



PIE ETE-MSXS-01

The Limits to Growth : an optimization-centered revisit of the World3 model

Auteurs :

M. Emile DOSSO

M^{me} Clarisse FENAUX

M. Clément MABILEAU

M^{me} Lou MURAZ

M. Baptiste RONFARD

M. Matthieu MBARGA

OWONA

Client :

Ian COSTA-ALVES

20 mars 2024

Abstract

Dans cette étude, nous avons revisité le modèle World3 développé par Meadows et al. et qui a donné le très célèbre rapport *The Limits to Growth*. Nous avons montré qu'il était possible de reformuler le modèle World3 utilisé pour le rapport Meadows en se basant sur l'optimisation et non plus seulement sur la résolution d'équations différentielles comme dans le modèle World3 original. Après un travail de collecte de données, nous avons calibré le secteur population de World3 afin d'ajuster les variables pour coller à la réalité. Ce premier travail peut être généralisé à tous les secteurs pour calibrer le modèle entier à l'aide des données collectées. Enfin, nous avons proposé des pistes de reformulation du modèle World3 pour introduire des variables de décision à la place d'équations pour pouvoir résoudre le problème par optimisation.

Mots-Clés : Systèmes Dynamiques, Calibration, Optimisation multi-disciplinaire, Changement climatique, Croissance

Table des matières

Introduction	5
1 Organisation des activités	6
1.1 Organisation générale	6
1.1.1 Contexte et objectifs	6
1.1.2 Répartition du travail	7
1.1.3 Communication au cours du projet	7
1.2 Outils utilisés	7
1.2.1 Product Breakdown Structure (PBS) et Work Breakdown Structure (WBS)	7
1.2.2 Planning	8
1.2.3 Suivi des risques	8
1.3 Retour critique	10
2 Rapport technique	11
2.1 Présentation World3	11
2.1.1 Contexte, but et implémentations	11
2.1.2 Détails des sections	13
2.2 Recherche de données	19
2.2.1 Population	19
2.2.2 Capital	20
2.2.3 Agriculture	22
2.2.4 Ressources	22
2.2.5 Pollution	24

2.3	Calibration	24
2.3.1	Théorie	24
2.3.2	Implémentation	25
2.3.3	Analyse des résultats	27
2.4	Reformulation en un modèle basé sur l'optimisation	32
2.4.1	Théorie	32
2.4.2	Implémentation	33
2.4.3	Analyse des résultats	36
	Conclusion	44

Introduction

Face aux enjeux de la transition écologique, les activités humaines sont soumises à de fortes contraintes socio-économiques et techniques. En particulier, la disponibilité des ressources minières et énergétiques dans un monde « fini » pose la question de la soutenabilité de la croissance économique mondiale. Dans ce contexte, la modélisation de la trajectoire des activités humaines peut se révéler un outil d'aide à la décision très précieux. C'est dans ce but que le modèle d'évaluation intégré « World 3 » a été développé par le MIT (USA), afin de simuler les interactions entre l'évolution de la population humaine, la croissance économique, la production alimentaire, la pollution ou encore les ressources non renouvelables [2].

L'IRT Saint-Exupéry, en partenariat avec l'ISAE-SUPAERO, s'intéresse aux problématiques liées à l'optimisation pour la conception d'objets complexes (avions et satellites par exemple). C'est dans ce cadre que l'IRT Saint-Exupéry a conçu une librairie python open source d'optimisation multidisciplinaire [1]. L'objectif du PIE est de développer un outil permettant de construire des trajectoires optimales de développement humain en s'appuyant sur le modèle intégré « World 3 », tout en explorant les avantages d'utiliser une approche d'optimisation pour ces modèles d'évaluation intégrés.

Chapitre 1

Organisation des activités

1.1 Organisation générale

1.1.1 Contexte et objectifs

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un Projet Ingénierie et Entreprise par six élèves de troisième année à l'ISAE-Supaero au cours du premier semestre de cours. Il s'inscrit dans le cadre de la thèse de Ian Costa-Alves sur les méthodes numériques de simulation sur les systèmes dynamiques et son application pour le design avion dans la transition énergétique.

Notre objectif était d'utiliser le modèle World3 sous l'implémentation `pyworld3` puis sous l'implémentation de Ian Costa-Alves et d'y ajouter des algorithmes d'optimisation pour différents cas d'application (soit pour le calibrer ou bien le piloter de façon optimale).

Le code initial était basé uniquement sur la résolution numérique d'équations différentielles. L'objectif global du projet était de reformuler le modèle pour que la détermination de la valeur de certains paramètres se base sur l'optimisation. Cela peut se scinder en trois sous-objectifs :

- Création d'une base de données historique et régionale adaptée aux besoins du programme
- Calibration des paramètres qui n'ont pas de correspondance dans les bases de données publiques.
- Création de scénarios pour le futur grâce à des simulations basées sur l'optimisation.

1.1.2 Répartition du travail

Après une première phase de recherche bibliographique, nous avons scindé notre groupe de six personnes en deux sous-groupes. Nous avons formé un premier groupe de modélisateurs, constitué de quatre personnes. L'objectif était de comprendre le rôle joué par chaque secteur, les variables qui y intervenaient et les hypothèses faites dans le modèle initial implémenté sur pyworld3, pour être ensuite capable de chercher des bases de données utiles pour la calibration dans chaque secteur. Au sein de ce groupe, chacun s'est concentré sur un ou deux des cinq secteurs spécifiques de World3. Le second groupe a été un groupe de codeurs, formé par deux élèves. Le travail de ce groupe a été axé sur la prise en main et l'utilisation des outils informatiques existants pour la calibration et l'optimisation, notamment la librairie Gemseo. Les modélisateurs ayant fini leurs missions en avance ont ensuite rejoint le groupe des codeurs.

En ce qui concerne notre gestion du temps de travail, nous nous sommes réunis à chaque créneau prévu dans l'emploi du temps pour le PIE, ce qui nous a permis de minimiser le temps à consacrer à ce projet hors de l'emploi du temps proposé.

1.1.3 Communication au cours du projet

Dès le début du projet, nous avons utilisé l'application Teams pour communiquer au sein du groupe et avec notre client Ian Costa-Alves. Cela a permis de centraliser les travaux de chacun ainsi que les références utiles qui pouvaient être fournies par notre client. Cet outil s'est avéré pertinent. Chaque travail individuel était documenté de sorte qu'il puisse être relu et compris facilement par les autres membres de l'équipe.

1.2 Outils utilisés

Parmi les différents outils de gestion de projet étudiés ce semestre, nous avons privilégié plus amplement certains en fonction des besoins spécifiques de notre projet, comme nous l'expliquerons en détail dans les sous-sections suivantes.

1.2.1 Product Breakdown Structure (PBS) et Work Breakdown Structure (WBS)

Le PBS et le WBS sont des outils essentiels de la gestion de projet, permettant une décomposition organisée et méthodique des sous-composants et des tâches inhérentes à un projet.

Le PBS se focalise sur la division du produit final en composants plus petits, offrant ainsi une vision globale de sa conception. Établir ce PBS nous a permis de mieux appréhender les attentes de l'école et du client vis-à-vis du projet. Nous avons ainsi segmenté le projet en différentes parties, telles que les livrables requis par l'école (rapport, plan de développement, fiche de synthèse, support de présentation de la soutenance finale), ainsi que les autres volets comprenant les bases de données historiques et régionalisées, les codes de calibration et d'optimisation, et la bibliographie sur d'autres modèles similaires à World3, ainsi que sur les diverses méthodes d'optimisation et les bases de données publiques.

De son côté, le WBS se concentre sur la subdivision des diverses tâches nécessaires à l'achèvement de chaque composant du produit. La construction du WBS nous a été d'une grande aide afin de se répartir en équipes de compétences pour les différentes tâches identifiées dans le WBS. De plus, cela nous a permis d'établir un planning cohérent, offrant une vision à long terme du projet, ainsi que de définir et de gérer les risques potentiels rencontrés tout au long du processus.

1.2.2 Planning

La définition d'un planning, au début du semestre et pour l'ensemble du temps imparti nous a été profitable. Cela nous a permis d'emblée d'avoir une idée claire quant au travail à réaliser pour chaque groupe et cela nous a évité de nous laisser déborder par le temps.

Ainsi, nous nous étions donné pour objectif de terminer nos recherches bibliographiques sur World3 et la calibration pour le début du mois de Novembre, pour pouvoir embrayer sur la création des bases de données et sur la prise en main des outils de modélisation, de façon séparée entre les groupes de codeurs et de modélisateurs.

En outre, nous avons rencontré un léger retard sur les parties de calibration et de base de données, qui nous ont pris respectivement une et deux semaines de plus que prévu, mais le planning imposé au début du projet a été globalement très bien respecté. Nous sommes parvenu à faire un premier cas de calibration fin janvier et nous avons pu réaliser une preuve de concept sur l'optimisation à la mi-février.

En plus du planning, nous avons réalisé un diagramme de Gantt (voir figure 1.1) permettant de mettre en lumière l'écart entre nos prévisions de tâche (en bleu) et ce que nous avons effectivement produit au cours du temps (en vert).

1.2.3 Suivi des risques

La matrice des risques est un outil qui nous a permis d'assurer le bon suivi du projet. Au début, notre visualisation des objectifs et des enjeux était floue. Se poser la question des risques a permis de se préparer à des potentielles dérives du sujet. Notre meilleure



FIGURE 1.1 – Digramme de Gantt

compréhension des enjeux du projet a résulté en une réduction des risques identifiés au début du projet. Puis, un nouveau risque est apparu en milieu de projet, celui d'avoir des difficultés à conclure au vu d'un sujet complexe qui s'inscrit dans le cadre d'un projet de grande ampleur. Ce risque a été évité en restant à des preuves de concept dans nos résultats. Parmi les risques identifiés, finalement aucun d'entre eux ne s'est réalisé :

- R01 : Modèle final trop complexe, projet trop ambitieux
- R02 : Implémentations difficiles à prendre en main
- R03 : Ne pas trouver de données *open source* fiables
- R04 : Formulation erronée des problèmes d'optimisation
- R05 : Coût d'optimisation trop élevé
- R06 : Membre du groupe absent ou indisponible
- R07 : Résultats incohérents et de source inconnue
- R08 : Difficulté de conclure le sujet

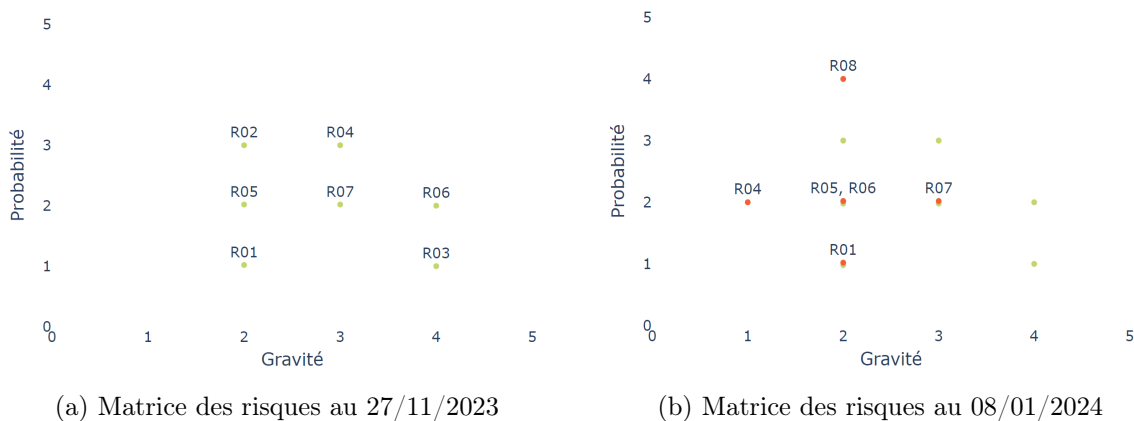


FIGURE 1.2 – Évolution des risques

1.3 Retour critique

Au démarrage du projet, nous avons sous-estimé le temps nécessaire pour sa gestion, ce qui nous a donné l'impression que la gestion de projet prenait beaucoup de temps. Pourtant, cet investissement initial en temps s'est révélé être une étape cruciale. Il nous a permis de mieux comprendre les attentes du client, d'obtenir une vision plus claire de l'avancement du projet à long terme, et de mieux organiser notre équipe.

Par ailleurs, au cours de notre projet, nous avons utilisé divers outils de gestion de projet, dont certains semblaient être en excès par rapport à nos besoins. Par exemple, la matrice RAM et le réseau logique et durées ont été initialement mis en place, mais ils n'ont pas été actualisés par la suite. Nous avons trouvé que ces outils étaient surdimensionnés pour notre projet spécifique et ne contribuaient pas de manière significative à notre avancement. Ainsi, nous avons fait le choix de concentrer nos efforts sur les outils et les processus qui étaient véritablement essentiels à la réussite de notre projet comme le suivi des risques et des délais imposés par le planning que nous avons construit.

Chapitre 2

Rapport technique

2.1 Présentation World3

2.1.1 Contexte, but et implémentations

Le rapport *The limits to growth* [15] est un texte fondamental pour la préservation de l’environnement. Publié en 1972 pour le club de Rome, le couple Meadows et d’autres dynamiciens des systèmes du MIT proposent un modèle simple appelé World3 modélisant les interactions entre cinq secteurs : la population, l’industrie, l’agriculture, les ressources non-renouvelables et la pollution. A partir de la résolution d’un système d’équations différentielles, le rapport montre que le système prévoit des chutes inquiétantes du secteur population si on maintient une croissance constante dans l’utilisation des ressources non renouvelables et des capitaux industriels et agricoles. Dans le cas d’un scénario «business as usual», en continuant sur la même lancée d’utilisation intensive des ressources, celles-ci s’épuisent de plus en plus. Ainsi, les coûts d’extraction augmentent fortement, l’économie ne peut plus suivre et la croissance s’arrête. Par conséquent, il y a très peu d’investissements dans la nourriture et les services, la mortalité augmente et cela produit la chute drastique de population visible sur la figure 2.1. Le rapport Meadows comprend 12 scénarios globaux :

- Des scénarios BAU : Business As Usual, aussi appelé dépassement ou effondrement. On ne change rien par rapport aux tendances en 1972 jusqu’à constater un effondrement de la population.
- Des scénarios avec des hypothèses technologiques optimistes : cela ne change pas beaucoup le résultat par rapport au scénario BAU mais retarde un peu la chute de la population.
- Des scénarios de stabilisation du système : ils proposent de jouer sur plusieurs leviers pour transitionner vers un état stable et éviter des effondrements.

Les auteurs du rapport insistent sur ce point : les résultats du modèle World3 qu’ils

ont développé n'ont aucune valeur prédictive. Ils ne cherchent pas à établir s'il y aura effectivement une chute de la population vers 2050 (espérons que non!). Le but est de montrer en modélisant de manière simplifiée le système humanité qu'une croissance infinie n'est mathématiquement pas soutenable sur une planète finie et qu'il faut penser une autre économie pour avoir des civilisations pérennes.

Le rapport Meadows a suscité énormément de réactions, aussi bien positives que négatives. Immédiatement après la publication du rapport, beaucoup de scientifiques ont critiqué les conclusions de Meadows et al. jugeant qu'ils mettaient un poids trop faible sur les solutions techniques, ou que le système était particulièrement sensible à quelques hypothèses menant à des résultats pessimistes. Le rapport a connu un regain de popularité dans les années 2000, où d'autres rapports comme *The global 2000 report to the President* à l'attention de Jimmy Carter arrivent aux mêmes conclusions que *The limits to Growth*, donnant du crédit aux propos du club de Rome. D'autres modèles ont également été développés, notamment le modèle Dynamic Integrated Climate-Economy, ou DICE [19], par le prix Nobel d'économie 2018 William Nordhaus intégrant des coûts d'abattement de CO_2 pour penser une décarbonation de l'économie.

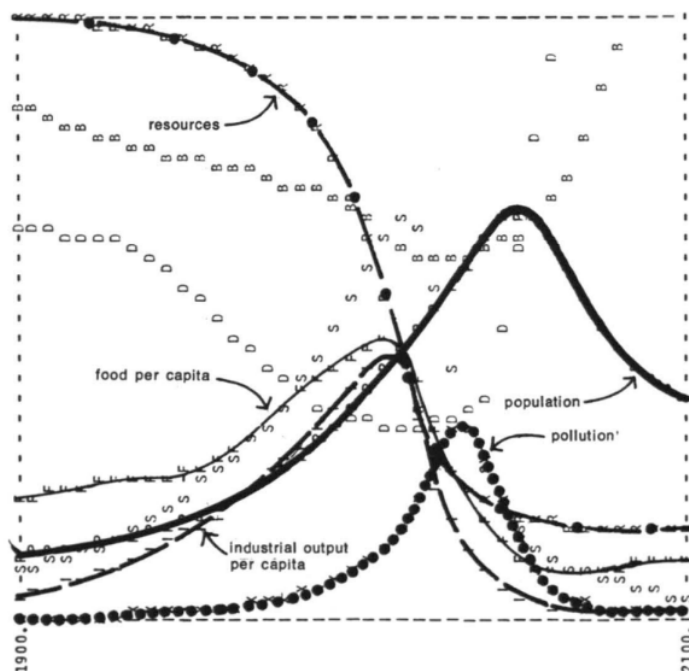


FIGURE 2.1 – Simulation obtenue dans le rapport Meadows de 1972 dans le cas d'un scénario dit Business as usual

2.1.2 Détails des sections

Le modèle World3 est un modèle assez complexe, essayant de modéliser l'interaction de l'économie avec l'environnement et les ressources finies de notre planète. Une illustration simplifiée du modèle est donnée figure 2.2. Nous proposons ici de décrire chaque secteur de World3 pour avoir une compréhension suffisamment fine du système.

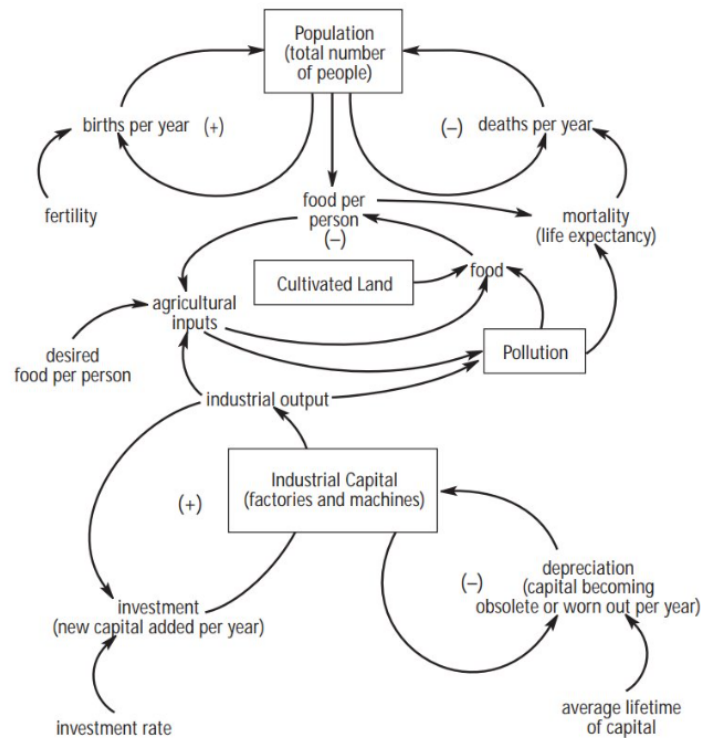


FIGURE 2.2 – Schéma simplifié du modèle World3

Population

Au sein du modèle World3, la population est divisée en quatre sous-populations : les personnes âgées de 0 à 14 ans, de 15 à 44 ans, de 45 à 64 ans, et de 65 ans et plus. Par ailleurs, il y a deux sous-secteurs au sein de la population : la natalité qui est régie principalement par la fertilité totale et la mortalité qui est régie principalement par l'espérance de vie.

Les autres secteurs du modèle ont un fort impact sur les variables du secteur Population. Par exemple, dans le secteur Capital, les services peuvent influencer la croissance démographique en affectant l'économie et l'emploi. Un secteur des services florissant peut créer des emplois et des opportunités économiques, ce qui peut entraîner une augmentation

de la population due à une meilleure qualité de vie. De même pour le secteur Agriculture, la disponibilité et la qualité de la nourriture ont un impact direct sur la santé de la population. Une augmentation de la production alimentaire peut conduire à une meilleure nutrition et à une réduction de la mortalité, ce qui peut à son tour stimuler la croissance démographique. Enfin en ce qui concerne le secteur Pollution, la pollution de l'air, de l'eau et du sol peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine, ce qui peut entraîner une augmentation de la mortalité. Les différents secteurs de World3 impactent donc la dynamique de la population en influençant le taux de mortalité et la qualité de vie des individus.

Capital

Le secteur Capital est exprimé en dollars et se découpe en trois sous-secteurs. Premièrement l'industrie, qui regroupe l'ensemble des produits transformés, la production d'électricité, de gaz et d'eau et la construction, cela correspond aux sections 50 à 99 de la Classification industrielle internationale de toutes les branches d'activité économique - ISIC [17]. Le deuxième sous-secteur correspond aux services, qui regroupent l'ensemble du commerce, de l'hôtellerie-restauration, des transports, de la communication, de la finance, des entreprises de l'immobilier, des assurances et des prestations de service ainsi que les services communautaires, sociaux et personnels. Cela correspond aux sections 10 à 45 de l'ISIC. Enfin, le dernier sous-secteur correspond à l'emploi et rentre en jeu uniquement lors de la phase de décroissance.

Le secteur Capital a une place tout particulièrement importante au sein du système World3. C'est dans ce secteur que se répartissent les investissements dirigés vers les autres secteurs. Si le capital s'effondre, l'agriculture et les services s'effondrent également.

Agriculture

Le secteur Agriculture a comme objectif d'estimer l'impact des modifications dans les autres secteurs, principalement celui de la pollution, et des décisions prises au sein du secteur sur la quantité de nourriture disponible par personne au fil des années. L'agriculture est un secteur qui articule les impacts de l'activité humaine sur la terre aux modifications contraintes de population.

Pour déterminer la quantité de nourriture disponible par individu, le modèle Agriculture articule rendement des terres et quantité de terres dédiées à l'agriculture. Les facteurs qui influent sur ces variables sont la fertilité des terres, la quantité de terres artificialisées, terres arables et terres dédiées à l'agriculture. Dans le temps, ces variables sont impactées par les investissements dans le secteur de l'agriculture et l'impact de la pollution sur les rendements, l'érosion et la dégradation des terres, mais aussi le temps de régénération des terres et leur part.

Le modèle agriculture s'intéresse à des variables à l'échelle mondiale. Les indicateurs sont des moyennes mondiales qui ne sont pas en mesure de traduire des disparités entre régions. Le modèle ne traduit donc pas des répartitions différentes des terres, des financements ou de quantité de nourriture disponible. Les résultats sont à interpréter comme des tendances globales plutôt que des prédictions précises à l'échelle locale.

Le modèle de l'agriculture pourrait être amélioré en ajoutant des variables prenant en compte les impacts de la pollution sur la biodiversité (en nombre d'espèces et nombre d'individus par espèce) et l'impact de modifications de ces variables sur les rendements agricoles.

Ressources

Dans World3, on définit un secteur spécifique pour modéliser l'ensemble des ressources non renouvelables (charbon, pétrole, métaux etc). Cependant, la modélisation de ces dernières s'avère relativement simple, étant donné que World3 ne distingue pas entre différents types de ressources non renouvelables. Ainsi, on utilise une unité générique qui représente toutes ces données, ce qui constitue sans doute la principale limite du modèle. En pratique, pour la recherche de données, on a donc choisi de se fixer à chaque simulation sur un seul type de ressources (dans notre cas on a pris le pétrole et le charbon) dont les historiques peuvent être utilisés pour la calibration.

Concernant la structuration des variables instanciées dans le secteur ressources, on trouve une organisation relativement simple. La principale variable du secteur ressources est *nr* (*nonrenewable resource*) qui est un tableau de taille l'horizon de la simulation et qui contient l'évolution des ressources non renouvelables au cours du temps. Cela permet de définir *nr_i* (*nonrenewable resource initial*) qui est simplement la valeur de *nr* au premier pas de temps de la simulation, ainsi que *nrfr* qui correspond à la normalisation nr/nr_i . Grâce à une table de valeur déjà implémentée dans World3, cette variable *nrfr* est alors utilisée par pour calculer une variable *fcaor* (*fraction of capital allocated to obtaining resources*), mobilisée dans le secteur capital, mais cela sort du domaine du domaine du secteur ressources.

La décroissance de la quantité de ressources est déterminée par un taux *nrur*. Ce taux de décroissance *nrur* est calculé comme le produit de la population, d'une variable *pcrum* (*per capita resource usage multiplier*) ainsi que d'une variable *nruf* (*nonrenewable resource usage factor*). La variable *pcrum* permet alors de modéliser l'utilisation de ressources non renouvelables par individu et *nruf* est un facteur multiplicatif dont la valeur peut être modifiée au cours d'une année donnée, afin de modéliser un changement dans l'usage des ressources non renouvelables. Initialement, le facteur *pcrum* était calculé directement à partir d'une des sorties du secteur capital, la variable *iopc* (*industrial output per capita*). On mobilisait alors une table de valeurs déjà implémentée dans World3 pour faire le lien

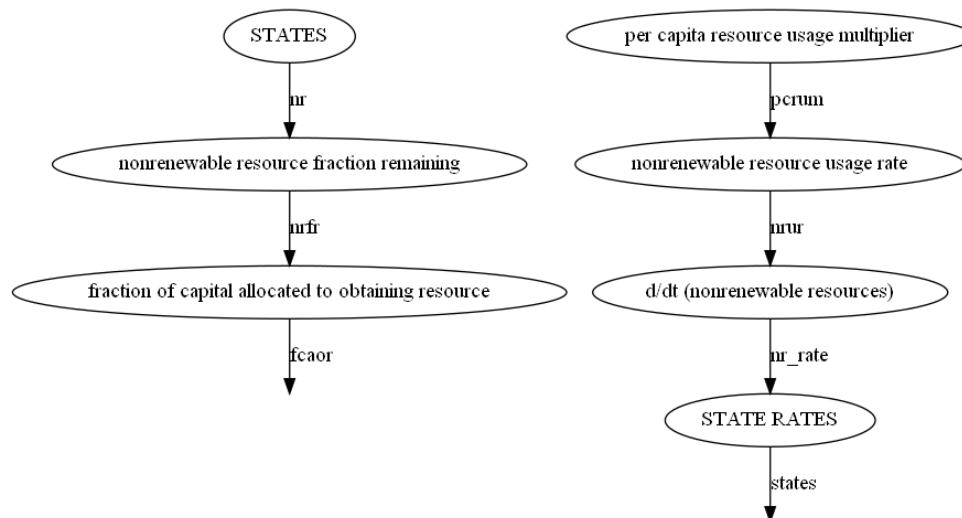


FIGURE 2.3 – Graphe de couplage du secteur "Ressources"

entre les variables *iopc* et *pcrum*. Cependant, nous souhaitons désormais pouvoir calibrer cette table sur les données historiques pour changer la dépendance précédente.

Pollution

Le secteur pollution de World3 est schématisé figure 2.4. Il faut garder à l'esprit pour bien comprendre ce secteur, que le secteur pollution a été pensé pour des pollutions persistantes toxiques de type produits chimiques, présents par exemple dans des engrais ou des pesticides. Le stock de pollution varie en fonction de la génération de pollution par l'industrie et l'agriculture, du temps de demi-vie des pollutions qui donne le temps d'assimilation de la pollution. En parallèle est pris en compte le temps "d'apparition" de la pollution. Dans l'état d'esprit des produits toxiques, il faut un certain temps avant de se rendre compte que tel pesticide est toxique pour l'homme, en constatant par exemple des années plus tard de nombreux cas de cancers dans une région où le produit a été utilisé. Cela confirme bien la nécessité de la notion de taux d'apparition de la pollution. Au final, le secteur pollution agit sur le secteur population et agriculture via des facteurs impactant la mortalité et la fertilité des sols.

Dans notre étude, nous aimerions nous intéresser aux pollutions de type gaz à effet de serre (GES). La modélisation actuelle n'est pas adaptée pour prendre en compte la dynamique des GES et leur impact sur l'environnement pour plusieurs raisons :

- La dynamique des gaz dans l'atmosphère n'est pas prise en compte.
- Il n'y a pas de non-linéarité dans l'absorption du CO_2 par les puits de carbone (par exemple si l'océan sature en CO_2).

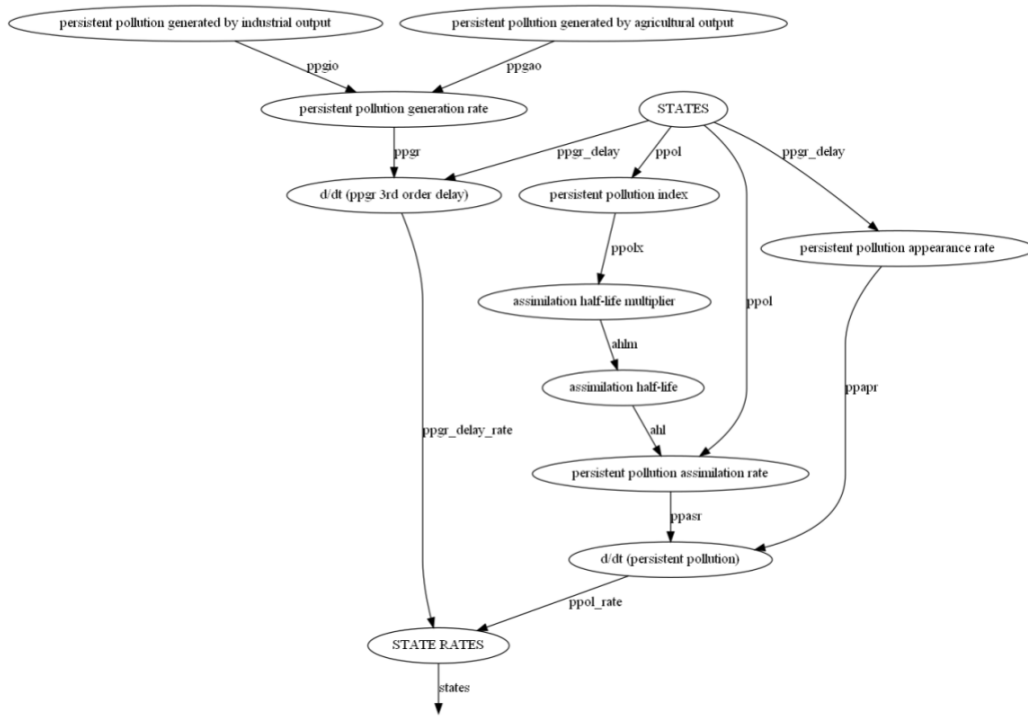


FIGURE 2.4 – Graphe de couplage du secteur "Pollution"

- La quantification de l'impact des GES sur le système n'est pas adaptée. Il faudrait prendre en compte un modèle climatique permettant de convertir une entrée en concentration de GES et donnant une sortie en évolution attendue de la température sur une certaine échelle de temps.

Toutes ces raisons nous ont poussé à nous intéresser à une reformulation du modèle de la pollution de World3 en incluant un modèle climatique. Nous n'avons pas eu le temps d'implémenter le modèle mais nous souhaitons tout de même discuter ici de cette possibilité d'amélioration importante de World3 pour en faire un meilleur outil d'aide à la décision dans le contexte du réchauffement climatique. Sous les conseils de Ian Costa-Alves, nous nous sommes intéressés au modèle FaIR [3]. Ce modèle donne la réponse en température à une impulsion d'augmentation de la concentration en GES comme résumé sur la figure 2.5. Dans le cas du CO_2 , les émissions de GES sont traitées dans quatre boîtes ou "pools" correspondant à des échelles de temps différentes, ce qui permet de prendre en compte des non-linéarités dans le cycle du carbone. Cependant les équations sont également adaptées afin de pouvoir prendre en compte une large gamme de GES. Chaque pool évolue en concentration et induit un forçage radiatif, qui est donné en entrée du modèle d'évolution de la température. Ce modèle est en trois boîtes ou "boxes", permettant de prendre en compte l'absorption de température par les océans. Cependant, la variabilité interne du climat [6] n'est pas prise en compte, ce qui ne permet pas de considérer des événements comme *el Niño* - *la Niña* dans l'évolution de la température sur une décennie. L'idée aurait

été de donner au modèle FaIR les sorties des secteurs agriculture et industrie de World3 en terme d'émissions de CO_2 , afin que FaIR puisse donner une meilleure approximation de la réponse en température que celle du modèle pollution tel qu'il est dans World3. Il aurait fallu finalement donner un impact de l'évolution de la température sur l'espérance de vie et sur les rendements agricoles via un facteur multiplicatif afin de parfaitement intégrer FaIR dans le modèle World3. Cependant cette traduction via un facteur multiplicatif serait également une approximation importante de la réalité. Faute de temps nous n'avons pas pu mettre en place cette implémentation, mais elle semble tout à fait réalisable techniquement et serait une importante plus value au modèle. Nous tenons cependant à insister sur le fait que le secteur pollution ne prend en compte que le problème du réchauffement climatique et ne considère pas l'enjeu de l'érosion de la biodiversité ni des autres limites planétaires.

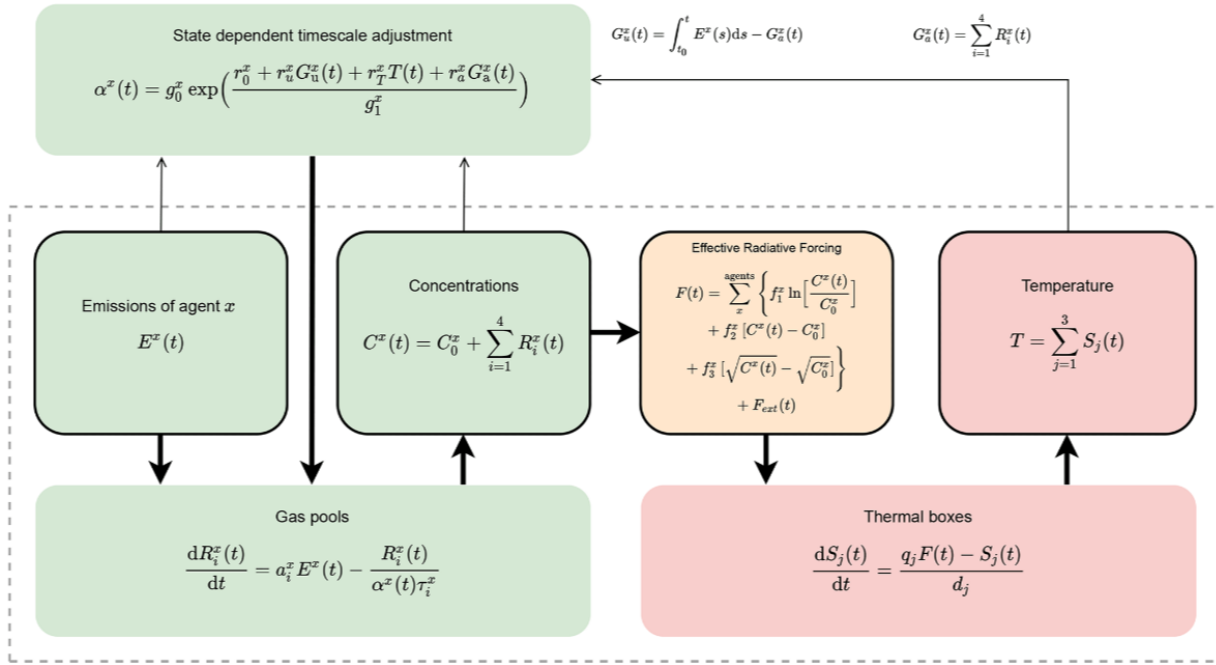


FIGURE 2.5 – Schéma montrant le modèle FaIR complet et les équations utilisées. Le code couleur sépare le modèle en un cycle de vie du gaz (vert), un forçage radiatif en découplant (orange), et une réponse en température (rouge). Image issue de [3]

Maintenant que nous avons présenté en détail le fonctionnement de chacun des secteurs de World3, nous allons détailler l'ensemble des bases de données utilisées pour réaliser nos calibrations pour chaque secteur de World3.

2.2 Recherche de données

2.2.1 Population

La recherche de données pour le secteur de la population s’est principalement appuyée sur l’API des Nations Unies [16]. À partir de cette source de données, sept indicateurs ont été identifiés et récupérés, fournissant ainsi les éléments nécessaires à l’élaboration des indicateurs associés au modèle World3. Ces indicateurs sont présentés de manière synthétique dans le tableau 2.1.

TABLE 2.1 – Paramètres récupérés via l’API des Nations Unies

Nom	Définition
Population par groupes d’âge d’un an et par sexe	Population annuelle par âge et par sexe (données interpolées sur la base des groupes d’âge de 5 ans et des périodes de 5 ans). Population de fait au 1er juillet de l’année indiquée, classée par âge (0, 1, 2,..., 99, 100+).
Décès par groupe d’âge d’un an et par sexe	Nombre de décès par âge et par sexe sur une période donnée.
Taux de fécondité total	Fécondité totale (enfants par femme)
Espérance de vie à la naissance	Le nombre moyen d’années de vie attendues par une cohorte hypothétique d’individus qui seraient soumis tout au long de leur vie aux taux de mortalité par âge d’une période donnée.
Taux de mortalité brut	Nombre de décès au cours d’une période donnée divisé par les années-personnes vécues par la population au cours de cette période.
Taux de natalité brut	Nombre de naissances vivantes au cours d’une période donnée divisé par le nombre d’années-personnes vécues par la population au cours de cette période.
Total des naissances par sexe	Nombre de naissances vivantes au cours d’une période donnée.

De plus, le taux de population urbaine a été extrait d’une autre source de données, à savoir les *World Urbanization Prospects* [22]. Cette base de données fournit des indicateurs tels que la *Population urbaine annuelle à la mi-année (en milliers)* et la *Population rurale annuelle à la mi-année (en milliers)*.

En combinant les indicateurs obtenus à partir de l’API des Nations Unies et la fraction de population urbaine calculée à partir des données de *World Urbanization Prospects*, il est possible dériver les paramètres correspondants aux indicateurs du modèle World3. Ces paramètres sont résumés dans le tableau 2.2.

Par la suite, cette base de données a été régionalisée de différentes façons. Elle a d’abord

TABLE 2.2 – Paramètres de World3 trouvés dans les bases de données publiques

Nom	Définition
p1	Population, âgée de 0 à 14 ans.
p2	Population, âgée de 15 à 44 ans.
p3	population, âgée de 45 à 64 ans.
p4	Population, âgée de 65 ans et +.
pop	Population.
d	Décès par an.
d1	Décès par an, 0-14 ans.
d2	Décès par an, 15-44 ans.
d3	Décès par an, 45-64 ans.
d4	Décès par an, 65+ ans.
cdr	Taux de mortalité brut.
le	Espérance de vie.
b	Naissances par an.
cbr	Taux de natalité brut.
tf	Fertilité totale.
fpu	Fraction de la population urbaine.

été subdivisée en groupes de pays présentant des niveaux de développement similaires, tels que les pays à revenu élevé, intermédiaire et faible. Ensuite, elle a été segmentée selon les zones géographiques telles que l’Afrique, l’Asie, l’Amérique centrale, l’Europe, l’Amérique du Nord, l’Océanie et l’Amérique du Sud. Enfin, elle a été organisée en fonction des données spécifiques à chaque pays.

2.2.2 Capital

Pour recueillir des données sur le secteur du capital, une première approche consistait à utiliser directement l’API de la Banque Mondiale [4]. Cette API comprend en réalité 63 bases de données contenant plus de 17 000 indicateurs. Lorsqu’on effectue des requêtes pour récupérer plusieurs indicateurs, on constate que ces indicateurs peuvent être associés à différents pays et périodes selon la base de données à laquelle ils appartiennent, et qu’ils peuvent être mis à jour selon des calendriers différents. Afin de simplifier la recherche des paramètres, nous avons opté pour l’utilisation de la bibliothèque python `WBGAPI` [9], qui propose une implémentation différente et offre une meilleure clarté et cohérence quant à l’origine des données et à leur contenu. Cette approche s’avère ainsi être un moyen efficace pour répertorier toutes les bases de données disponibles de la Banque Mondiale.

Le tableau 2.3 résume les correspondances entre les indicateurs de la Banque Mondiale et les paramètres de World3.

TABLE 2.3 – Correspondance entre les paramètres de World3 et de la Banque Mondiale

Paramètre World3	Donnée Banque Mondiale	Définition de la Banque Mondiale
io, production industrielle	NV.IND.TOTL.KD, Industrie (y compris la construction), valeur ajoutée (dollars constants de 2015)	L'industrie, y compris la construction (divisions 05-43 de la CITI), couvre la production manufacturière (divisions 10-33 de la CITI), l'extraction minière, la construction, l'électricité, l'eau et le gaz. La valeur ajoutée est le résultat net de la production, sans déduire la dépréciation des actifs ou l'épuisement des ressources. Déterminée par la CITI révision 4, les données sont exprimées en dollars constants de 2015.
so, production de services	NV.SRV.TOTL.KD, Services, valeur ajoutée (dollars constants de 2015)	Les services (divisions 45-99 de la CITI) couvrent une variété de secteurs tels que le commerce, les transports, les services publics, financiers et professionnels (comme l'éducation et les soins de santé). Ils incluent également les frais bancaires, les droits d'importation et les ajustements statistiques. La valeur ajoutée est le résultat net de la production, calculé sans déduire la dépréciation des actifs ou l'épuisement des ressources. Les données sont en dollars constants de 2015.
lfpf, fraction de la population active	SL.TLF.CACT.ZS, Taux d'activité, total (% de la population totale âgée de 15 ans et plus)	Le taux de participation à la population active représente la part des personnes âgées de 15 ans et plus actives économiquement, englobant celles contribuant à la production de biens et services à un moment donné.
lf, main d'oeuvre	SL.TLF.TOTL.IN, Main-d'oeuvre, total.	La population active regroupe les individus âgés de 15 ans et plus travaillant ou recherchant un emploi. Elle exclut certains travailleurs, comme les non-rémunérés, les membres de la famille travaillant sans rémunération et les étudiants, et peut varier saisonnièrement.
j, emplois	SL.EMP.TOTL, Emploi total, total (âges 15+)	L'emploi total indique le nombre total de personnes âgées de 15 ans et plus ayant un emploi.

Tout comme expliqué précédemment en section 2.2.1. pour la population, la base de données obtenue d’abord à l’échelle mondiale a été régionalisée de différentes façons. Elle a premièrement été subdivisée en groupes de pays présentant des niveaux de développement similaires, tels que les pays à revenu élevé, intermédiaire et faible. Ensuite, elle a été segmentée selon les zones géographiques telles que l’Afrique de l’Est et du Sud, l’Afrique de l’Ouest et Centrale, l’Amérique du Nord, l’Amérique latine et les Caraïbes, l’Union Européenne, l’Asie du Sud, l’Europe et l’Asie Centrale, et l’Asie de l’Est. Enfin, elle a été organisée en fonction des données spécifiques à chaque pays.

2.2.3 Agriculture

Les données extraites pour le secteur de l’agriculture proviennent de la base de données de l’Organisation des Nations Unies pour l’Alimentation et l’Agriculture, ou plus couramment FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) [8].

Plusieurs variables n’étaient pas disponibles de la manière attendue dans le modèle World3 dans la base de donnée de la FAO, mais elles ont pu être recomposées grâce à la composition de plusieurs données. Par exemple, pour calculer le pourcentage de pertes de production (processing loss - p1) les données disponibles étaient les quantités de nourritures perdues et la quantité de nourriture produite. Ces données ont donc été récupérées et on a divisé les pertes par la production pour obtenir l’indicateur voulu.

Dans World3, les quantités sont exprimées en équivalent kilogramme de légumes. Le taux de conversion entre kilogramme équivalent de légumes et les kilocalories a été fixé à 3500 kilocalories par kilogramme équivalent de légumes [18].

Une correspondance entre les paramètres de World3 et des données FAO est donnée avec le tableau 2.4.

2.2.4 Ressources

Pour le secteur ressources, nous avons eu besoin de deux types de bases de données : des historiques de ressources non renouvelables disponibles, pour lesquelles nous avons utilisé les ressources prouvées, et des historiques annuels de consommation de ressources par individu. Toutes ces données ont pu être extraites du site ourworldindata.org [23], dans les sections ‘grapher/oil-proved-reserves’ et ‘grapher/coal-proved-reserves’ pour la partie réserves prouvées et ‘energy’ pour la partie consommation. Ce site permet d’obtenir des données régionalisées à différentes échelles, à la fois à l’échelle de chaque pays mais aussi pour de plus grandes zones notamment pour l’Union Européenne, l’Afrique ou le Moyen-Orient par exemple.

Concernant les calculs réalisés sur ces bases de données, nous avons dû effectuer cer-

TABLE 2.4 – Correspondance entre les paramètres de World3 et de la FAO

Paramètre World3	Donnée(s) FAOSTAT	Formule utilisée
lfh, fraction des terres cultivées	Dans Utilisation des terres : — Terres cultivées (Pays : Tous, Élément : Superficie, Produit : Agriculture > (Liste) / —Terres en culture, Années : Toutes) — Terres (Pays : Tous, Élément : Superficie, Produit : Superficie du pays, Années : Toutes)	$lfh = \frac{Terrescultives}{Terres}$
pl, pourcentage de pertes	Dans Bilans alimentaires (avant 2010 et après 2013) : — Pertes (Pays : Tous, Élément : Pertes, Produit : Tous sauf population, Années : Toutes) — Production (Pays : Tous, Élément : Produit - quantité, Produit : Tous sauf population, Années : Toutes)	$pl = \frac{Pertes}{Production}$
lferti, fertilité des terres initial et ilf fertilité des terres	Dans Bilans alimentaires (avant 2010 et après 2013) : — Production (Pays : Tous, Élément : Produit - quantité, Produit : Tous sauf population, Années : Toutes) — Terres (Pays : Tous, Élément : Superficie, Produit : Superficie du pays, Années : Toutes)	$ilf = \frac{Production}{Terres}$, correspondance par catégories de productions en kcal, puis en kg-équivalent légumes avec le taux ci-dessus.
ali, terres arables initiales	Dans Utilisation des terres : — Terres arables (Pays : Tous, Élément : Superficie, Produit : Agriculture > (Liste) / —Terres arables, Années : Toutes)	Aucune
uili, terres industrielles et urbaines (initiales)	Dans Utilisation des terres : — Terres industrielles et urbaines (Pays : Tous, Élément : Area from Worldcover, Produit : Surfaces artificielles, y compris zones urbaines et associées, Années : Toutes)	Aucune
palt et pali, terres potentiellement arables (initiales)	Dans Utilisation des terres : — Terres agricoles (Pays : Tous, Élément : Superficie, Produit : Terres agricoles, Années : Toutes) — Forêts (Pays : Tous, Élément : Superficie, Produit : Forêts, Années : Toutes)	Aucune
sfpc, subsistance alimentaire par habitant	Dans données de la sécurité alimentaire : — Besoins alimentaires minimaux (Pays : Tous, Élément : Valeur, Produit : Besoins énergétiques alimentaires minimaux, Années : Toutes)	Correspondance en kilogramme-équivalent légumes.

taines conversions d'unité. Ainsi, les historiques de consommation par individu de charbon et de pétrole étaient exprimées en kWh alors que les réserves prouvées étaient exprimées en tonnes ou en mégatonnes. Nous nous sommes donc appuyés sur le site energyeducation.ca [5] pour adopter une convention de 44 MJ/kg de densité énergétique pour le pétrole. De plus, nous avons fixé le charbon à 0.6 tonnes équivalent pétrole [12].

2.2.5 Pollution

Pour le secteur pollution, nous avons voulu nous focaliser sur les émissions de CO_2 et nous avons donc cherché les données d'émissions de CO_2 par secteur et par année. Nous avons pu récupérer la plupart des données nécessaires pour ce secteur dans la base de données EDGAR [7] disponible sur le site de la Commission Européenne. Pour le taux d'assimilation de la pollution, nous avons utilisé la base de données du Global Carbon Budget 2019 de l'ICOS (Integrated Carbon Observation System) [21]. Nous avons ensuite additionné les tonnes de CO_2 captées par les océans, la biomasse et le "budget imbalance" (c'est un écart entre le carbone émis et le carbone capturé dans les différents puits, qui traduit notre connaissance encore incomplète du cycle du carbone) et avons attribué cette valeur au taux d'assimilation de la pollution. Enfin, pour la valeur du stock de pollution, nous avons supposé que la "pollution" était ici la quantité de CO_2 supplémentaire stockée dans l'atmosphère par rapport à l'ère pré-industrielle. Nous avons donc pris l'évolution de la concentration en ppm depuis 1970 [20] et nous avons retiré la concentration en CO_2 de l'ère pré-industrielle pour obtenir la quantité de pollution à chaque année.

2.3 Calibration

2.3.1 Théorie

On va ici tenter de calibrer les paramètres du modèle World3, à l'aide notamment d'outils d'Optimisation MultiDisciplinaire (OMD). L'idée générale de l'OMD est de modéliser un système complexe comme un ensemble de "disciplines" inter-connectées, prenant ainsi en compte les interactions entre les différentes parties du système nous permettant de mieux appréhender et estimer sa dynamique, comparativement à une méthode plus classique où on va chercher à optimiser chacun de ses sous-systèmes de manière séparée et successive. La figure 2.6 tirée de [13] permet de visualiser cela.

Un exemple classique de système complexe et de disciplines associées est celui d'un avion avec l'aspect structure, aérodynamique... Dans le cas de notre modèle World3, les disciplines seront notamment les secteurs mais on en dédiera aussi spécialement une à la calibration.

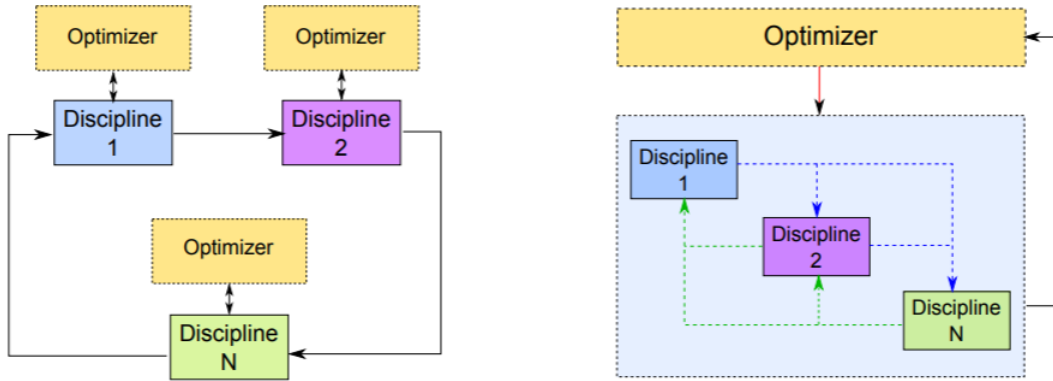


FIGURE 2.6 – A gauche : schéma classique d’optimisation ; A droite : schéma représentant une OMD, avec la prise en compte des interactions entre disciplines

Il existe de multiples formulations pour un problème de OMD : on va ici utiliser une formulation MultiDisciplinaire Faisable (MDF), pour sa capacité à s’adapter à tous les systèmes multidisciplinaires. Cela correspond à cette formulation mathématique (tirée de [13]) :

$$\begin{aligned}
 \min_z \quad & f(\mathbf{z}, \mathbf{y}(\mathbf{z})) \\
 \text{t.q.} \quad & \mathbf{g}(\mathbf{z}, \mathbf{y}(\mathbf{z})) \leq 0 \\
 & \mathbf{h}(\mathbf{z}, \mathbf{y}(\mathbf{z})) = 0 \\
 & \mathbf{z}_{min} \leq \mathbf{z} \leq \mathbf{z}_{max}
 \end{aligned}$$

\mathbf{z} désigne la variable de décision (ici les paramètres du modèle que l’on souhaite calibrer), $\mathbf{y}(\mathbf{z})$ représente le fait que l’on prenne en compte les interactions entre disciplines. Enfin, les deux contraintes \mathbf{g} et \mathbf{h} correspondent aux contraintes imposées par le modèle.

Dans le cas de la calibration, la fonction objectif f correspond à la norme 2 de la différence entre les courbes des évolutions liées aux paramètres simulés et ceux réels, avec \mathbf{z} les paramètres à calibrer du modèle, $\bar{\mathbf{y}}(\mathbf{z})$ le sous-ensemble des variables de World3 à comparer aux données réelles et \mathbf{y}_{reel} les données réelles, on a $f(\mathbf{z}, \mathbf{y}(\mathbf{z})) = \|\bar{\mathbf{y}}(\mathbf{z}) - \mathbf{y}_{reel}\|^2$.

Une interprétation de la calibration est ici de la considérer comme un problème inverse, le problème direct étant la simulation de World3 à partir de ses paramètres d’entrée pour obtenir ses données simulées et à l’inverse la calibration consiste à utiliser ces données simulées pour retrouver les paramètres d’entrée de World3 correspondants.

2.3.2 Implémentation

Note : Le code est accessible en Open-Source sur [GitHub](#) ici

Pour implémenter notre calibration en utilisant les techniques d'OMD évoquées précédemment, on va coder en Python et utiliser la librairie GEMSEO (dont voici un lien pour sa documentation simplifiée [ici](#)), spécialement conçu pour exécuter des processus d'OMD.

On s'est limité ici à une preuve de concept, en réalisant une calibration uniquement sur le secteur de la population.

Il nous faut distinguer les différents types de données qu'on sera amené à manipuler :

- les paramètres du modèle, scalaires, et préfixés **input** dans notre code :
 - Ceux qu'on peut obtenir directement grâce aux données réelles nommés **input_parameters_fixed** (par exemple la population initiale en 1900).
 - Ceux que l'on souhaite calibrer et dont la valeur va être changée par GEMSEO et qu'on nomme **input_variables**.
- les données requises ou produites par le secteur, qui dépendent du temps et sont sous forme de tableaux, suffixés **data** dans notre code :
 - Celles qui sont exogènes au secteur (mais endogènes à World3) nommées **exogenous_data**, ici on fait le choix de les considérer comme les sorties des autres secteurs pour un fonctionnement normal de World3 : idéalement, pour un résultat moins biaisé il faudrait n'utiliser que des données réelles pour les exogènes (qui forcément correspondent mieux aux données réelles que des données simulées), mais il est très difficile de trouver suffisamment de données réelles pour appliquer cette stratégie
 - Les données de sortie du secteur, qui vont nous permettre par la suite de voir à quel point on est proche de la réalité.
 - Les données réelles correspondant aux sorties du secteur, qui vont justement nous permettre de réaliser la comparaison que l'on a évoqué au point précédent

Les **input_variables** (paramètres que l'on va calibrer dans notre cas) sont décrits dans la figure 2.5.

len	life expectancy normal [years] (espérance de vie normale[années])
dcfsn	desired completed family size normal (taille de la famille complète souhaitée)
hsid	health services impact delay [years] (délai de l'impact des services de santé[années])
ieat	income expectation averaging time [years] (durée sur laquelle on va moyenner les revenus[années])
lpd	lifetime perception delay [years] (durée de vie perçue[années])
mtfn	maximum total fertility normal (fertilité totale maximale normale)
rlt	reproductive lifetime [years] (durée de vie où la reproduction est possible[années])
sad	social adjustment delay [years] (durée nécessaire à l'ajustement après un changement social[années])

TABLE 2.5 – Liste des paramètres du secteur/discipline population calibrables avec leur description

Comme évoqué dans la partie théorie 2.3.1, on réserve une discipline spécialement pour la calibration : **Calibration**. Voici les options pour le processus qu'on a retenu après de nombreux tâtonnements :

- nombre maximum d'itérations = 400 : on a choisi ce nombre car on a toujours vu les valeurs converger avant ce nombre d'itérations (en considérant plus de types de données réelles pour comparaisons, on monte jusqu'à 700 itérations : les nouvelles données ajoutées sont précisées dans la partie "Analyse résultats").
- NLOPT_BOBYQA comme algorithme : on avait commencé par utiliser SLSQP mais il nous est apparu qu'il nous fallait un algorithme d'optimisation ne prenant pas en compte le gradient (sinon on n'arrive pas à converger, étant donné qu'avec la méthode des différences finies on réalise une approximation du gradient trop peu précise); NLOPT_COBYLA correspond aussi à ce type d'algorithme mais sa convergence était plus lente
- tolérance sur $\mathbf{z} = 1.10^{-4}$; tolérance sur $f = 1.10^{-6}$: on a cherché des tolérances pas trop petites pour ne pas ignorer les incertitudes (modèle imparfait) mais pas trop grandes pour éviter d'être imprécis

Il nous faut aussi normaliser les différentes données réelles de comparaison ainsi que les sorties du modèle correspondantes : en effet, certaines de ces données ont un poids beaucoup plus important que d'autres dans le calcul de la fonction objectif à cause de l'ordre de grandeur de leur valeur. On choisit comme constante de normalisation le maximum des courbes réelles (étant donné que le maximum des courbes simulées change à chaque pas d'optimisation).

De plus, on ne dispose souvent des données réelles que sur une certaine durée (par exemple pour la population totale mondiale uniquement de 1960 à aujourd'hui et non pas à partir de 1900), ce que nous avons aussi dû prendre en compte.

Pour résumer, comme on peut le voir à la figure 2.7, notre implémentation ne concerne que le secteur de la population, qui comme la calibration elle-même, est considéré comme une discipline. De cette discipline `Population_D`, on simule des données qui seront ensuite comparées aux données réelles à l'aide du calcul de la fonction objectif. Cela va nous permettre d'avancer d'un pas d'optimisation avec GEMSEO qui va nous fournir les nouveaux paramètres pour relancer une itération. On refait ce processus jusqu'à atteindre une tolérance ou le nombre maximum d'itérations.

2.3.3 Analyse des résultats

Les valeurs des paramètres calibrés sont disponibles à la figure 2.8 pour la première version et à la figure 2.9 pour la deuxième version incluant plus de données de comparaison (voir plus loin dans le paragraphe).

On réussit à obtenir des résultats qui convergent bien (avant le nombre maximum d'itérations) et avec une durée et un nombre d'itérations raisonnables, la preuve de concept de calibration est donc globalement convaincante. Cependant on obtient des paramètres calibrés très différents des valeurs par défaut de World3, à un point tel qu'on peut re-

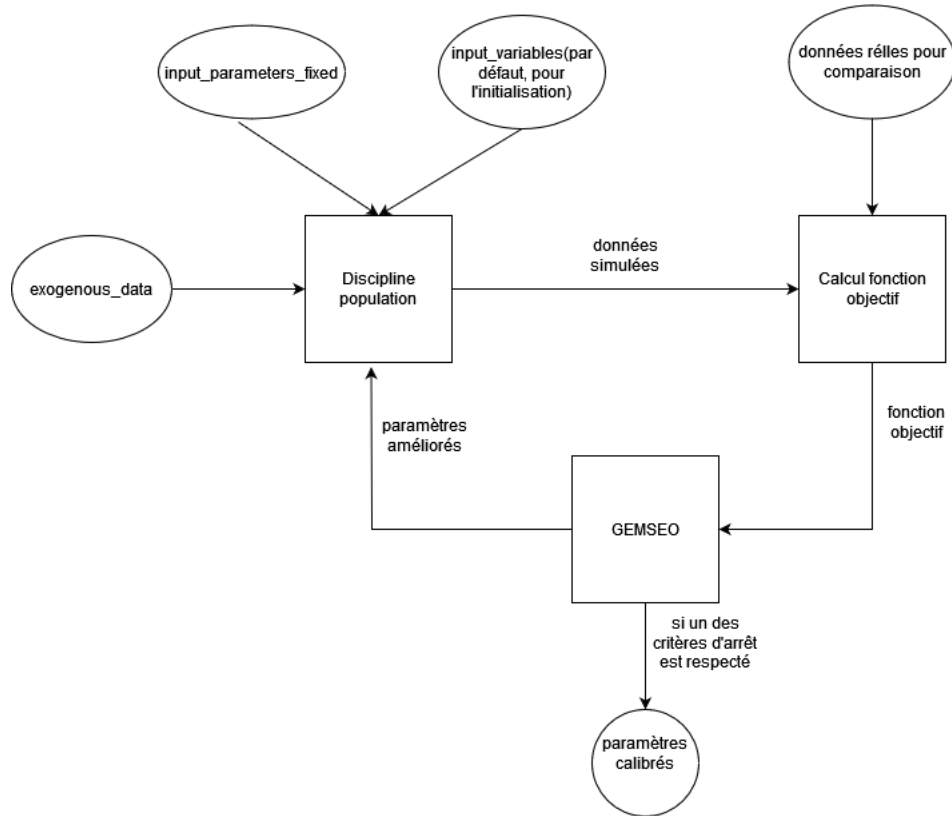


FIGURE 2.7 – Schéma de principe de la calibration

name	lower_bound	value	upper_bound	type
len	20	42.84936951925442	80	float
dcfsn	0	5.789670208592012	8	float
hsid	0.1	0.7197134852988849	40	float
ieat	0.1	2.205995263473683	6	float
lpd	1	18.48086008613686	80	float
mtfn	2	5.89392053733729	16	float
rlt	10	37.60513203428034	40	float
sad	0.01	46.48699602761943	80	float

FIGURE 2.8 – Valeur des paramètres après calibration, 1ère version

name	lower_bound	value	upper_bound	type
len	20	43.71350256636283	80	float
dcfsn	0	3.564161765681502	8	float
hsid	0.1	1.459916203594769	40	float
ieat	0.1	3.272708395498682	6	float
lpd	1	25.50910960613065	80	float
mtfn	2	3.907194086341597	16	float
rlt	10	25.03722674995197	40	float
sad	0.01	5.759043765850636	80	float

FIGURE 2.9 – Valeur des paramètres après calibration, 2ème version

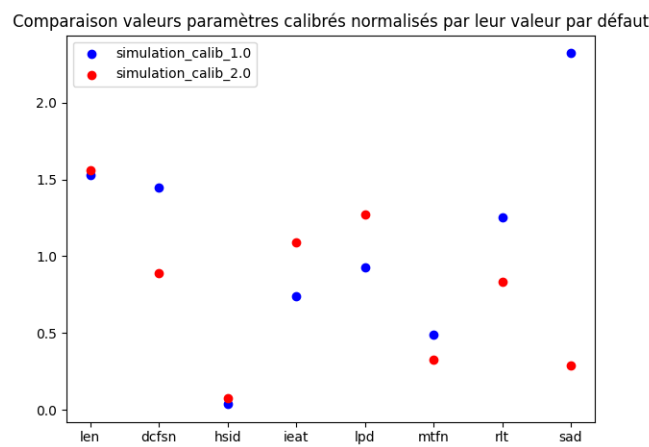
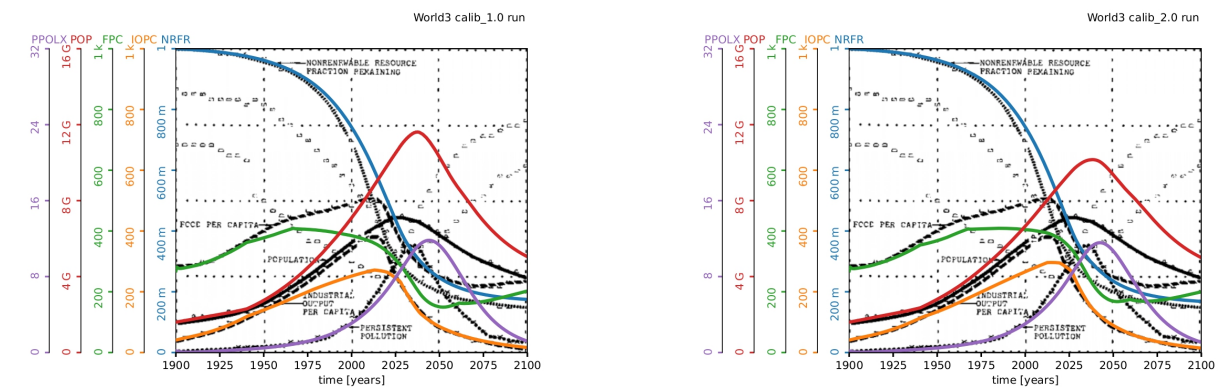


FIGURE 2.10 – Comparaison des valeurs, normalisées par la valeur par défaut de World3, des paramètres calibrés en fonction des données utilisées



(a) Simulation depuis la 1ère version de paramètres calibrés

(b) Simulation depuis la 2ème version de paramètres calibrés

FIGURE 2.11

mettre en cause leur cohérence, comme par exemple pour **len** (espérance de vie à l'ère pré-industrielle) qui est aux alentours de 43-44 ans pour nos deux calibrations ce qui est excessif pour l'époque (moyenne mondiale).

Pour la première version de notre calibration, on ne dispose que de **p1**, **p2**, **p3**, **p4** et donc de **pop**, ainsi que de **d1**, **d2**, **d3**, **d4** et donc de **d** (voir table 2.2). Les indices 1,...,4 indiquent des tranches d'âge, p la population et d le nombre de décès par ans. Pour la seconde, on ajoute **total fertility (tf)**, **life expectancy(le)**, **crude death rate (cdr)**, **crude birth rate (cbr)**, **total births(b)** et **fraction population urban (fpu)**.

Analysons la figure 2.10, on remarque que l'ajout de ces nouvelles données à la deuxième version n'a que très peu d'influence sur certains paramètres comme **len** ou encore **hsid** mais change du tout au tout pour **sad**, et ont une influence significative sur le reste des paramètres. Ce résultat est une manifestation importante d'une hypothèse levée après notre première calibration : si les paramètres calibrés sont peu sensibles aux données de comparaison utilisées, les valeurs obtenus peuvent être très mauvaises. Avec la figure 2.10 on se rend très facilement compte de quels paramètres ont été bien contraints (et donc bien estimés) par la calibration 1.0 et lesquels ne l'ont pas été. Cela renforce aussi notre confiance dans la première évaluation lorsque la valeur ne change pas ou peu, mais indique aussi qu'il est difficile de savoir à partir de quel moment on a suffisamment de données contraignantes pour avoir confiance en la valeur d'un paramètre.

En faisant fonctionner World3 avec ces deux ensembles de paramètres on obtient les courbes 2.11 : les courbes noires en arrière plan représentent la simulation avec les paramètres par défaut. On observe dans chacun des cas un léger décalage dans la temporalité de l'effondrement de la population, passant de 2025 à approximativement 2030-2035. D'ailleurs notre calibration paraît plus réaliste étant donné que pour la calibration 2.0 on atteint une population de 8 milliards en 2020 alors que ce nombre n'est jamais atteint dans le cas par défaut. Cela nous rappelle que les paramètres d'entrée peuvent avoir des valeurs qui semblent aberrantes, et pourtant mieux représenter les comportements réels par la suite : c'est une manifestation de la justesse, ou non, des hypothèses et des dynamiques représentées par le modèle. On aussi remarque dans l'estimation par défaut (de 1970) une surestimation des quantités de nourriture et de production industrielles, relativisons cependant ce résultat en rappelant que nous n'avons calibré que le secteur de Population. Pour revenir aux faiblesses des résultats, dans les deux cas, les données concernent une période allant de 1960 jusqu'à 2020. A la figure 2.12, on voit l'évolution des courbes **p1**,...,**p4** et **d1**,...,**d4** : on remarque que l'approximation est peu concluante, comme pour **d4** ou encore **p1** (ces courbes correspondent à la première version de la calibration, mais sont semblables pour la seconde).

Il y a plusieurs raisons à cela. D'abord, il faut se souvenir qu'on se concentre uniquement sur le secteur Population. Ainsi **exogenous_data** (données exogènes au secteur Population mais endogènes à World3) n'est pas remis à jour à chaque pas d'optimisation, ce qui limite grandement la précision de cette calibration. En effet, prenons l'exemple

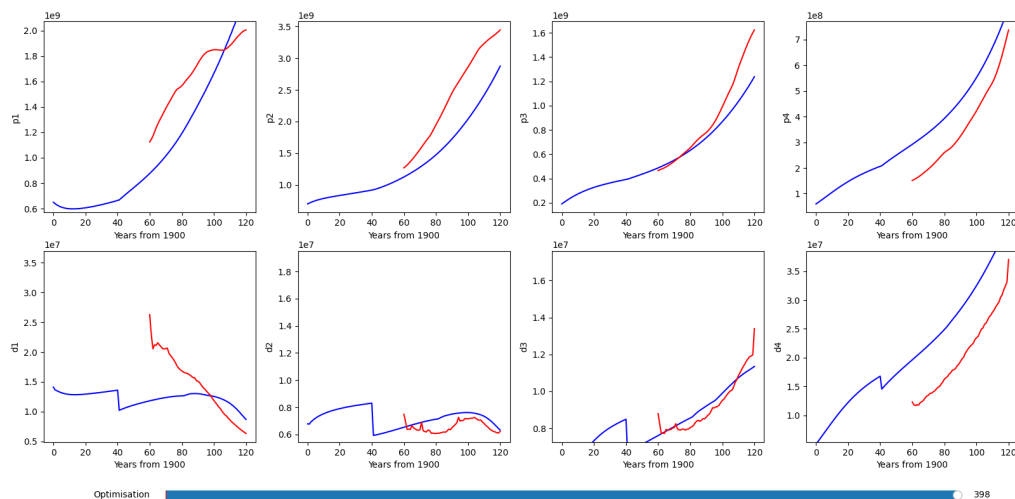


FIGURE 2.12 – Bleu : simulé ; rouge : réelle

de `len` précédemment évoqué : à chaque itération, on optimise sa valeur sans que cela n'entraîne d'augmentation par exemple dans le secteur Pollution ni encore de diminution dans le secteur Ressources. Ainsi, on peut se retrouver avec une valeur d'espérance de vie sur-dimensionnée. Aussi, `exogenous_data` n'est pas constitué de données réelles mais de données simulées par les autres secteurs de World3. Surtout, nos données réelles de comparaison aux données simulées ne prennent pas en compte toutes les sorties de Population, ce qui ne nous permet pas d'obtenir une comparaison vraiment pertinente (on répond en partie à ce problème dans la deuxième version de la calibration). Cela a pour conséquence de limiter notre influence dans le graphe de couplage de la population : en effet on a de l'information uniquement sur 5 branches sur une quinzaine (dans le cas de la première version) qui sortent de la bulle STATES en haut du graphe (voir 2.13 (on peut zoomer)). On ne contraint "bien" qu'une partie du graphe de couplage et donc qu'une partie des paramètres. En bref ce n'est pas forcément le modèle qui est peu sensible à ces paramètres mais plutôt nos données !

Plusieurs solutions peuvent être mises en place. Tout d'abord, considérer l'entièreté de World3 comme une discipline, pas seulement le secteur Population, afin de pouvoir mettre à jour ses données exogènes, ou alors utiliser (comme dans le cas des données de comparaison aux données de sortie de Population) des données réelles pour chacun des éléments de `exogenous_data`. Ensuite, il faudrait être en mesure d'acquérir plus de types de données réelles différentes (`le_delay`, `hsapc_delay`,...) pour pouvoir mieux contraindre l'ensemble du graphe de couplage (pour s'en convaincre il suffit d'observer en 2.10) c'est ce que l'on a essayé de faire avec notre calibration 2.0, et donc avoir une fonction objectif

plus sensible aux variables de décisions du problème d'optimisation.

2.4 Reformulation en un modèle basé sur l'optimisation

2.4.1 Théorie

World3 est un modèle d'évaluation d'une politique, un système dynamique paramétré. Etant donné un ensemble de paramètres scalaires, et un état initial des stocks, il calcule l'évolution des différentes variables (stocks, flux, variables de délais, etc), régies par un système d'équations différentielles complexe mais causal. Au contraire DICE, qui a été présenté section 2.1.1, est un modèle basé sur l'optimisation : c'est un système dynamique mais qui va régulièrement réévaluer certains paramètres afin de maximiser une fonction objectif : l'utilité de consommation intégrée sur le temps et pondérée fortement sur le court-terme. La différence principale, d'un point de vue modélisation/mathématique, est donc le fait que DICE "trouve" les décisions à prendre sur le système afin d'optimiser la fonction objectif. Là où World3 prédit, DICE décide.

Ainsi, voilà ce que l'on veut accomplir avec World3 : reformuler le modèle afin de le rendre décisionnel. Pour cela d'un point de vue mathématique nous avons besoin de deux choses : une fonction objectif et des variables de décision.

Afin que cette simulation soit réaliste les variables de décision doivent représenter des "choses" réelles sur lesquelles on peut avoir physiquement une influence. Prenons un exemple : choisir le stock mondial de nourriture comme variable de décision n'a pas de sens, en une certaine année l'humanité ne peut pas choisir directement de combien de nourriture elle dispose (dans le sens où on va devoir passer par des variables annexes comme par exemple la quantité de terres arables utilisées pour l'agriculture). Par contre, la fraction des investissements à placer dans l'agriculture est un "paramètre" sur lequel nous avons des possibilités d'action directes, et qui aura un impact sur les productions futures (notion de délai). Une bonne approche serait donc de choisir les variables qui représentent des décisions politiques (investissement, contrôle de la fertilité, répartition des ressources, etc) comme variables de décision du problème d'optimisation.

Le problème en l'état est que toutes ces variables sont endogènes à World3, elles sont calculées par le modèle à chaque pas de temps à partir des équations les régissant et des valeurs passées. Pour cela nous allons donc avoir besoin de "casser" certaines équations, pour rendre exogènes les variables associées et les remplacer par des variables de décision.

On résout alors le problème :

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\omega}} \quad & f(\mathbf{y}) \\ \text{t.q.} \quad & \text{World3}(\mathbf{z}_{param}, \boldsymbol{\omega}) = \mathbf{y} \\ & \boldsymbol{\omega}_{min} \leq \boldsymbol{\omega} \leq \boldsymbol{\omega}_{max} \end{aligned}$$

où $\boldsymbol{\omega}$ est le vecteur des variables de décisions, \mathbf{z}_{param} les paramètres scalaires de World3 (par exemple donné par la phase de calibration section 2.3) et \mathbf{y} l'ensemble des sorties de World3. On notera bien que $\boldsymbol{\omega}$ a une dimension temporelle mais qu'il est aussi composé de différentes décisions : par exemple, on peut optimiser l'objectif en jouant à la fois sur le contrôle de la fertilité et les investissements dans le système de santé, qui sont deux choses différentes mais dont la valeur varie au cours du temps. Un exemple est fourni dans la section 2.4.2 et visuellement avec la figure 2.13.

2.4.2 Implémentation

Note : Malheureusement à l'heure de l'écriture de ce rapport le code de l'implémentation JAX de World3 n'est pas encore Open-Source donc notre code non plus

Variables de décision

Tout comme pour le cas de calibration, on va utiliser la librairie d'OMD GEMSEO en Python, couplée ici à JAX que l'on présente ci-après.

Voici ce que l'on fait en "cassant" des équations pour reformuler le modèle basé sur l'optimisation. On supprime du modèle l'équation, évalué à chaque instant, $\mathbf{fsafc} = \text{table}(\mathbf{nfc})$, figure 2.13, et on introduit à la place un tableau $\mathbf{fsafc} = [\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2, \dots]$ où les $\boldsymbol{\omega}_i$ sont les variables de décision du problème d'optimisation et i les instants, dont la valeur sera calculée et choisie à chaque itération par GEMSEO.

Les différentes variables de World3 sont calculées à chaque pas de temps (1 an par défaut). En les remplaçant à chaque pas de temps par des variables de décision, plusieurs problèmes se posent :

1. **Grande dimension du problème :**

En commençant la simulation en 2020 (il n'y a pas d'intérêt à faire tourner un modèle décisionnel dans le passé, contrairement au cas de calibration), et en s'arrêtant en 2100 on a tout de même un problème de dimension 80, avec une seule variable de décision.

2. **Risque d'intégration numérique instable due aux grandes dérivées :**

Parce que qu'il n'y a aucune contrainte de régularité temporelle sur les variables de décision les valeurs à l'itération i et $i+1$ sont totalement décorréliées et donc à forte

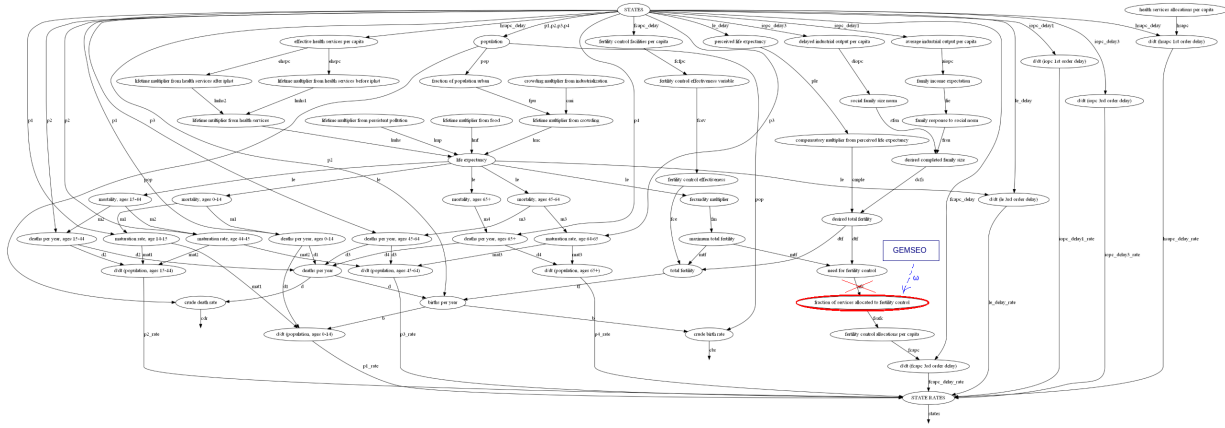


FIGURE 2.13 – Graphe de couplage du secteur Population, schématique, où l'on a supprimé une équation pour rendre exogène la variable **fsafc**

dérivée ce qui peut-être problématique suivant le schéma d'intégration numérique utilisé (Euler explicite dans notre cas, qui est instable).

3. Solution artificielle :

L'absence de corrélation entre les variables de décision entre deux pas de temps est très artificielle, on aurait du mal à imaginer un monde et une société où les lois, taxes ou investissements évoluent de manière totalement décorrélée chaque année. Pour des raisons de réalisme on a besoin d'une certaine stabilité.

Pour pallier à cela, nous avons introduit des points de contrôle et une interpolation cubique pour estimer les valeurs manquantes. Cette solution a l'avantage de résoudre bien des problèmes même si elle n'est pas tout à fait satisfaisante pour le point 3, qui requiert plutôt des paliers (représentant la stabilité temporaire d'une décision politique), ces mêmes paliers allant totalement à l'encontre du point 2 (une fonction créneau continue est non différentiable, et en discret présente une variation très grande au point de saut). Cet axe reste une piste d'amélioration de notre travail et pourrait être traité en changeant le schéma d'intégration numérique par exemple.

Fonctions objectif

Nous avons choisit et implémenté deux fonctions objectifs tirées de la réédition 30 ans après du rapport *The Limits to Growth : The 30-Year Update* [14] : l'empreinte écologique **ef** (à minimiser) et l'indice de bien-être **hwi** (à maximiser). On optimisera les normes 2 de ces vecteurs, sans pondération temporelle.

On notera aussi que le choix de la fonction objectif est fortement arbitraire et représentatif des idées de l'utilisateur. Par exemple DICE maximise à court-terme, on peut tout à fait imaginer au contraire minimiser, par exemple, la pollution intégrée à long-terme, on

aura alors une pondération forte pour les termes loin dans le temps, au contraire de DICE. Une telle approche reposerait alors évidemment sur une grande confiance dans la précision du modèle, qui est de toute manière inhérente aux modèles décisionnels.

Utilisation de `gemseo-jax`

On l’a constaté avec un nombre restreint de variables de décision pour le cas de calibration, la résolution d’un problème d’optimisation avec le modèle World3 en contrainte peut être très long. C’est pour cela que nous sommes passés de `pyworld3` à une implémentation de World3 avec JAX [10]. JAX permet déjà de jitter Python (compilation Just-In-Time [24] [11]), et donc de l’accélérer, mais surtout, par la différentiation analytique automatique, de complètement changer notre problème de classe de problème d’optimisation. On peut alors utiliser des algorithmes basés sur les gradients comme BFGS qui ont une convergence linéaire, et résoudre un problème de beaucoup plus grande taille sans perdre en temps de calcul.

Séparation en disciplines

Le code de la preuve de concept de la reformulation en modèle reposant sur l’optimisation est organisé comme suit. Nous nous sommes basés sur une réécriture du modèle World3 en JAX fournie par Ian COSTA-ALVES. Chaque secteur est, là encore, un système dynamique (ils héritent de `SystemDynamicsModel`), avec ses variables d’état, ses paramètres scalaires en entrée, ainsi que ses données exogènes et ses sorties. Ces modèles séparés sont fusionnés dans un méta-modèle `World3Objective`. On peut alors modifier les attributs de cette classe pour ajouter les paramètres, constantes nécessaires à nos nouvelles sorties `ef` et `hwi`, et surtout supprimer l’équation associé à `fsafc` (une entrée dans un dictionnaire) pour la remplacer par une donnée exogène.

On crée alors une discipline `SimulationDiscipline` (héritant de `JAXDiscipline`) qui instancie notre modèle, y injecte les données exogènes (les variables de décision ω) et exporte la valeur de la fonction objectif comme étant l’une des sorties du modèle (configurable). On n’a plus qu’à utiliser cette discipline classiquement avec GEMSEO et un algorithme adapté. Comme justifié plus haut, un des intérêts de l’utilisation de JAX est la différentiation analytique automatique, on utilise donc L-BFGS-B, un algorithme quasi-Newton qui permet une résolution très rapide.

2.4.3 Analyse des résultats

Premières remarques

Pour l'analyse des résultats de notre preuve de concept nous cherchons à optimiser la valeur de `fsafc` entre 2020 et 2100, cette variable représente la fraction des services allouée au contrôle de la fertilité. Elle appartient donc à $[0, 1]$ et correspond bien à une décision politique comme discuté section 2.4.1, on s'attend aussi à un fort impact sur la population et donc sur l'ensemble du modèle. On utilisera comme paramètres de World3 les paramètres par défaut afin de faciliter la comparaison.

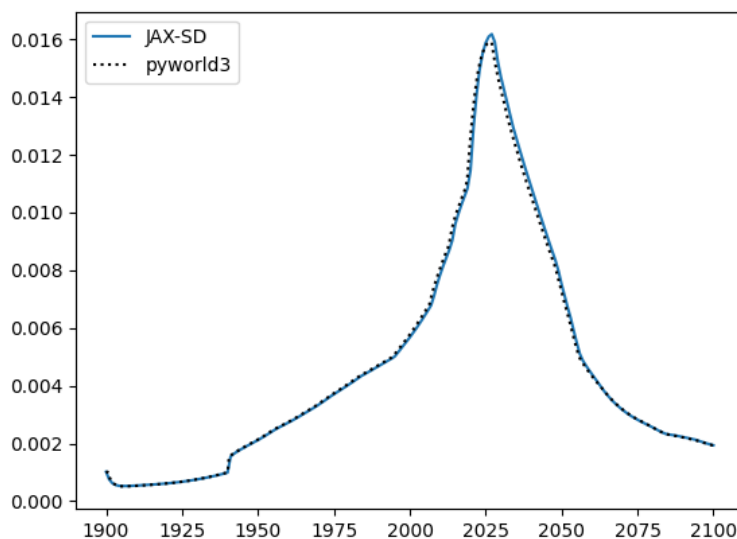


FIGURE 2.14 – `fsafc` pour une simulation avec les paramètres par défaut de World3

Une première remarque sur nos résultats : un problème que nous n'avions pas anticipé est que l'optimiseur peut parfois abuser de l'interpolation cubique pour optimiser en dehors du domaine de `fsafc`, comme on le constate sur la figure 2.15. En effet, les points de contrôles sont bornés dans la définition passée à GEMSEO mais pas ceux générés par l'interpolation cubique.

Pour pallier à ce problème on propose de tronquer l'interpolation cubique ou d'utiliser une interpolation linéaire. Dans la suite on utilise toujours l'interpolation linéaire.

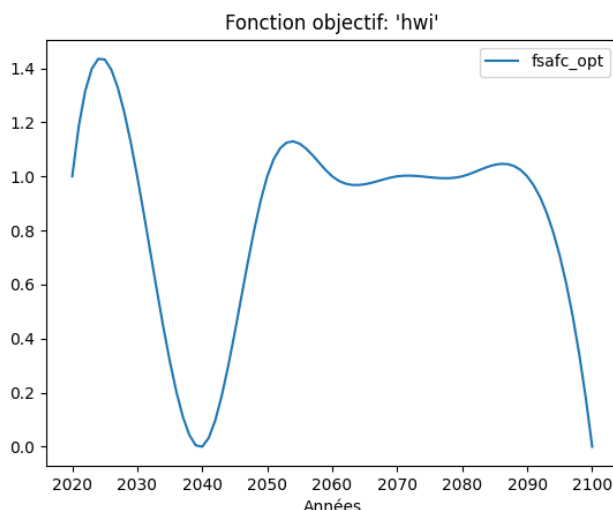


FIGURE 2.15 – `fsafc` dépassant ses bornes entre les points de contrôles (points de contrôle tous les 10 ans)

Analyse de la minimisation de l'empreinte écologique

Comme présenté précédemment nous avons deux fonctions objectifs à optimiser : les normes de `ef` à minimiser et `hwi` à maximiser. On commence avec la minimisation de la norme 2 de `ef` entre 2020 et 2100, points de contrôle tous les 10 ans.

Sur la figure 2.16 on constate tout d'abord en comparaison de 2.14 que les ordres de grandeurs ont complètement changé, le maximum atteint par une simulation de World3 est de moins de 2% des services, ici on va jusqu'à 70%. On notera aussi que la convergence a été très rapide : 3 itérations et que la fonction objectif était très peu sensible à `fsafc`, on reviendra sur ce point.

En analysant les courbes de la figure 2.17 on remarque une chute drastique de la population vers 2030, au même moment du pic de `fsafc`, il est cependant difficile de savoir si cette chute provient de l'effondrement qui apparaît aussi dans les simulations normales, du au manque de ressources puis à la pollution, ou à l'efficacité de notre politique de contrôle de la fertilité.

La baisse rapide de la population jeune (`p1`) est cependant trompeuse et est surtout due au fait que peu d'enfants naissent (contrôle de la fertilité) alors que les jeunes deviennent adultes et alimentent alors `p2`, d'où une croissance de `p2`, `p3` et `p4`, il faut plutôt regarder du côté de la mortalité. On remarque alors une croissance bien plus forte de la mortalité des classes de population les plus vulnérables, en particulier les jeunes. Ce comportement correspond bien à un effondrement des sociétés actuelles et donc des services de soins associés.

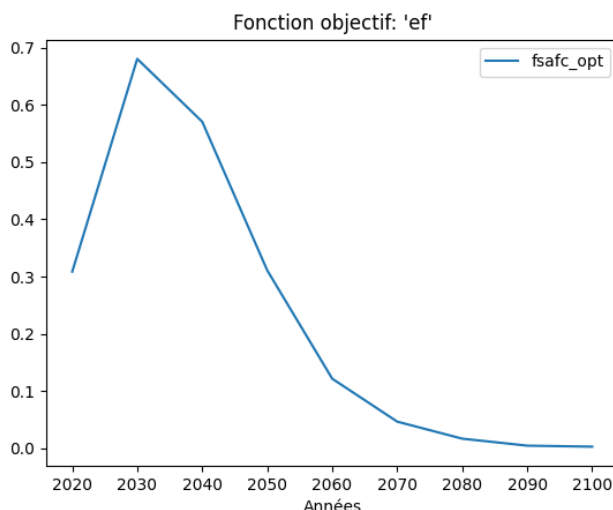


FIGURE 2.16 – Valeur de `fsafc` optimisée pour minimiser `ef`, à comparer avec 2.14

On constate aussi un effondrement de l'espérance de vie qui *semble* se stabiliser vers 30 ans, l'espérance de vie pré-industrielle, un comportement que l'on retrouve dans les simulations directes de World3.

Cet effondrement explique peut-être pourquoi `fsafc` décroît après un pic en 2030 : la population s'effondre déjà "toute seule" il n'y a plus d'intérêts à allouer plus d'argent ici, ou peut-être que parce que la quantité de services disponibles décroît d'un facteur 10 (avec la production industrielle), une fraction de celle-ci n'a plus d'impact significatif sur la fertilité.

Il n'est cependant pas étonnant d'obtenir un tel résultat : moins d'humains sur Terre implique naturellement une plus faible empreinte écologique. Encore que, pour en être sûr il faut regarder la manière dont est défini `ef` :

$$ef = (a1/1e9 + u1l/1e9 + a1l)/1.91$$

où `a1` sont les terres cultivées, `u1l` les terres urbanisées et `a1l` les terres polluées.

En étudiant alors 2.18 on remarque que la diminution de `a1` est compensée par l'augmentation de `u1l` : comment moins d'humains pourraient consommer plus de terres urbanisées ? En réalité la somme totale des terres `a1 + u1l + pal` est à peu près constante (dû à un facteur d'érosion faible) et de la manière dont est défini `pal`, les terres potentiellement arables (donc sauvages), ne peut décroître, un retour à l'état sauvage n'est pas possible dans cette modélisation et la minimisation de l'empreinte écologique telle que définie ici prend alors le sens d'un arrêt le plus rapide possible de la consommation de nouvelles terres sauvages : un effondrement. Cette idée se remarque bien sur la courbe de `pal` figure 2.18b.

Cette modélisation imparfaite des terres, qui s'explique peut-être en disant qu'à son

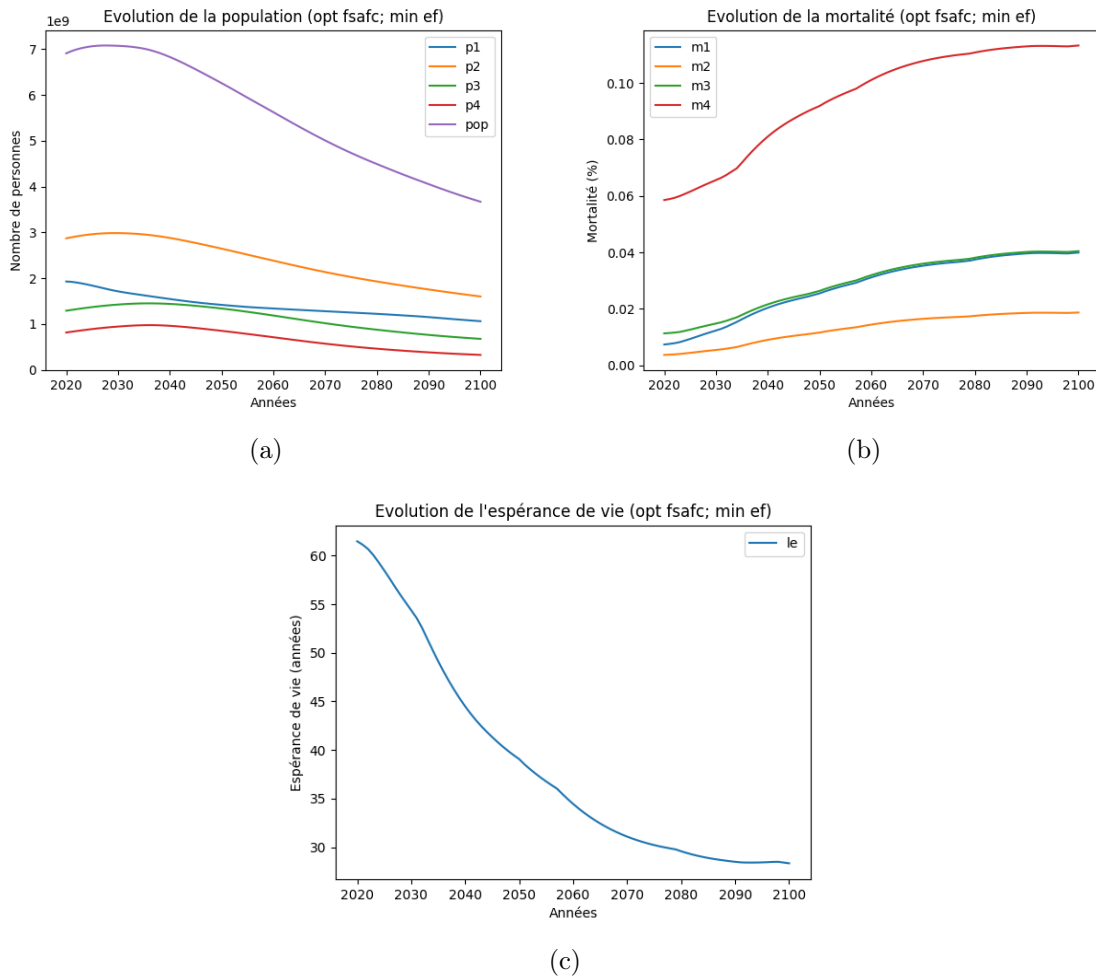


FIGURE 2.17 – Données relatives à la population

origine World3 avait pour but de modéliser la *croissance* et donc que ses auteurs ne pensaient pas à une possible volonté de ré-ensauvagement, explique aussi sûrement la faible sensibilité de **ef** lors de l'optimisation : c'est un axe certain d'amélioration de nos résultats et du modèle.

Analyse de la maximisation de l'indice de bien-être

La seconde fonction objectif que nous avons étudié est **hwi**, l'indice de bien-être, on a cherché à maximiser sa norme 2.

D'un point de vue critique on remarquera qu'ici la norme de **hwi** peut être un mauvais indicateur (encore plus vrai pour la norme 2 que la norme 1 !) : on ne souhaite pas une explosion du bien-être suivie d'un effondrement de celui-ci sur des centaines d'années,

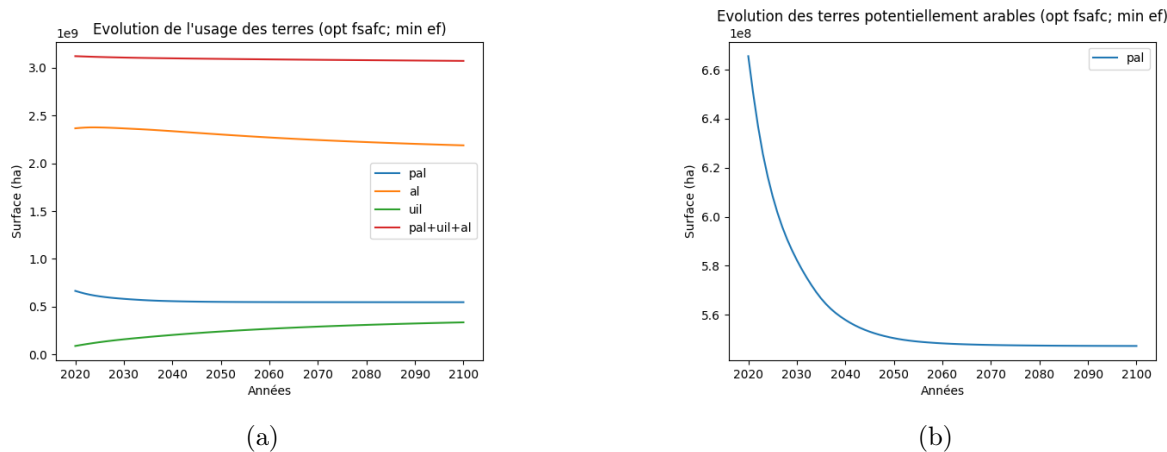


FIGURE 2.18 – Données relatives à l'utilisation des terres

d'autant plus que nous simulons seulement 80 ans et donc qu'un effondrement tardif (mais effondrement quand même) ne pénalisera que peu la fonction objectif, alors que nous recherchons plutôt une stabilisation. De ce point de vue là une fonction objectif avec un terme de régularisation, par exemple l'écart-type ou la valeur minimale, serait une piste intéressante à explorer.

Voulant maximiser l'indice de bien-être on va vouloir éviter à tout pris l'effondrement car `hwi` est défini comme :

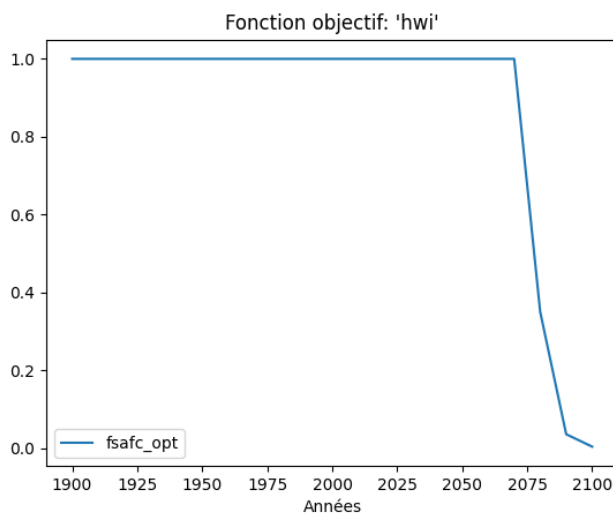
$$hwi = (lei + ei + gdpi)/3$$

avec `lei` l'indice d'espérance de vie, `ei` l'indice d'éducation, `gdpi` l'indice de PIB. Ainsi, un effondrement de l'espérance de vie comme on l'a constaté sur les autres simulations se répercuterait fortement sur la fonction objectif.

Dès nos premières simulations nous avons tout de suite constaté qu'en l'état actuel de la simulation (en 2020) éviter l'effondrement était absolument impossible en jouant seulement sur `fsafc`, nous avons donc choisi de commencer la simulation en 1900 en reformulant la question telle que : *Si on avait voulu maximiser l'indice de bien-être dès le début du 20ème siècle comment aurions-nous dû contrôler la fertilité ?*

Le résultat auquel nous arrivons est sans appel : l'effondrement est inévitable, le contrôle de la fertilité est insuffisant et il faut au maximum contrôler l'augmentation de la population afin de retarder au maximum l'effondrement ainsi que limiter la population mondiale au moment où il survient, figures 2.19 2.20 et 2.21.

Sur la figure 2.19, on constate effectivement que la meilleure stratégie est de contrôler au maximum la fertilité, avant que l'effondrement n'arrive, on en constate bien l'effet en remarquant que le maximum de population 2.20 est seulement de ≈ 5 Milliard, atteint en 2030 ce qui est proche des autres simulations. Sur la figure 2.21b on remarque aussi que l'espérance de vie `le` suit exactement la même courbe que `hwi` montrant bien qu'elle en

FIGURE 2.19 – Valeur de `fsafc` optimisée pour maximiser `hwi`

est un facteur très important.

Finalement, la seule conclusion auquel nous pouvons arriver avec ce cas très intéressant est que `fsafc` seule est une politique insuffisante pour empêcher un effondrement dû au manque de ressource ou à la pollution, et cela même en remontant très loin dans le temps. Il faudra poursuivre ce travail en explorant l'impact d'autres politiques ainsi que de plusieurs politiques en même temps. Ce travail montre bien qu'il n'est pas évident de savoir à l'avance quelle politique sera efficace ou suffisante afin d'atteindre un certain objectif et donc justifie son intérêt dans l'aide à la décision. Ces résultats partent bien sûr d'une confiance importante dans la qualité du modèle, au moins en tendance.

Remarques supplémentaires

Nous avons aussi essayé d'optimiser nos deux fonctions objectifs en même temps, un semblant d'optimisation multi-objectif. D'abord en choisissant comme fonction objectif une combinaison linéaire des deux et ensuite en essayant de mettre l'une en objectif l'autre en contrainte. Malheureusement, la première solution s'est révélée peu intéressante (en partie dû aux raisons données dans l'analyse du cas `hwi`) et l'autre impossible : nous ne pouvons pas introduire de contraintes avec `L-BFGS-B`. Nous laissons ces améliorations possibles à des travaux futurs.

Tous ces résultats ont été obtenus en moins de 1 minutes sur un ordinateur portable de puissance normale, ce qui est bien mieux que pour le cas de calibration à nombre de variables et tolérance équivalente. On constate aussi et surtout une réduction drastique du nombre d'itérations nécessaires, peut-être grâce au fait que `L-BFGS-B` est un algorithme

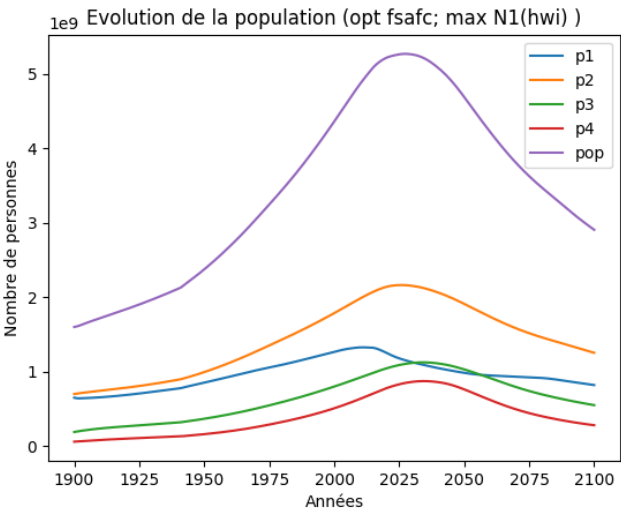


FIGURE 2.20

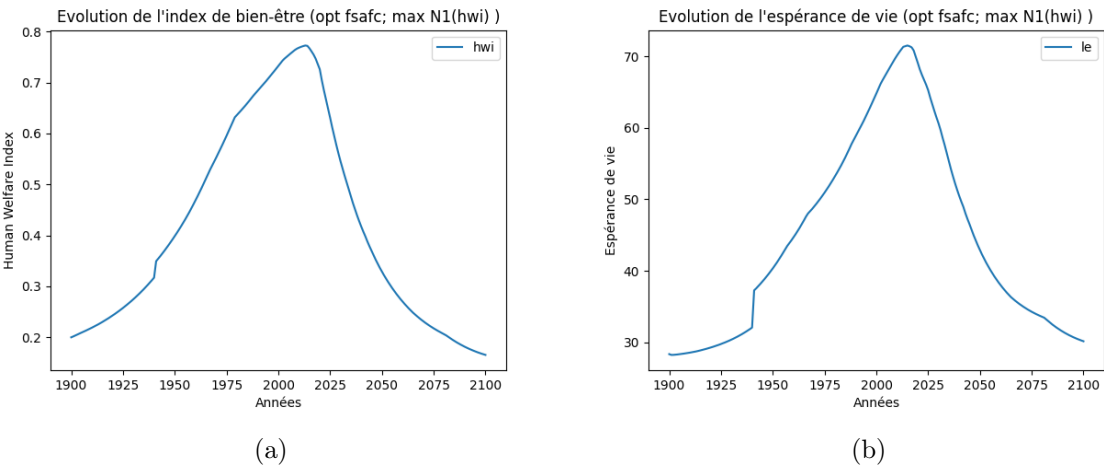


FIGURE 2.21 – Données relatives à la valeur de hwi

quasi-Newton ou peut-être à cause de la faible sensibilité de nos fonctions objectifs à `fsafc`, dans tous les cas nous avons toujours eu besoin de moins de 5 itérations pour atteindre la convergence. Une analyse plus poussée n'est pas le sujet principal de notre étude mais le choix technique de passer à une implémentation en `JAX` semble avoir porté ses fruits.

Conclusion et perspectives

Nous avons donc réussi lors de ce projet supervisé par Ian Costa-Alves à montrer la faisabilité du passage du modèle World3 système dynamique, à un modèle World3 reformulé permettant l’optimisation de certaines quantités d’intérêts. Nous avons également montré, à travers l’exemple du secteur Population, comment calibrer les variables de World3 pour chaque secteur, grâce au travail de collecte de données que nous avons effectué. Nous avons également proposé des pistes d’amélioration du modèle, notamment dans la modélisation du secteur Pollution : pour pouvoir mieux représenter la dynamique des GES et du réchauffement climatique, nous avons proposé de remplacer le secteur Pollution tel qu’il est modélisé dans World3 par le modèle FaIR [3] donnant une réponse en température à partir d’une impulsion en GES. Ces pistes permettent de faire de World3 un meilleur outil de prise de décision, et pourraient servir à imaginer de meilleurs scénarios d’évolution du système couplé Terre - Société humaine pour penser une transition environnementale.

Cependant, nous tenons à rappeler que l’esprit initial du rapport *The limits to Growth* n’est pas d’être prédictif ou exact mais de démontrer qu’il est impossible de poursuivre une croissance infinie sans rupture dans l’évolution de l’économie, ou pire dans l’évolution de la population. L’outil développé doit être pensé comme un outil d’aide à la décision pour ajuster des politiques dans un cadre décisionnel ou éducatif, mais ne doit pas chercher à prédire le futur. Il serait d’une part présomptueux de penser pouvoir modéliser l’ensemble des interactions entre hommes et femmes, entre l’humanité et l’environnement, et penser connaître suffisamment bien le comportement de notre atmosphère, de la biomasse et des océans pour réussir à prédire exactement le futur (et cela demanderait que l’univers soit déterministe...). D’autre part, l’outil perdrait de son intérêt : il est intéressant seulement pour voir l’impact d’actions (ou d’inactions) à grande échelle sur le système.

Cela étant dit, nos résultats mettent en lumière que le futur du monde n’a pas changé, selon le modèle, depuis les prédictions de 1970. Notre cas de calibration montre toujours un effondrement, qui s’est simplement décalé de 10 ans dans le temps depuis l’estimation d’il y a 50 ans : la trajectoire n’a pas changé et il se rapproche toujours. En critiquant les valeurs prises après calibration par les paramètres on peut aussi étudier la capacité du modèle à capturer les dynamiques importantes du système : des valeurs aberrantes pour ces paramètres peuvent montrer une modélisation incomplète de certains phénomènes. Aussi, le cas d’optimisation montre qu’il est extrêmement difficile d’éviter ou même de contrôler

cet effondrement, les leviers d'action doivent être multiples et il peut être difficile de les choisir, ici une analyse de sensibilité du modèle serait d'un réel intérêt au processus d'aide à la décision. Ce cas d'optimisation peut donc aider à découvrir, plus objectivement, quelles politiques auront l'impact escompté mais aussi lesquelles sont en fait inenvisageables. Nous remarquons aussi que nous n'avons utilisé que des méthodes d'optimisation locales, il est peu probable que les problèmes soient convexes, ainsi, nous n'avons peut être pas exploré tout l'espace des possibilités, cette question devra au moins être étudiée avec des méthodes globales sur certains cas dans de futurs travaux.

Enfin, il serait aussi pertinent d'intégrer la biodiversité dans des modèles de projection comme World3. En effet, la biodiversité joue un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre des écosystèmes, fournissant des services écosystémiques essentiels tels que la pollinisation, la régulation du climat et la purification de l'air et de l'eau. En incluant la biodiversité dans World3, nous serions en mesure de mieux comprendre les conséquences de l'érosion de la biodiversité sur les systèmes naturels et humains. Cela permettrait également d'évaluer les répercussions des activités humaines sur la biodiversité et d'identifier des stratégies pour atténuer ces impacts tout en assurant un développement durable. En définitive, intégrer la biodiversité dans le modèle World3 permettrait d'élaborer des scénarios plus réalistes et complets pour orienter les politiques de développement durable et de conservation de la nature, contribuant ainsi à préserver la diversité biologique de notre planète pour les générations futures.

Bibliographie

- [1] Gallard et AL. “GEMS, a Generic Engine for MDO Scenarios: Key Features In Application”. In : 2019. URL : <https://gemseo.org/>.
- [2] Meadows et AL. “The Limits to Growth”. In : 1972.
- [3] Nicholas J. Leach et AL. “FAIRv2.0.0 : a generalized impulse response model for climate uncertainty and future scenario exploration”. In : Geoscientific Model Development, 2021. DOI : 10.5194/gmd-14-3007-2021. URL : <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3007-2021>.
- [4] World BANK. *API - World Bank*. Rapp. tech. 2024. URL : <http://api.worldbank.org/v2/topic?format=json>.
- [5] University of CALGARY. *Energy density*. Rapp. tech. 2017. URL : https://energyeducation.ca/encyclopedia/Energy_density.
- [6] Julien CATTIAUX. “Modélisation et variabilité interne, support de cours M2 SOAC UPS”. French. In : 2022.
- [7] Fabio Monforti FERRARIO et al. “EDGARv6 : Emission Database for Global Atmospheric Research”. In : European Commission, 2021. URL : <http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b>.
- [8] FOOD et Agriculture Organization of the UNITED NATIONS. *FAOSTAT*. Rapp. tech. 2024. URL : <https://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- [9] Tim HERZOG. “Introducing WBGAPI: A new python package for accessing World Bank data”. In : *World Bank Blogs* (2021). URL : <https://blogs.worldbank.org/opendata/introducing-wbgapi-new-python-package-accessing-world-bank-data>.
- [10] *JAX Documentation*. URL : <https://jax.readthedocs.io/en/latest/notebooks/quickstart.html>.
- [11] *Just In Time Compilation with JAX*. URL : <https://jax.readthedocs.io/en/latest/jax-101/02-jitting.html>.

- [12] cité des sciences et de L'INDUSTRIE. Rapp. tech. URL : https://www.cite-sciences.fr/archives/francais/ala_cite/expo/tempo/planete/portail/labo/worldometers.html#:~:text=Une20tonne%20de%20charbon%20%C3%A9quivalent%20p%C3%A9trole.
- [13] L. Brevault M. BALESDENT. «*MULTIDISCIPLINARY DESIGN OPTIMIZATION, APPLICATION TO AEROSPACE VEHICLE DESIGN*». Ecole Polytechnique, 2023.
- [14] Dennis MEADOWS et Jorgan RANDERS. *The limits to growth: the 30-year update*. Routledge, 2012.
- [15] Donella H. MEADOWS et al. "The limits to growth". In : Universe Books New York, 1972. DOI : 10.12987/9780300188479-012. URL : <https://doi.org/10.12987/9780300188479-012>.
- [16] United NATIONS. *Data Portal API - Population Division*. Rapp. tech. 2024. URL : <https://population.un.org/dataportalapi/api/v1>.
- [17] United NATIONS. "International Standard industrial classification of all economic activities (ISIC). Number no. 4, rev. 4 in Statistical papers." In : 2008.
- [18] Arjuna NEBEL et al. *Recalibration of limits to growth: An update of the World3 model*. Rapp. tech. 2023. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.13442>.
- [19] William D. NORDHAUS et Joseph BOYER. "Warming the World, Economic Models of Global Warming". English. In : sous la dir. de JosephN. PELTON, Scott MADRY et Sergio CAMACHO-LARA. The MIT Press, 2000. DOI : 10.1038/432677a. URL : <https://doi.org/10.1038/432677a>.
- [20] National OCEANIC et ESRL ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. "Average carbon dioxide (CO) levels in the atmosphere worldwide from 1959 to 2022 (in parts per million)". In : Statista, 2023. URL : <https://www.statista.com/statistics/1091926/atmospheric-concentration-of-co2-historic/>.
- [21] Global Carbon PROJECT. "Supplemental data of Global Carbon Budget 2019 (Version 1.0) [Data set]". In : Global Carbon Project, 2019. URL : <https://doi.org/10.18160/gcp-2019>.
- [22] Department of Economic UNITED NATIONS et Social Affairs Population DYNAMICS. *World Urbanization Prospects*. Rapp. tech. 2018. URL : <https://population.un.org/wup/DataQuery/>.
- [23] Oxford UNIVERSITY. "Energy". In : (2023). URL : <https://ourworldindata.org/energy>.
- [24] *What Is Just-In-Time (JIT) Compilation?* URL : <https://www.howtogeek.com/devops/what-is-just-in-time-jit-compilation/>.