin d'éviter à la fois une réactivation indéfinie du flux et des oscillations intenses lorsque l'IOPC reste proche du seuil, un mécanisme de mémoire a été introduit. Le franchissement est mémorisé par un stock binaire, *Trigger*, initialisé à 0 et passant définitivement à 1 lors du premier dépassement. Une fois activé, ce verrou empêche tout retour en arrière et stabilise la dynamique. Le flux qui alimente ce verrou est défini par :

$$\text{TriggerFlux} = \begin{cases} \frac{1}{\text{TIME STEP}}, & \text{si additional demand driven investment} = 0 \wedge \text{Trigger} = 0 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A VII-4})$$

Lorsqu'*additional demand driven investment* devient nul pour la première fois et que *Trigger* vaut encore 0, une impulsion de hauteur $1/\text{TIME STEP}$ est injectée. Cette valeur intégrée fait passer *Trigger* à 1, ce qui mémorise définitivement le franchissement et coupe le flux d'investissement additionnel.

Bilan

Ce garde-fou permet de contrôler les trajectoires irréalistes : il bloque la croissance explosive comme la poursuite d'investissements négatifs, mais introduit une discontinuité brutale dans le système. Il ouvre néanmoins la possibilité de nouveaux comportements. Ainsi, dans le scénario S_2SS_2 , l'effondrement lié à l'appauvrissement de la population survient plus rapidement que la dégradation des ressources, de sorte que le système conserve une base suffisante pour initier une nouvelle phase de croissance. Ce phénomène ne peut pas être étudié quantitativement, car l'influence de la structure sociale est alors verrouillée ($I_{\text{add}} = 0$) et la dynamique qui s'enclenche n'est plus dictée par les mécanismes sociaux, mais par le modèle de base. Il constitue néanmoins un indicateur de résilience : il montre que le système reste capable de redémarrer si certaines conditions matérielles sont réunies.

$$Flux_{\text{IPI}} = \gamma \cdot Production\ Industrielle \cdot (IPI - 1) \quad (\text{A VII-5})$$

$$IPI = \sum_{i=1}^3 pop_i \cdot w_i \quad (\text{A VII-6})$$

ANNEXE VIII

SYNTHÈSE COMPARATIVE DES SCÉNARIOS TECHNIQUES ET SOCIAUX

Tableau-A VIII-1 Résumé par scénario : hypothèses, comportement du modèle de base et variantes sociales (SS_j) — Scénarios S1 à S5

Scénario & hypothèses	W3 (référence)	Scénarios sociaux	Comportement synthétique (1900–2300)
S1 — BAU Aucune politique ; tendances prolongées.	Effondrement rapide (industrie puis population) par pollution et raréfaction des ressources. HWI en forte baisse.	SS_1	Même dynamique, effondrement précoce ; effets sociaux négligeables.
		SS_2	Idem avec léger décalage temporel ; HWI déjà faible.
		SS_3	Crise fulgurante neutralisant les écarts sociaux.
S2 — Ressources ×2 $S2 = S1 +$ stock de ressources doublé.	Crise par pollution et dégradation des sols malgré abondance ; HWI en recul.	SS_1	Surcroissance ; pollution $\approx \times 3,5$; effondrement violent.
		SS_2	Pression moindre ; rebond court puis effondrement différé ; HWI bas.
		SS_3	Trajectoire médiane ; déclin plus doux.
S3 — Dépollution $S3 = S2 +$ abattement annuel de 4 % à la source.	Crise retardée ; les sols finissent par céder ; HWI en baisse.	SS_1	Gains annulés par surcroissance ; famine rapide ; HWI très bas.
		SS_2	Pollution contenue, crise tardive ; services faibles → HWI bas.
		SS_3	Compromis : rendements stabilisés un temps ; déclin inévitable.
S4 — Rendements agricoles ↑ $S4 = S3 +$ amélioration technologique des rendements.	Répit court ; érosion accélérée ; effondrement anticipé. HWI en baisse.	SS_1	Pic alimentaire puis érosion forte ; effondrement abrupt.
		SS_2	Sols mieux préservés ; crise plus tardive ; HWI faible.
		SS_3	Intermédiaire : bref rétablissement, puis déclin.
S5 — Sols protégés $S5 = S4 +$ politiques anti-érosion et conservation des terres.	Protection efficace après ~2050 ; rupture par rareté des ressources. HWI en baisse.	SS_1	Rupture industrielle nette (ressources) ; pollution encore élevée ; HWI faible.
		SS_2	Chute retardée ; soins/éducation fragiles ; HWI très bas.
		SS_3	Trajectoire lissée ; déclin final par ressources.

Tableau-A VIII-2 Résumé par scénario : hypothèses, comportement du modèle de base et variantes sociales (SS_j) — Scénarios S6 à S11

Scénario & hypothèses	W3 (référence)	Scénarios sociaux	Comportement synthétique (1900–2300)
S6 — CT (Comprehensive technology) S6 = S5 + progrès ciblés sur l'extraction non renouvelables.	Limites physiques repoussées ; déclin par crise des coûts ; HWI $\approx$ niveau 2000.	SS ₁	Bien-être élevé puis crise des coûts ; HWI correct.
		SS ₂	Stocks préservés mais services dégradés ; HWI < 0,2 ; espérance de vie $\sim$ 30 ans.
		SS ₃	Meilleur compromis : stabilité prolongée, HWI élevé ; déclin lent.
S7 — Démographie régulée S7 = S6 + politique de natalité (2 enfants/femme, BC 100 %).	Pics adoucis ; dynamique proche de S2 ; HWI en recul.	SS ₁	Pollution forte ; crises multiples ; effondrement violent.
		SS ₂	Pollution réduite ; ressources préservées ; sursis ; HWI bas.
		SS ₃	Médian : pics moindres ; effondrement modéré.
S8–S11 — Équilibres industriels S8–S11 = S7 + pilotage de l'IOPC (avec variantes dépollution, contrôle démographique, techno globale).	Pilotage industriel vers une consommation cible ($\sim$ \$350/an/personne).	<i>Scénarios non retenus dans la version sociale : double pilotage IOPC/IPI provoquant des trajectoires incohérentes.</i>	

BIBLIOGRAPHIE

- Abraham, Y.-M. (2019). *Guérir du mal de l'infini : produire moins, partager plus, décider ensemble*. Montréal : Écosociété.
- Abraham, Y.-M. (2024a). La décroissance soutenable comme politique de sobriété. *Lien social et Politiques*, (93), 23–41. doi : 10.7202/1115786ar.
- Abraham, Y.-M. (2024b). *La décroissance est une désacralisation*. HEC Montréal, Montréal, Canada, Article transmis par l'auteur par courriel. Repéré à ManuscritnonpubliÃl.
- Alkire, S., Kövesdi, F., Scheja, E. & Vollmer, F. (2023). Moderate Multidimensional Poverty Index : Paving the Way Out of Poverty. *Social Indicators Research*, 1–37. doi : 10.1007/s11205-023-03134-5. Epub ahead of print.
- Bailey, R. (1989). Dr. Doom. *Forbes*, 45.
- Banque mondiale. [Consulté en avril 2025]. (2025). Poverty and Inequality Platform (PIP). Repéré à <https://pip.worldbank.org/home>.
- Bardi, U. (2008). Peak oil and The Limits to Growth : two parallel stories. Repéré le 2024-11-25 à <http://theoildrum.com>.
- Bardi, U. (2011a). Cassandra's curse : how "The Limits to Growth" was demonized. Repéré le 2024-11-21 à <https://cassandralegacy.blogspot.com>.
- Bardi, U. (2011b). *The Limits to Growth Revisited*. Springer.
- Bardi, U. (2013). Mind Sized World Models. *Sustainability*, 5(3), 896–911. doi : 10.3390/su5030896. Number : 3 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Berger, E. (2015). *LES PARITÉS DE POUVOIR D'ACHAT (PPA)*.
- Berlan, A. (2023). *Terre et liberté : La quête d'autonomie contre le fantasme de délivrance*. Paris : La Découverte.
- Bolt, J. & Van Zanden, J. L. (2020). Maddison style estimates of the evolution of the world economy. A new 2020 update. Repéré à <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/publications/wp15.pdf>.
- Box, G. E. P. (1976). Science and Statistics. *Journal of the American Statistical Association*, 71(356), 791–799. doi : 10.1080/01621459.1976.10480949.

- BP p.l.c. (2023). *Energy Outlook 2023*. London : BP. Repéré à <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2023.pdf>.
- Bystroff, C. (2021). Footprints to singularity : A global population model explains late 20th century slow-down and predicts peak within ten years. *PLOS ONE*, 16(5), e0247214. doi : 10.1371/journal.pone.0247214. Publisher : Public Library of Science.
- 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, 271–273. doi : 10.14512/gaia.21.4.9.
- CDB. (2010). *Strategic Plan for Biodiversity 2011-2020 and the Aichi Biodiversity Targets*. Montréal : Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (CDB). Repéré à <https://www.cbd.int/doc/strategic-plan/2011-2020/aichi-targets-en.pdf>.
- CDB. (2020). *Global Biodiversity Outlook 5*. Montréal : Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (CDB).
- Chancel, L., Piketty, T., Saez, E., Zucman, G. et al. (2022). *World Inequality Report 2022*. Paris. Repéré à <https://wir2022.wid.world>.
- Chancel, L., Bothe, P. & Voituriez, T. (2023). *Climate Inequality Report 2023*. World Inequality Lab. Repéré à <https://wid.world/www-site/uploads/2023/01/CBV2023-ClimatInequalityReport-3.pdf>.
- Clancy, T., Langerudi, S. P. & Zaini, R. (2023). Never the strongest : reconciling the four schools of thought in system dynamics in the debate on quality. *System Dynamics Review*, 39(3), 277–294. doi : 10.1002/sdr.1740.
- CNULCD. (2022). *Perspectives territoriales mondiales. 2^e édition : Résumé à l'intention des décideurs*. Bonn : Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD).
- Cobham, A. & Sumner, A. (2013). Is It All About the Tails ? The Palma Measure of Income Inequality. *Center for Global Development Working Paper*, (343). Repéré à <https://www.cgdev.org/publication/it-all-about-tails-palma-measure-income-inequality>. Accessed : 2025-10-14.
- Cole, H. S. D. & Freeman, C. (1973). *Models of Doom : A Critique of the Limits to Growth* (éd. First Edition). New York : Universe Pub.

- de Jongh, D. C. J. (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.
- 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*.
- Dixson-Declève, S., Gaffney, O., Rockström, J., Ghosh, J., Randers, J. & Stoknes, P. (2023). *Earth for All : A Survival Guide for Humanity*.
- Dutreuil, S. (2013). Comment le modèle Daisyworld peut-il contribuer à l’hypothèse Gaïa ? Dans Silberstein, F. V. e. M. (Éd.), *Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation* (vol. 1). Repéré à <https://hal.science/hal-01109173>.
- Edmonds, B. & Moss, S. (2005). From KISS to KIDS : An ‘Anti-simplistic’ Modelling Approach. Dans Davidsson, P., Logan, B. & Takadama, K. (Éds.), *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation* (vol. 3415, pp. 130–144). Berlin, Heidelberg : Springer. doi : 10.1007/978-3-540-32243-6_12.
- Epstein, J. M. (2008). Why Model ? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(4). Repéré à <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html>. Article 12.
- European Commission. (2020). *The European Green Deal*. Brussels : Publications Office of the European Union. Repéré à <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>.
- European Union, O. O. f. E. C.-o. a. D. (2024). *Eurostat-OECD Methodological Manual on Purchasing Power Parities (2023 edition)* (éd. OECD Publishing). Paris. Repéré à <https://doi.org/10.1787/c9829192-en>.
- FAO, FIDA, UNICEF, PAM & OMS. (2025). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2025*. Rome : FAO.
- Feenstra, R. C., Inklaar, R. & Timmer, M. P. (2015). The Next Generation of the Penn World Table. *American Economic Review*, 105(10), 3150–3182. doi : 10.1257/aer.20130954.
- Flipo, F. (2019). *La décroissance*. Paris : Éditions Le Cavalier Bleu.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Waltham, Massachusetts, USA : Pegasus Communications.
- Forrester, J. W. (1969). *Urban Dynamics*. Waltham, Massachusetts, USA : Pegasus Communications.

- Forrester, J. W. (1971a). Counterintuitive behavior of social systems. *Theory and Decision*, 2(2), 109–140. doi : 10.1007/BF00148991.
- Forrester, J. W. (1971b). *World Dynamics*. Cambridge, Massachusetts, USA : Wright-Allen Press.
- Gastwirth, J. (1972). The Estimation of the Lorenz Curve and Gini Index. *The Review of Economics and Statistics*, 54, 306-16. doi : 10.2307/1937992.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, MA : Harvard University Press.
- GIEC. (2023). *Sixième rapport d'évaluation du GIEC — Rapport de synthèse*. Nations unies.
- Gradin, C. (2024). Global Income Inequality in the Long Run : Trends, Drivers, and Data Challenges. *World Development*, 178, 106601. doi : 10.1016/j.worlddev.2024.106601.
- Grimm, V. & Railsback, S. F. (2005). *Individual-based Modeling and Ecology*. Princeton : Princeton University Press.
- Guliyeva, N., Bhardwaj, E. & Becker, C. (2025, June). Exploring the Viability of the Updated World3 Model for Examining the Impact of Computing on Planetary Boundaries. *Proceedings of LIMITS 2025 : 11th Workshop on Computing within Limits*. doi : 10.48550/arXiv.2510.07634.
- Haberl, H., Wiedenhofer, D., Virág, D. & et al. (2020). A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II : synthesizing the insights. *Environmental Research Letters*, 15(6), 065003. doi : 10.1088/1748-9326/ab842a.
- Hall, C. A. & Day, J. W. (2009). Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil. *American Scientist*, 97(3), 230–237. doi : 10.1511/2009.78.230.
- Hearne, J. W. (1987). An approach to resolving the parameter sensitivity problem in system dynamics methodology. *Applied Mathematical Modelling*, 11(4), 315–318. doi : 10.1016/0307-904X(87)90148-X.
- Hecht, J. (1974). Thinking about the future. A critique of the limits to growth. *Population*, 29(6), 1177–1178. Repéré à https://www.persee.fr/doc/pop_0032-4663_1974_num_29_6_16442. Company : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS Distributeur : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS Institution : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS Label : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS Publisher : Institut national d'études démographiques.

- Helbing, D. (2013a). Globally networked risks and how to respond. *Nature*, 497(7447), 51–59. doi : 10.1038/nature12047.
- Helbing, D. (2013b). Globally networked risks and how to respond. *Nature*, 497(7447), 51–59. doi : 10.1038/nature12047.
- 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.
- Hickel, J. (2019). An Open Letter to Steven Pinker (and Bill Gates). *Jacobin*. Repéré à <https://jacobin.com/2019/02/steven-pinker-global-poverty-neoliberalism-progress>. Accessed : YYYY-MM-DD.
- Hickel, J. (2020). *Less is More : How Degrowth Will Save the World*. London : Penguin Random House.
- Human Mortality Database. [Accessed in 2024.]. (2024). Human Mortality Database. University of California, Berkeley and Max Planck Institute for Demographic Research. Repéré à <https://www.mortality.org/>.
- International Labour Organization, I. D. E. (2025). ILO Modelled Estimates. Repéré à <https://rshiny.ilo.org/dataexplorer>.
- IRENA. (2019). *Global Energy Transformation : A Roadmap to 2050 (2019 Edition)*. Abu Dhabi : IRENA. Repéré à https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_GLOBAL_ENERGY_TRANSFORMATION_2019.pdf.
- Jackson, T. (2009). *Prosperity Without Growth : Economics for a Finite Planet*. London : Earthscan. doi : 10.4324/9781849774338.
- Jackson, T. & Webster, R. (2016). *Limits Revisited—A review of the limits to growth debate. A report to the All-Party Parliamentary Group on Limits to Growth*.
- Joakim, E., Mortsch, L., Oulahan, G., Harford, D., Klein, Y., Damude, K. & Tang, K. (2016). Using system dynamics to model social vulnerability and resilience to coastal hazards. *International Journal of Emergency Management*, 12, 366. doi : 10.1504/IJEM.2016.079846.
- Jochaud Du Plessix, M. (2019). Analyse du modèle World3 : sensibilité, dynamique, et pistes d'évolution.
- Kallis, G. (2018). *Degrowth*. Newcastle upon Tyne : Agenda Publishing. doi : 10.2307/j.ctv5cg82g.

- Kaysen, C. (1972). The Computer That Printed Out WOLF. *Foreign Affairs*, 50(4), 660–668. doi : 10.2307/20037939.
- Krammer, S. M. S. et al. (2022). Income inequality, social cohesion, and crime : An analysis of the conditional dynamics. *PLOS ONE*, 17(6), e0269160. doi : 10.1371/journal.pone.0269160.
- Latouche, S. (2006). *Le pari de la décroissance*. Paris : Fayard.
- Legavre, J. (2022). *MyWorld3 : Equations and Explanations*.
- Li, Y. & Devine, F. (2011). Is social mobility really declining ? intergenerational class mobility in Britain in the 1990s and the 2000s. *Sociological Research Online*, 16(3), 28–41. doi : 10.5153/sro.2424.
- Lotka, A. J. (1925). Elements of Physical Biology. *Nature*, 116(2917), 461–461. doi : 10.1038/116461b0.
- Lovelock, J. E. & Watson, A. J. (1983). Biological Homeostasis of the Global Environment : The Parable of Daisyworld. *Tellus*, 35B(3), 284–289.
- Meadows, D. L., Behrens, W. W., Meadows, D. H., Naill, R. F., Randers, J. & Zahn, E. K. O. (1974). *Dynamics of Growth in a Finite World*. Cambridge, MA : Wright-Allen Press.
- Meadows, D. H. (1999). *Leverage Points : Places to Intervene in a System*. Hartland, VT. Repéré à <https://donellameadows.org/archives/leverage-points-places-to-intervene-in-a-system/>.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. & Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books.
- Meadows, D. H., Meadows, D. & Randers, J. (1992). *Beyond the Limits : Global Collapse or a Sustainable Future*. Chelsea Green Publishing.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L. & Randers, J. (2004). *The Limits to Growth : The 30-Year Update*. Chelsea Green Publishing.
- Milanovic, B. (2016). *Global Inequality : A New Approach for the Age of Globalization*. Cambridge, MA : Harvard University Press. Repéré à <https://doi.org/10.4159/9780674969797>.
- 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.

- Nebbia, G. (1997). *Futuribili, New Series*, 4(3), 149–82.
- Nebel, A., Kling, A., Willamowski, R. & Schell, T. (2024). Recalibration of limits to growth : An update of the World3 model. *Journal of Industrial Ecology*, 28(1), 87–99. doi : 10.1111/jiec.13442. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jiec.13442>.
- Nordhaus, W. D. (1973). World Dynamics : Measurement Without Data. *The Economic Journal*, 83(332), 1156–1183. doi : 10.2307/2230846.
- Nordhaus, W. D. (1992). Lethal Model 2 : The Limits to Growth Revisited. *Brookings Papers on Economic Activity*, 23(2), 1–60. doi : 10.2307/2534581.
- Nørgaard, J., Ragnarsdóttir, K. V. & Peet, J. (2010). The History of the Limits to Growth. *Solutions Journal*, 1(2), 59–63.
- OECD. [Accessed : 2025-10-14]. (2024). OECD Income Distribution Database (IDD). Paris. Repéré à <https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=IDD>.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2011). *Towards Green Growth*. Paris : OECD Publishing. doi : 10.1787/9789264111318-en.
- Organisation internationale du travail. [Consulté le 2 avril 2025]. (2024). ILOSTAT Data Explorer. Repéré à https://rshiny.ilo.org/dataexplorer5/?lang=en&id=POP_XWAP_SEX_AGE_NB_A.
- Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons : The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge : Cambridge University Press. doi : 10.1017/CBO9780511807763.
- Our World In Data. [Accessed in 2024. Data compiled and processed from multiple international sources including the UN, ILO, Maddison Project, and HMD]. (2024). Our World In Data Database. Global Change Data Lab. Repéré à <https://ourworldindata.org>.
- Pasqualino, R., Jones, A. W., Monasterolo, I. & Phillips, A. (2015). Understanding Global Systems Today—A Calibration of the World3-03 Model between 1995 and 2012. *Sustainability*, 7(8), 9864–9889. doi : 10.3390/su7089864. Number : 8 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Passell, B. & Ross, M. R. a. (1972). The Limits to Growth. *The New York Times*. Repéré à <https://www.nytimes.com/1972/04/02/archives/the-limits-to-growth-a-report-for-the-club-of-romes-project-on-the.html>.

- PNUE. (2024). *Emissions Gap Report 2024 : No more hot air . . . please!* Nairobi : Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE).
- Pruyt, E. (2013). *Small System Dynamics Models for Big Issues : Triple Jump towards Real-World Dynamic Complexity*.
- Ragnarsdóttir, V. (2024). *Earth4All system dynamics model (E4A) and Earth for All book (EarthforAll) – preliminary review*.
- Railsback, S. F. & Grimm, V. (2012). *Agent-Based and Individual-Based Modeling : A Practical Introduction*. Princeton : Princeton University Press.
- Raizin, A. (2025). *Intégration des inégalités de genre dans un modèle de dynamique des systèmes global : une mise à jour du rapport The Limits to Growth*. (Mémoire de maîtrise en génie, énergies renouvelables et efficacité énergétique, École de technologie supérieure (ÉTS), Université du Québec, Montréal, Canada). Repéré à Sous la direction de Daniel Rousse et Yves-Marie Abraham.
- Randers, J. (2024). Jorgen Randers response to A scientific review of the Earth4All “model”, presented to the Club of Rome.
- Raworth, K. [Oxfam Discussion Paper]. (2012). A Safe and Just Space for Humanity : Can We Live Within the Doughnut? Oxford, United Kingdom. Repéré à <https://policy-practice.oxfam.org/resources/a-safe-and-just-space-for-humanity-can-we-live-within-the-doughnut-210490/>.
- Raworth, K. (2017). *Doughnut Economics : Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist*. London : Random House Business Books.
- Riley, J. C. (2005). Estimates of Regional and Global Life Expectancy, 1800-2001. *Population and Development Review*, 31(3), 537–543. Repéré à <https://www.jstor.org/stable/3401478>. Publisher : [Population Council, Wiley].
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, , Chapin, F. S., Lambin, E., 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. (2009). A Safe Operating Space for Humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475. doi : 10.1038/461472a.
- SAGE Publications. (2023). Correlation, Pearson. Dans *SAGE Research Methods*. Repéré à <https://methods.sagepub.com/reference/encyclopedia-of-survey-research-methods/n94.xml>.

- Sale, K. (1985). *Dwellers in the Land : The Bioregional Vision*. San Francisco : Sierra Club Books.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. & Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis : The Primer*. Chichester : John Wiley & Sons. doi : 10.1002/9780470725184.
- Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M. & Tarantola, S. (2019). Global Sensitivity Analysis : An Introduction for the Management of Scientific Models. *Risk Analysis*, 39(4), 906–928. doi : 10.1111/risa.13376.
- Sandbach, F. (1978). The Rise and Fall of the Limits to Growth Debate. *Social Studies of Science*, 8(4), 495–520. Repéré à <http://www.jstor.org/stable/284820>. Publisher : Sage Publications, Ltd.
- Say, J.-B. (1803). *Traité d'économie politique*. Paris : Deterville.
- Schiopu, O. (2017). *Analyse des limites physiques à la croissance économique*. (Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, Sherbrooke).
- Schöngart, J., Frieler, K., Lange, S., Levermann, A., Otto, F. E. L., Seneviratne, S. I. & Meinshausen, M. (2025). High-income groups disproportionately contribute to climate extremes worldwide. *Nature Climate Change*, 15, 1–10. doi : 10.1038/s41558-025-02325-x. Epub ahead of print.
- Scolnik, H. D. (1978). World modeling. *Optimization Techniques Part 1*, pp. 87–89. doi : 10.1007/BFb0007225.
- Shorrocks, A., Davies, J., Lluberas, R. & Waldenström, D. (2023). *Global Wealth Report 2023*. Zurich. Repéré à <https://www.credit-suisse.com/about-us/en/reports-research/global-wealth-report.html>.
- Simmons, M. R. (2000). Revisiting The Limits to Growth : Could The Club of Rome Have Been Correct, After All ?
- Solow, R. M. (1973). Is the End of the World at Hand? *Challenge*, 16(1), 39–50. doi : 10.1080/05775132.1973.11469961.
- Sterman, J. (2002a). All models are wrong : Reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*, 18, 501–531. doi : 10.1002/sdr.261.
- Sterman, J. (2002b). *System Dynamics : Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Repéré le 2025-01-14 à <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/102741>.

- Sterman, J. (2006). Learning from Evidence in a Complex World. *American journal of public health*, 96, 505–14. doi : 10.2105/AJPH.2005.066043.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics : Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston : McGraw-Hill.
- Sverdrup, H., Olafsdottir, A. H., Ragnarsdottir, K. V., Stjernquist, I., Schlyter, P. & Parker, J. (2019a). *Development of the WORLD7 global integrated assessment model* (Rapport n°4.3).
- Sverdrup, H., Olafsdottir, A. H., Ragnarsdottir, K. V., Koca, D. & Lorenz, U. (2019b). The WORLD6 Integrated System Dynamics Model : Examples of Results from Simulations. Dans Ludwig, C. & Valdivia, S. (Éds.), *Progress Towards the Resource Revolution* (pp. 68–76). Villigen PSI and St. Gallen, Switzerland : World Resources Forum.
- Sverdrup, H., Lorenz, U. & Ólafsdóttir, A. (2020). The world at the ultimate crossroads. *Sustainable Development and Resource Productivity*, 11–28. doi : 10.4324/9781003000365-3.
- Sverdrup, H. U., Olafsdottir, A. H., Ragnarsdottir, K. V., Koca, D. & Lorenz, U. 9. The WORLD6 Integrated System Dynamics Model : Examples of Results from Simulations.
- Tang, V. & Vijay, S. Origins, development, and future prospects of a method. *System Dynamics*.
- Thinkerview. [Disponible sur YouTube : <https://www.youtube.com/watch?v=UZX6KKin6m4> (consulté le 9 octobre 2025)]. (2023). Entretien avec Jean-Marc Jancovici.
- 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.
- Turner, G. (2013). The Limits to Growth Model is More Than a Mathematical Exercise ; Reaction to R. Castro. 2012. Arguments on the Imminence of Global Collapse Are Premature when Based on Simulation Models. *GAIA* 21/4 : 271– 273. *GAIA*, 22, 18–19.
- Turner, G. (2014). Is Global Collapse Imminent ? An Updated Comparison of The Limits to Growth with Historical Data.
- Turner, G. M. (2012). On the Cusp of Global Collapse ? Updated Comparison of *The Limits to Growth* with Historical Data. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 21(2), 116–124. doi : 10.14512/gaia.21.2.10.

- United Nations. (2024). *World Population Prospects 2024, Online Edition* (Rapport n°28). New York. Repéré à <https://www.un.org/development/desa/pd/world-population-prospects-2024>.
- United Nations Development Programme. (2001). *Human Development Report 2001 : Making New Technologies Work for Human Development*. New York : Oxford University Press.
- UNU-WIDER. [Accessed : 2025-10-14]. (2023). World Income Inequality Database (WIID), Version 31 May 2023. Helsinki. Repéré à <https://www.wider.unu.edu/database/world-income-inequality-database-wiid>.
- van den Bergh, J. C. J. M. (2011). Environment versus growth — A criticism of “degrowth” and a plea for “a-growth”. *Ecological Economics*, 70(5), 881–890. doi : 10.1016/j.ecolecon.2010.09.035.
- Vola, P. (2024). *Les effets de la croissance sur la ressource en eau : une mise à jour du rapport The Limits to Growth*. (Mémoire de maîtrise avec projet en énergies renouvelables et efficacité énergétique, École de technologie supérieure (ÉTS), Université du Québec, Montréal, Canada). Repéré à Sous la direction de Daniel R. Rousse et Yves-Marie Abraham.
- Volterra, V. (1926). Variazioni e fluttuazioni del numero d’individui in specie animali conviventi. *Memorie della Reale Accademia Nazionale dei Lincei*, 2(Série VI), 31–113.
- World Bank. (2024). *Poverty, Prosperity, and Planet Report 2024 : Pathways Out of the Polycrisis*. Washington, DC. Repéré à <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-2123-3>.
- World Bank. [Consulté le 14 septembre 2025]. (2025a). GDP (constant 2015 US\$). Repéré à <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD>.
- World Bank. [Consulté le 14 septembre 2025]. (2025b). Manufacturing, value added (constant 2015 US\$). Repéré à <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.KD>.
- World Inequality Lab. [Consulté en mars 2025]. (2023). World Inequality Database (WID). Repéré à <https://wid.world>.
- Yamaji, K., Matsushashi, R., Nagata, Y. & Kaya, Y. (1993). A study on economic measures for reduction in Japan. *Energy Policy*, 21(4), 481–488. Étude incluant l’identité de Kaya comme outil pour analyser les mesures économiques de réduction des émissions.
- Zhang, T., Zhang, Y., Wan, G. & Wu, H. (2020). Poverty reduction in china and india : a comparative study. *The Singapore Economic Review*, 65(supp01), 95–115. doi : 10.1142/S0217590820440026. Publisher : World Scientific Publishing Co.

Zijdeman, R. & Ribeira da Silva, F. (2015). Life Expectancy at Birth (Total). IISH Data Collection.
Repéré le 2025-04-10 à <https://datasets.iisg.amsterdam/dataset.xhtml?persistentId=hdl:10622/LKYT53>.