



## RAPPORT DE STAGE DE FIN D'ÉTUDE

---

# Comprendre les dynamiques de l'anthropocène

---

*Par :*  
Achille BAUCHER

*Tuteur:*  
Romain COUILLET  
*Encadrant pédagogique:*  
Xavier TANNIER

The logo for Inria, featuring the word 'Inria' in a red, cursive script font.



Mars 2022

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Contexte pratique et institutionnel du stage</b>	<b>6</b>
2.1	Contexte pratique . . . . .	6
2.2	Institutions . . . . .	6
<b>3</b>	<b>World3</b>	<b>9</b>
3.1	Présentation générale . . . . .	9
3.2	Détails plus techniques du modèle . . . . .	10
3.3	Implémentation des scénarios . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Apprentissage automatique de dynamiques de systèmes</b>	<b>14</b>
4.1	Echo State Networks . . . . .	14
4.2	Approches par features . . . . .	19
4.3	Limites . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Pydynamo</b>	<b>22</b>
5.1	Syntaxe . . . . .	22
5.2	Compilateur . . . . .	23
5.3	Usage . . . . .	25
5.4	Documentation . . . . .	27
5.5	Expériences . . . . .	27
5.6	TP . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>32</b>

## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant rendu ce stage possible et convivial:

Annie Simon pour son attention et sa réactivité à m'aider peu importe le nombre de fois où j'ai oublié mes clefs et cassé mon ordinateur,

Denis Trysrtam pour sa motivation et ses encouragements,

Hugo, Rémi, Théo et Victor pour avoir comblé notre vie de bureau de séances de courses, de croissants et d'entraide,

Romain Couillet pour sa confiance, son ouverture et sa motivation implacable,

Xavier Tannier pour m'avoir permis de m'exprimer avec confiance dans ce rapport en nous demandant d'intégrer une composante critique sur les aspects écologiques et sociaux,

Et tou.te.s les doctorant.e.s avec qui j'ai pu passer de merveilleux repas CROUS à débattre sur le plat végétarien.

## Remarques préliminaires

Je tiens à préciser quelques remarques sur les choix qui ont guidé l'écriture de ce rapport:

- Afin d'éviter de vous ennuyer, j'ai parfois préféré une rédaction narrative à une approche froidement technique qui rendrait mal compte du déroulement du stage. C'est aussi pour questionner la finalité du travail technique, et remettre au centre les questions de vie et d'épanouissement.
- Les aspects d'utilité sociale et environnementale sont au coeur de mon stage et de mes réflexions, et ne disposent pas d'une partie à part.
- Je pense, comme précisé à l'aide d'exemples dans la partie 2.2, que la neutralité politique dans la recherche est en fait une adhésion à l'idéologie des institutions en place, et c'est pourquoi j'ai préféré exprimer mon opinion.
- J'ai généralement préféré écrire en terme plus intuitifs que mathématiques, et seules certaines rubriques des parties 4 et 5 nécessitent des compétences techniques.

# 1 Introduction

J'explique ici ce qui m'a amené à effectuer ce stage, puis j'annonce le plan du rapport.

J'étais d'abord assez convaincu qu'aucun travail, qu'il soit en recherche publique ou ailleurs, ne puisse avoir un impact mélioratif quelconque sur les sujets qui me tenaient à coeur. L'immensité des problèmes écologiques et sociaux présents et à venir, la puissance et la stabilité de la dynamique du capitalisme industriel, contrastait avec l'insignifiant impact de mes engagements associatifs à Polytech. Comment les ateliers de réparation Rafisto que nous avons créés pourraient être efficaces, quand il est contraire aux intérêts de l'industrie de concevoir des objets réparables ? Comment donner du sens aux projets écologiques auxquels j'ai contribué avec l'association Lupalytech, lorsque la raison d'être de l'école est d'offrir des carrières attractives en adéquation avec les besoins des entreprises <sup>1</sup> ? J'étais ainsi plutôt résigné à ne pas pouvoir trouver de sens dans mon travail.

J'ai alors orienté mes recherches de stage vers les sujets que je trouvais les plus stimulants. Au long de mes années à Polytech, puis particulièrement lors de mon semestre d'échange à Oslo, j'ai développé une fascination pour les méthodes d'intelligence artificielle et les théorèmes mathématiques profonds et bien solides. J'ai donc cherché, survolant articles de recherche, laboratoires et chercheur.e.s, un moyen de contribuer à mieux comprendre mathématiquement certaines méthodes d'intelligence artificielle. C'est ainsi que j'ai découvert la page de Romain Couillet, professeur à l'Université Grenoble Alpes, sur un sujet des plus stimulants et ésotériques: les matrices aléatoires appliquées au machine learning. J'ai alors postulé pour travailler autour d'un sujet de thèse proposé, qui comportait le terme de sobriété numérique dans son intitulé. Mais sans réel espoir de contribuer à une réelle sobriété: le phénomène d'effet rebond [19] rendait pour moi caduques les efforts dans ce domaine.

Cependant, Romain était alors en pleine remise en question existentielle de ses recherches. Face au décalage entre l'urgence écologique et l'obstination des laboratoires à poursuivre le développement d'une intelligence artificielle polluante, non conviviale, et d'une utilité contestable [5], il cherchait une voie de sortie pour donner du sens à son travail. C'était une chance inouïe pour moi, et je me suis aperçu au cours de notre entretien que nous étions sur la même longueur d'onde sur beaucoup de sujets. Il m'a alors spécialement conçu un sujet de stage correspondant à un entre-deux dans sa transition: tenter de mieux comprendre les dynamiques de l'anthropocène, à l'aide d'outils de machine learning.

Mon stage s'est déroulé au Laboratoire d'Informatique de Grenoble, dans une équipe de l'INRIA et je commencerai dans la partie 2 par décrire ces structures et le contexte pratique du stage. En ce qui concerne mon travail, j'ai commencé par étudier et prendre en main informatiquement le modèle systémique World3, dont je parlerai pendant la partie 3. Conjointement, je me

---

<sup>1</sup>Lire le mot du directeur: <https://www.polytech.sorbonne-universite.fr/le-mot-du-directeur>

suis d'abord penché sur l'étude de méthodes de machine learning, principalement les Echo State Networks, pour tenter d'apprendre les dynamiques de ce modèle, une tentative que je présenterai dans la partie 4, mais qui n'a pas réellement abouti. Nous avons alors choisi d'abandonner cet aspect, pour chercher un moyen d'enseigner de manière conviviale les concepts les plus importants du modèle World3. J'expliquerai dans la partie 5 comment nous avons conçu un module python permettant de manipuler facilement le modèle, et une séance de travaux pratiques à destination d'étudiant.e.s ou de curieu.x.ses. Je finirai par conclure sur mon ressenti au sujet du stage dans la partie 6.

## 2 Contexte pratique et institutionnel du stage

Je commencerai par décrire les détails pratiques et matériels du stage dans la partie 2.1, puis parlerai plus en détail des institutions concernées dans la partie 2.2

### 2.1 Contexte pratique

J'ai passé la majorité de mon stage à l'IMAG<sup>2</sup>, un imposant bâtiment affirmant sa modernité par ses façades noires et blanches, ses volets intelligents et ses badges à l'allure très sécurisée. Au coeur de l'immense campus de l'Université Grenoble Alpes, à Saint-Martin d'Hères, le bâtiment accueille plusieurs équipes de chercheur.e.s du LIG<sup>3</sup>, en informatique et mathématiques appliquées. Je partageais un bureau avec trois doctorants, plutôt concernés par des aspects mathématiques et adeptes de la course à pied. Je n'ai eu besoin dans mon stage que d'un ordinateur d'occasion, ayant décliné la proposition d'en commander un en prévision de ma thèse, afin d'éviter une fabrication inutile, qui concentre la majorité de la pollution liée aux ordinateurs [19].

De temps à autres, toutes les deux semaines environ, nous discussions avec mon tuteur et d'autres collègues, dans un bureau ou lors d'une course dans les montagnes environnantes. Nos discussions portaient soit sur les aspects concrets des avancements et orientations de mon travail, soit sur des projets et considération plus larges, principalement sur l'écologie et la recherche scientifique. J'ai pu ainsi être sensibilisé à de nombreuses problématiques et contradictions soulevées par des chercheur.e.s en intelligence artificielle.

Je passais ensuite la majeure partie de mon temps à lire des articles scientifiques, programmer en python, rédiger, réfléchir, le tout en autonomie. Je n'ai pas hésité à contacter directement d'autres chercheur.e.s lorsque j'avais besoin d'aide. Cependant, cette pratique n'est pas particulièrement encouragée: on m'a ainsi trouvé très étrange lorsque je suis descendu de 2 étages pour demander à des chercheur.e.s d'autres équipes leur avis sur un sujet scientifique.

### 2.2 Institutions

Je commencerai par décrire quelques aspects administratifs de mon stage, puis les institutions en jeu et mon opinion sur leur rôle en tant que chercheur et citoyen.

Mon stage était financé par le GIPSA-lab<sup>4</sup>, l'ancien laboratoire de Romain, porté sur les systèmes et signaux complexes. Je travaillais à l'INRIA<sup>5</sup>, au sein de l'équipe POLARIS<sup>6</sup>, habituellement concernée par les problématiques de performances sur les grands réseaux informatiques.

---

<sup>2</sup>institut d'Informatique et de MATHématiques de Grenoble

<sup>3</sup>Laboratoire d'Informatique de Grenoble, <https://www.liglab.fr/>

<sup>4</sup>Grenoble Image Parole Signal Automatique, <http://www.gipsa-lab.fr/>

<sup>5</sup>Institut National de Recherche en Informatique Appliquées, <https://www.inria.fr>

<sup>6</sup>Performance evaluation and Optimization of LARge Infrastructures and Systems, <https://team.inria.fr/polaris/>

L'argent dont disposait Romain pour financer mon stage venait du projet MIAI<sup>7</sup>, le projet grenoblois de recherche en intelligence artificielle, financé par l'État dans le cadre du programme national de recherche en intelligence artificielle<sup>8</sup>. Le cadre idéologique de l'élaboration de ces projets sont tout sauf neutres. Il s'appuie sur le caractère inéluctable du développement de l'intelligence artificielle et de la compétition internationale, pour en déduire que la France doit être à la pointe de ce domaine. La transformation de l'enseignement supérieur et de la recherche avec l'IA est alors vue comme nécessaire pour alimenter l'innovation et renforcer l'industrie, à travers des partenariats rapprochés avec le monde économique<sup>9</sup><sup>10</sup>. J'ai appris à travers ma lecture de [16] que ce type de discours est historiquement utilisé de manière récurrente par les états et le monde industriel pour imposer à la population des transformations qui n'intéressent qu'une certaine élite.

La dépendance étroite qu'entretient l'INRIA avec le monde industriel n'est pas qu'administrative, mais influence concrètement l'orientation des recherches et la liberté au sein de celles-ci. D'abord, les principaux thèmes que l'INRIA porte à son ordre du jour sont élaborés conjointement avec certaines institutions. C'est par exemple le cas de l'Agence de l'Innovation de la Défense<sup>11</sup>, qui a élaboré en 2019 puis en 2021<sup>12</sup><sup>13</sup> avec l'INRIA les grands axes prioritaires en informatique et intelligence artificielle. Ces thèmes de recherche se retrouvent largement dans les activités du LIG, ce qui contribue à la stratégie d'innovation duale de l'armée qui est de récupérer les inventions du domaine civil à des fins militaires<sup>14</sup>. Par exemple, une intelligence artificielle robuste et sobre, un des objectifs des recherches précédentes de mon tuteur, est essentielle pour son usage militaire dans des systèmes embarqués. Lors d'un séminaire d'équipe de présentation de thèse, l'exemple du drone tueur militaire illustre une présentation sur l'éthique de l'IA. Ensuite, la dépendance financière aux industries oblige l'INRIA à se présenter à elles d'une manière favorable. Lorsque Romain et son collègue Denis Trystram ont voulu diffuser un article critique sur le rôle de l'intelligence artificielle et son impact écologique, il leur a fallu plus de 8 révisions et soutenir les remontrances de la direction avant que celle-ci n'accepte

---

<sup>7</sup>Multidisciplinary Institute in Artificial Intelligence, <https://miai.univ-grenoble-alpes.fr/>

<sup>8</sup><https://www.intelligence-artificielle.gouv.fr/fr/projets/instituts-interdisciplinaires-d-intelligence-artificielle-3ia>

<sup>9</sup><https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/grenoble-nice-sophia-antipolis-paris-et-toulouse-preselectionnes-pour-les-instituts-47146>

<sup>10</sup><https://www.intelligence-artificielle.gouv.fr/fr/strategie-nationale/la-strategie-nationale-pour-l-ia>

<sup>11</sup>AID, <https://www.defense.gouv.fr/fre/aid>

<sup>12</sup>INNOVATION DE DÉFENSE BILAN D'ACTIVITÉS 2019, [https://www.defense.gouv.fr/content/download/592182/10032086/file/2020\\_Rapport\\_activites\\_AID.pdf](https://www.defense.gouv.fr/content/download/592182/10032086/file/2020_Rapport_activites_AID.pdf)

<sup>13</sup>Accord INRIA ministère des armées, <https://www.defense.gouv.fr/aid/actualites/signature-d-un-nouvel-accord-de-partenariat-entre-inria-et-le-ministere-des-armees>

<sup>14</sup>Cette stratégie, ainsi que tous les thèmes prioritaires de recherche de l'armée, est décrite dans le Document de référence de l'orientation de l'innovation de défense (DrOID), <https://www.defense.gouv.fr/fre/content/download/592220/10032536/DrOID.pdf>



leur proposition <sup>15</sup>.

Ces exemples illustrent la non-neutralité de la recherche: participer sans se questionner au développement de la recherche scientifique telle qu'elle est proposée, c'est en fait contribuer à un système technique et idéologique précis. Au cours de ce stage, nous avons assumé une posture critique face à l'injonction de la performance académique et technique, pour essayer de placer l'utilité sociale et écologique au coeur de nos objectifs, quitte à réviser ceux-ci.

---

<sup>15</sup>Les principaux arguments de ce billet sont publiés sur: <https://theconversation.com/apprentissage-profond-et-consommation-energetique-la-partie-immeree-de-lia-ceberg-172341>

## 3 World3

Nous avons commencé par nous intéresser au modèle World3, que je présente d'abord généralement en 3.1 puis plus techniquement en 3.2. Je parlerai ensuite dans la partie 3.3 des différentes implémentations existantes de ce modèle, et de pourquoi j'ai choisi de concevoir un nouvel outil.

### 3.1 Présentation générale

Cette introduction au modèle World3 est tirée de l'article que j'ai rédigé pour la conférence GRETSI<sup>16</sup> pendant le stage:

*Pourquoi la croissance aurait-elle besoin de limites ? Parce que croître, cela signifie croître matériellement, et que la planète est matériellement limitée: c'est la réponse que proposent en 1972 les auteur.e.s de The Limits To Growth. Pour le prouver, iels s'appuient sur des multitudes d'études scientifiques pour condenser les dynamiques du monde industrialisé et de l'environnement en une 150aine d'équations. Celles-ci forment le modèle World3, qui est ensuite réécrit dans un langage informatique pour exécuter les simulations de différents scénarios. Les résultats servent alors d'illustration au message principal: le monde industrialisé doit fixer lui-même des limites à sa croissance pour éviter un effondrement subi.*

*Les auteur.e.s ne remettent pas en question le bien-fondé de la croissance ou du capitalisme industriel en soit, qui sont considérés comme plutôt bénéfiques pour l'humanité. Le problème est réduit à ses enjeux environnementaux: une relation entre l'humanité, homogène, qui interagit en consommant et dégradant, avec l'environnement, qui à son tour impacte l'activité humaine.*

*Le modèle tente de reproduire les mécanismes que les auteur.e.s observent au long du développement du monde industriel au 20ème siècle. Pour élaborer les différents scénarios, certains changements dans ces mécanismes sont introduits à partir d'une certaine date, marquant l'application immédiate et homogène d'une nouvelle politique.*

*Absence de considérations politiques et sociales, vision coloniale d'un développement bénéfique pour l'humanité entière, réduction de l'écologie à un problème environnemental, importance écrasante attribuée à la technologie, obsession pour la conservation de l'industrie, simplifications et causalités discutables, les critiques ne manquent au sujet des choix de modélisation. Cependant, tout en les gardant en tête, de nombreux concepts essentiels sont expliqués et soulignés à travers le modèle World3: la complexité d'un système holistique, la croissance et l'impact écologique, la diversité des limites planétaires. L'immense travail de rassemblement d'observations empiriques permet de les rendre concret, et la possibilité d'effectuer des simulations informatiques permet à la fois d'illustrer ces concepts, d'explorer et de sensibiliser.*

---

<sup>16</sup>Groupe de Recherche et d'Etudes de Traitement du Signal et des Images, <http://gretsi.fr/colloque2022/>

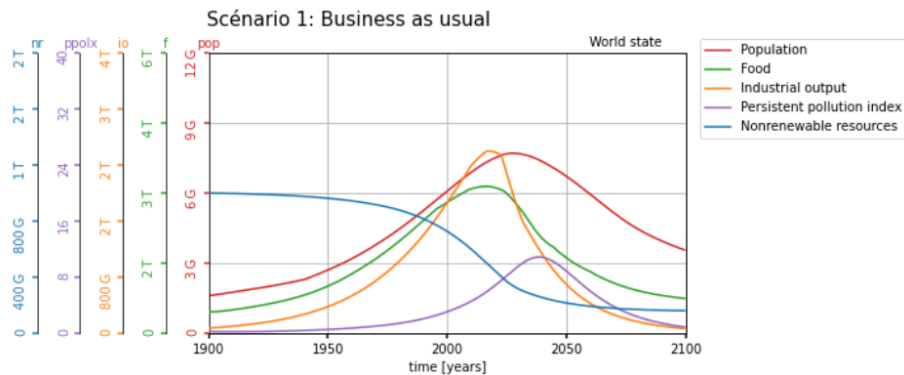


Figure 1: Simulation par défaut du modèle World3

C'est ainsi pour ces dernières raisons que nous avons choisi d'étudier le modèle.

Le résultat de la simulation par défaut, qui suppose que les dynamiques de croissance du monde industriel perdurent essentiellement comme elles l'ont fait durant le 20ème siècle, montre sur la figure 1 un effondrement, c'est-à-dire ici une baisse conjointe de la population et de la quantité de biens, services et nourriture par personne, autour de 2025. Mais attention: le modèle est essentiellement qualitatif: il n'a pas la prétention de prévoir et de quantifier précisément l'avenir du système Terre, mais de montrer quels types de phénomènes sont susceptibles de se produire selon certaines hypothèses.

Dans ce scénario, l'effondrement est causé par la raréfaction des ressources, qui rend leur extraction soudainement beaucoup plus difficile. Cette augmentation de coût se répercute alors sur l'ensemble de l'industrie qui sombre dans une boucle d'effondrement. Pour dépasser cette limite, les auteur.e.s ont ensuite conçu d'autres scénarios modifiant les paramètres par défaut. J'ai implémenté et expliqué l'interprétation de chacun de ces scénarios avec le module Python que je décris dans la partie 5<sup>17</sup>

## 3.2 Détails plus techniques du modèle

### Généralités

Généralement, la simulation commence en 1900, et après une initialisation, le modèle s'actualise entièrement 2 fois par an, et ce jusqu'en 2100. Lors d'une actualisation, chaque variable se met à jour d'après le calcul décrit dans son équation, qui utilise plusieurs autres variables et constantes. Beaucoup de variables sont mises à jour avec un schéma d'Euler, ce qui signifie que pour calculer leur valeur actuelle, on ajoute à leur valeur précédente une certaine quantité

<sup>17</sup>L'analyse des scénarios est disponible dans ce notebook: <https://gitlab.inria.fr/abaucher/pydynamo/-/blob/master/examples/LimitsToGrowth03.ipynb>.

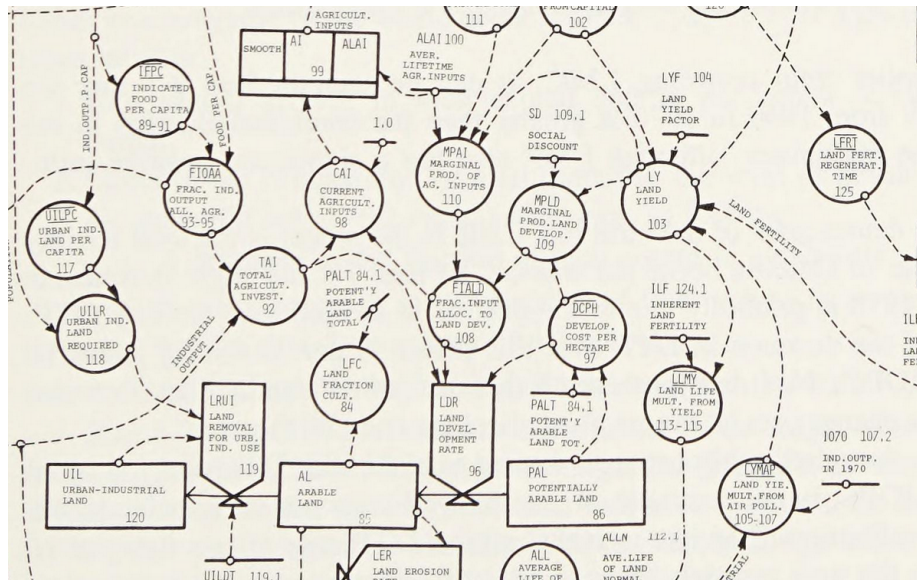


Figure 2: Extrait du diagramme d'influence mutuelle des variables pour le secteur de l'agriculture, tiré de la documentation technique [20]

multipliée par le pas de temps, ici une demi-année.

Chaque variable concerne le monde entier: par exemple *POP* représente la population mondiale, *FPC* (*Food Per Capita*) la moyenne mondiale de nourriture par personne. Les liens qui ont été établis entre chaque variable sont très nombreux, et on peut voir sur la figure 2 un extrait du schéma des influences mutuelles qu'elles exercent les unes sur les autres.

### Équations et fonctions non-linéaires

Une équation peut être évidente: la nourriture par personne est calculée comme le ratio entre nourriture totale et population totale:  $FPC = F/POP$ . Cependant, de nombreux phénomènes observés sont retranscrits à l'aide de fonctions plus compliquées. Par exemple, il a été observé lors d'études dans plusieurs pays, que les services de santé par personne avaient une certaine relation avec la quantité de services industriels par personne, comme vu sur la figure 3. De ces observations ont été déduites une causalité: les services de santé par personne sont déterminés des services produits par personne, selon la courbe de la figure 4 qui reproduit les observations.

À travers cet exemple, on note déjà qu'il est nécessaire de s'armer de prudence face au modèle, qui retranscrit une vision politiquement située des auteurs.e.s. Premièrement, par le choix des causalités. Puis, par l'homogénéisation de tout système possible de santé en un seul mécanisme: pour améliorer la santé, on passe nécessairement par une augmentation des services produits par per-

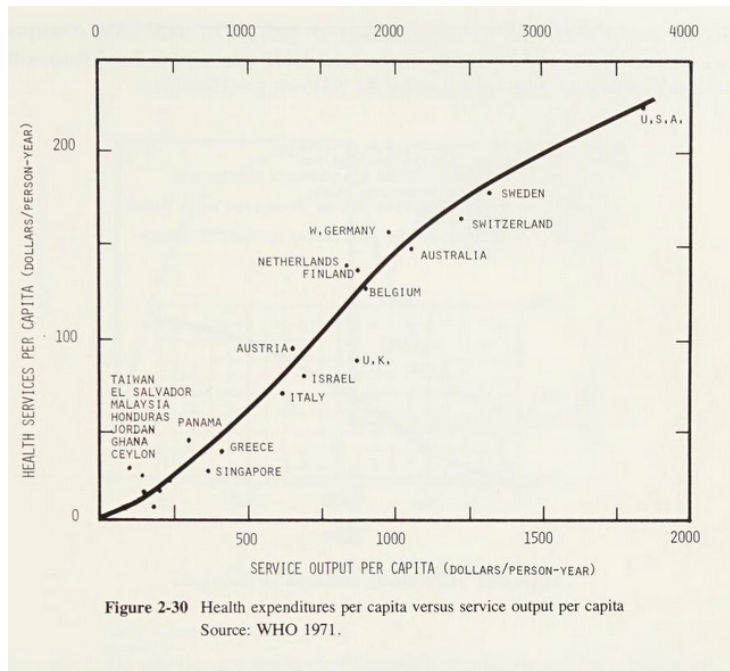


Figure 3: Relation entre les services de santé par personne et les services produits par personne, tiré de la documentation technique [20]

sonne, une variable qui est elle-même déterminée par le produit industriel. Le modèle et les croyances des pays occidentaux sont ainsi copiées, sans considérer des alternatives telles qu'une autonomisation de la santé<sup>18</sup>. L'implémentation de cette courbe suggère aussi qu'il est possible pour tout le monde d'accéder à une bonne santé avec un capital élevé, ce qui masque les inégalités et le fait que le capital élevé des pays occidentaux dépende d'une industrie qui contribue à détruire la santé d'autres populations<sup>19</sup>.

### 3.3 Implémentation des scénarios

Le livre technique [20] qui décrit le modèle World3 fait environ 600 pages d'explications, le modèle est composé de plus de 150 équations et d'autant de variables et de constantes. De plus, il n'existe plus aucun interpréteur pour le langage utilisé, DYNAMO, qui est vieux de plus de 50 ans.

Heureusement, une implémentation python, pyworld3, avait été réalisée par Charles Vanwynsbergue<sup>20</sup>. Ça a été pour lui un immense et fastidieux travail de

<sup>18</sup>J'ai été sensibilisé à cette alternative, par opposition à une santé hétéronome et technologique, à travers ma lecture de [12]

<sup>19</sup>Cette vision est critiquée dans le mouvement d'écologie décoloniale, que j'ai découvert grâce au reportage [8] sur le chlordécone en Martinique

<sup>20</sup><https://github.com/cvanwynsberghe/pyworld3>

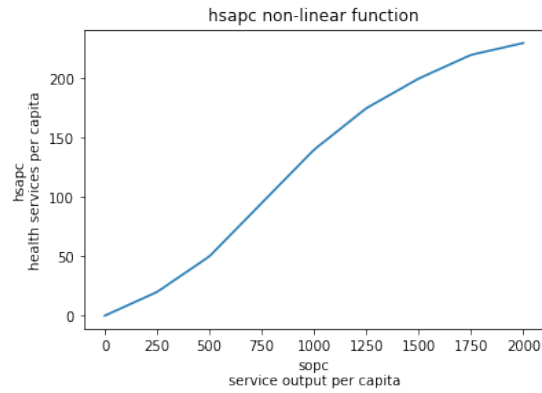


Figure 4: Implémentation de la fonction qui lie les services de soins par personne aux services produits par personne

réimplémenter chacune des équations. Après un entretien avec lui, j'ai décidé de me servir de son module, qui était simple à utiliser, efficace et produisait de jolis graphiques, ressemblant à celui de la figure 1.

Mon premier objectif a été de reproduire les 12 scénarios présentés dans le livre. Les trois premiers, qui consistaient simplement à changer un paramètre, ont été très faciles. En revanche, les suivants nécessitaient de modifier à la main le code python, ce qui était déjà fastidieux pour moi, et absolument impensable pour quelqu'un n'ayant pas le temps et l'expertise nécessaire.

C'est pourquoi, après quelques impasses, j'ai décidé de concevoir un nouveau module que je présenterai dans la partie 5.

## 4 Apprentissage automatique de dynamiques de systèmes

Les équations de World3 ont été écrites par des experts au vu d'observations empiriques. Mais les relations causales qui ont été déduites sont-elles justifiées ? Les mécanismes relevés sont-ils vraiment dominants ? Les formes des fonctions non linéaires sont-elles bonnes ? Il y a fort à parier que de nombreuses améliorations de ce type sont à apporter. Afin d'avoir une compréhension plus affinée des mécanismes qui gouvernent ce système global, nous avons tenté d'utiliser des outils de machine learning pour inférer des informations à partir de données. Il faut avouer que cette approche servait surtout à inclure un aspect mathématique et machine learning à mon stage, car c'était notre domaine. Et si j'ai appris pas mal de concepts intéressants lors de cette étude, que je présenterai dans cette partie, nous avons dû nous avouer que sa finalité était dès le départ assez illusoire.

### 4.1 Echo State Networks

Nous nous sommes d'abord demandé si les Echo State Networks (ESN) étaient en mesure d'inférer les mécanismes d'un système dynamique. Je décris dans cette partie le fonctionnement des ESN, et les aspects théoriques que nous avons étudiés pour répondre à notre question.

#### Principe

En termes techniques, un Echo State Network est un réseau neuronal récurrent à une couche cachée, destiné à un entraînement supervisé pour la prédiction de séries temporelles. Je résumerai rapidement ses caractéristiques et intuitions, que je tire principalement du tutoriel [15].

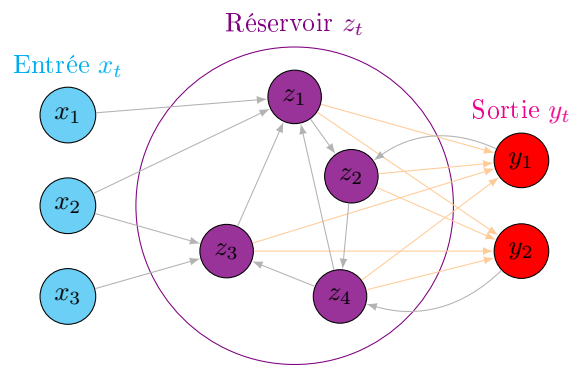


Figure 5: Représentation d'un ESN à 3 neurones d'entrée, 4 dans le réservoir et 2 en sortie. Les flèches grises représentent les poids fixés au départ, tandis que les oranges sont entraînés avec une régression linéaire.

Les réseaux récurrents sont conçus pour manipuler des *séries temporelles*: à chaque valeur d'entrée ( $x_t$ , en bleu) au temps  $t$  on attribue une valeur de sortie ( $y_t$ , en rouge). L'aspect récurrent signifie que l'état actuel des neurones est calculé à partir de l'état précédent. Cette récurrence est appliquée à deux endroits: pour les neurones du réservoir, en violet, et pour ceux de la sortie, en orange. Ce principe est pertinent dans le cas où: le résultat  $y_t$  que je veux obtenir au temps  $t$  ne dépend pas seulement de l'entrée  $x_t$ , mais aussi d'*informations à propos de ce qu'il s'est passé avant*, et qui sont contenues dans l'état précédent du réseau.

Dans un ESN, les connexions et poids entrant dans le réservoir sont fixées aléatoirement dès le début. Seule la couche de sortie (en orange) est optimisée lors de l'entraînement. Elle est directement calculée pour minimiser l'erreur des moindres carrés entre la sortie et les données, *par une seule régression linéaire*. Le pari de l'ESN, c'est que le caractère clairsemé et aléatoire du réservoir va permettre aux neurones qu'il contient d'être une combinaison originale et diversifiée des entrées aux temps précédents. Ensuite, seule la couche de sortie est entraînée, afin de sélectionner, par le poids attribués à chaque neurone du réservoir, la combinaison la plus proche du résultat. En résumé, l'idée est d'avoir *de la richesse et de la diversité dans le réservoir, une sélection affinée par la couche de sortie*.

Pour effectuer la minimisation sur les poids de sortie, il faut connaître l'état des neurones du réservoir à chaque temps d'entraînement. Mais lorsque les connexions entre les neurones de sorties et du réservoir ne sont pas nulles, c'est impossible, car on a besoin de connaître la valeur des poids de sortie pour les calculer. On applique alors l'astuce du *teacher forcing*, c'est-à-dire qu'on calcule l'état des neurones du réservoir comme si les sorties avaient la valeur des données d'entraînement. Les données enseignent ainsi de manière forcée aux neurones du réservoir, d'où le nom.

### Propriétés et intérêt

Ce qui nous intéresse chez les réseaux récurrents, c'est leur capacité à se souvenir d'entrées passées pour calculer les sorties actuelles. Dans un ESN, la récurrence permet aux neurones du réservoir de porter la mémoire d'informations passées: mais pas trop lointaines. En effet, le réservoir doit se comporter comme la caisse de résonance d'un écho (d'où le nom): les entrées d'un instant doivent se répercuter dans les états du réservoir pendant quelques itérations, puis progressivement s'estomper. On suppose en effet que seules les dernières informations sont cruciales pour calculer la sortie présente: dans le cas inverse, l'information nécessaire serait en constante augmentation, ce qui n'est pas très vraisemblable pour un phénomène réel. Dans le système de Lorentz par exemple, un phénomène physique de référence illustré sur la figure 6, on n'a besoin que des 4 ou 6 derniers états pour prévoir le suivant.

Si la propagation des entrées dans le réservoir s'estompe progressivement, c'est grâce à une certaine condition. Il faut que le rayon spectral de la matrice des poids du réservoir soit inférieur à 1, ce qui signifie intuitivement qu'à chaque



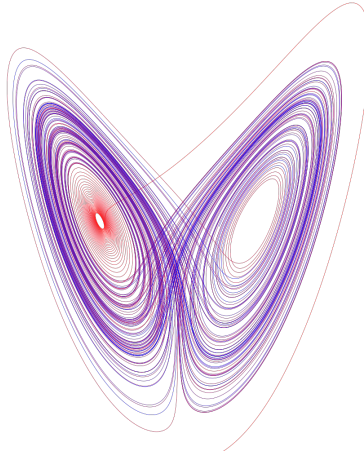


Figure 6: Mouvement d'une particule dans un système de Lorenz, qui modélise entre autres le phénomène de convection atmosphérique.

itération, la valeur des nouveaux états (obtenus par un produit de cette matrice) ne va pas exploser mais plutôt décroître exponentiellement, comme illustré sur la figure 7.

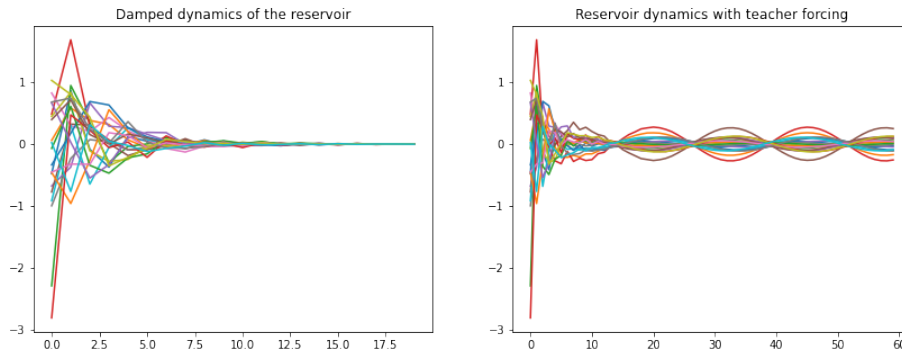


Figure 7: Dynamique des états des neurones du réservoir d'un ESN. À gauche, il n'y a pas d'entrées, et l'écho initial s'estompe progressivement. À droite, les entrées sont injectées dans le réseau (avec l'astuce du *teacher forcing*), les neurones du réservoir évoluent en concert avec le rythme appris.

D'autres astuces sont décrites dans cet article d'analyse des ESN [14], comme le fait d'avoir un réservoir très épars pour favoriser les dynamiques de petits groupes de neurones, ou d'ajouter du bruit lors de l'entraînement pour éviter le sur-apprentissage.

Une fois ces astuces implémentées, les ESN peuvent surprendre par leur capacité à reproduire des phénomènes. J'ai reproduit quelques expériences du

tutoriel [13] dans les figures 8. Des tâches comme l'apprentissage de mélodies, ou de signaux de changements d'états, sont aussi réalisables.

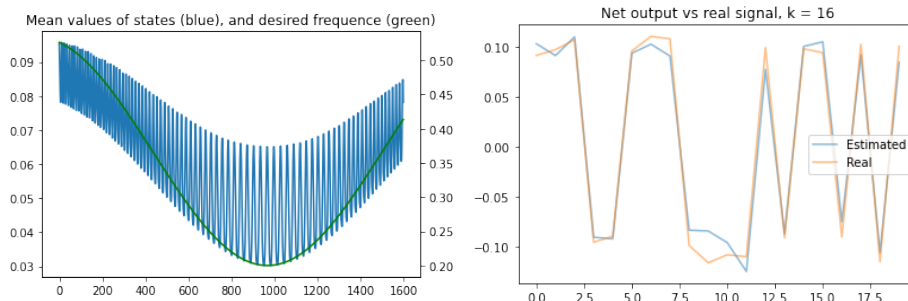


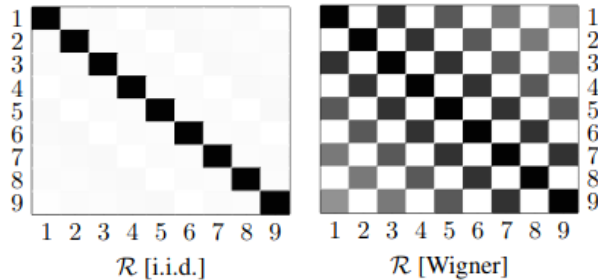
Figure 8: Expériences de prédiction réalisées avec les ESN. À gauche, la sortie est un onde sinusoïdale de fréquence variable. À droite, le réseau a appris à retransmettre des valeurs arbitraires avec un certain retard.

Un intérêt crucial des ESN est leur simplicité d'entraînement: une seule régression linéaire ! C'est ce qui a permis à Romain et ses collègues de mathématiser leur comportement dans l'article [4]. Les auteurs se servent ici du fait que le réservoir est une matrice aléatoire, et que les poids entraînés ne sont en fait que des produits matriciels, solution de la régression. En utilisant des propriétés statistiques asymptotiques sur les matrices aléatoires en grande dimension, il est alors possible d'obtenir des formules précises à propos des performances de prédiction des ESN. On peut même en déduire quelles sont les structures les plus intéressantes à donner à la matrice de réservoir (voir la figure 9) ! Par rapport au bidouillage aveugle des hyperparamètres, si habituel en machine learning, j'ai trouvé très séduisant de pouvoir déduire ces paramètres à partir de théorèmes mathématiques solides.

### Approximation universelle

Nous n'avons pas choisi d'utiliser les ESN à des fins de prédiction. Le pari était plutôt: si un ESN est capable d'émettre des prédictions sur les résultats d'un système, c'est qu'il a suffisamment réussi à capter les mécanismes propres à ce système pour être capable de les reproduire. Ce sont bien sur ces mécanismes qu'il nous intéresse d'avoir plus d'informations. Ainsi, l'enjeu n'est pas de bidouiller un ESN pour le rendre le plus précis possible, mais de savoir interpréter ce que le réseau a appris. J'ai donc étudié les aspects théoriques des ESN et leurs liens avec d'autres méthodes, pour connaître les informations qu'il était possible de tirer d'un ESN entraîné sur un système à propos des dynamiques et mécanismes de ce système. J'explique ici les détails mathématiques de cette étude, et conclus sur son apport dans le dernier paragraphe.

J'ai commencé par étudier s'il existait des garanties sur la capacité d'un ESN à reproduire le comportement de fonctions arbitraires. Cette question concerne l'universalité: la classe des ESN est universelle si, pour n'importe quelle



**Fig. 3.** Upper  $9 \times 9$  part of  $\mathcal{R}$  for  $c = 1/2$  and  $\sigma = 0.9$  for  $W$  with i.i.d. zero mean Gaussian entries [left] and  $W$  Gaussian symmetric (Wigner) [right].

Figure 9: Deux formes de matrices de poids des réservoirs d’ESN étudiées dans l’article [4]. À gauche, les blocs en diagonale signifient se comportent comme plusieurs réservoirs indépendants, avec des propriétés différentes. À droite, chaque réservoir est intégralement connecté à certains autres.

fonction, on est capable de trouver un ESN qui l’approxime aussi précisément que possible. Cette propriété est démontrée par exemple dans cet article [9]. Mais pourquoi, et de quelle manière une fonction est approximée par un ESN?

L’argument présenté ici s’appuie d’abord sur la capacité d’approximation des polynômes. La classe des polynômes est en effet dense dans l’espace des fonctions qu’on veut approximer, c’est-à-dire intuitivement que l’espace des polynômes remplit tout l’espace de ces fonctions, dans le sens que pour n’importe quelle fonction on peut trouver un polynôme assez proche, tant qu’on peut le choisir arbitrairement grand.

Conjointement, la propriété de *fading memory* de la fonction qu’on veut approximer est invoquée, c’est-à-dire que les sorties actuelles du système ne font pas appel à des informations trop anciennes. L’ESN n’a donc besoin de contenir d’informations qu’à propos des dernières entrées.

L’article en déduit premièrement que les réseaux à réservoir avec une sortie polynomiale sont universels. Ensuite, il remplace les polynômes en intégrant des sigmoïdes dans le réservoir, faisant valoir la capacité d’approximation universelle des combinaisons linéaires de sigmoïdes<sup>21</sup>. Toute fonction peut ainsi être approximée par un réseau à réservoir et sorties polynomiales, qu’on peut transformer à coup de sigmoïdes pour obtenir un ESN.

Mais cette démonstration est finalement une assez mauvaise nouvelle. Premièrement parce qu’on a absolument aucune garantie que c’est via la construction présentée que les ESN apprennent. L’argumentaire de l’article pourrait

<sup>21</sup>Une sigmoïde désigne une fonction plutôt gentille avec quelques propriétés particulières. La démonstration de l’approximation universelle des combinaisons linéaires de sigmoïdes est détaillée en [6].

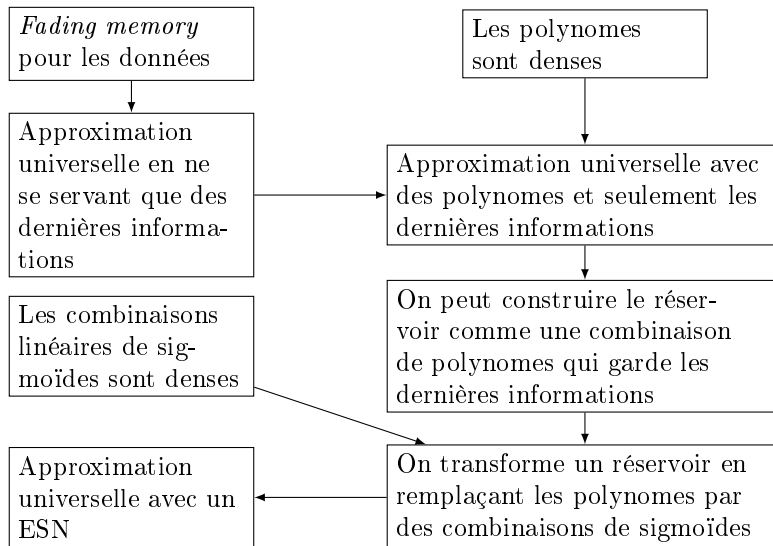


Figure 10: Mon interprétation schématique de la démonstration de l'universalité des Echo State Networks dans [9]

être complètement déconnecté de la pratique de l'apprentissage des ESN, ce n'est qu'une garantie théorique. Ensuite parce qu'elle construit l'ESN à partir de polynômes, et qu'on peut difficilement faire le chemin inverse pour tenter de déduire si l'ESN a appris des mécanismes d'une forme polynomiale. Enfin, parce que les polynômes utilisés pour l'approximation universelle pourraient manquer de capter les véritables dynamiques du système. Par exemple, une exponentielle peut ressembler à un polynôme sur une certaine fenêtre de données, mais l'interprétation qu'on peut faire d'une relation exponentielle est radicalement différente. Nous avons estimé à partir de cette analyse théorique (et d'autres lectures et discussions non mentionnées), et de résultats expérimentaux plutôt infructueux, que l'approche des ESN n'était peut-être pas adaptée pour notre objectif.

## 4.2 Approches par features

Nous avons essayé une autre approche plus interprétable pour apprendre les dynamiques d'un système à partir de données, que je décris dans cette partie.

Cette fois, le principe repose sur les *features*. Une *feature* est une fonction, polynomiale ou trigonométrique par exemple, appliquée aux données. Lors de l'entraînement le but est d'essayer de calculer les dérivées temporelles des variables du système comme une combinaison de *features*.

Cette approche fait le pari que: dans les phénomènes physiques réels, les équations qui régissent la dynamique du système utilisent peu de termes tirés d'une famille finie de fonctions. Par exemple, dans un système de Lotka Volterra,

les dérivées temporelles sont complètement déterminées par une combinaison très simple de polynomes de degré 1 des deux variables:

$$\begin{aligned}\frac{\partial x}{\partial t} &= \alpha x - \beta xy \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= \delta xy - \gamma y\end{aligned}$$

avec  $x$  les proies,  $y$  les prédateurs,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  et  $\gamma$  des constantes. D'après quelques discussions avec des chercheurs étudiant des phénomènes physiques, la plupart des équations qu'on rencontre ont une forme assez simple, et au delà d'une certaine complexité il est de toute façon trop difficile de les interpréter.

Avec ces hypothèses, il existe dans la littérature plusieurs méthodes ([1], [10], [22], [18]) qui sont plus ou moins des variations de [3], que je présente plus en détail. Le principe est ici de calculer la dérivée comme une combinaison linéaire éparsée de *features*. Ce type de méthode est présentée sur le schéma 11. La régression linéaire éparsée consiste à ajouter dans la fonction à minimiser un terme qui pénalise un résultat en fonction du nombre de composantes non nulles, c'est-à-dire ici de *features*, entrant en jeu dans la combinaison. Le défaut de cette régression est que la solution n'est plus un simple produit matriciel, mais qu'elle doit utiliser un optimiseur, beaucoup plus difficile à contrôler mathématiquement.

J'ai utilisé la bibliothèque PySindy [7] pour expérimenter cette approche sur des données réelles, mais les dynamiques identifiées n'avaient rien à voir avec les équations réelles. La plupart du temps, les équations obtenues lors de l'entraînement ne correspondait pas du tout à ce qui se déroulait par la suite.

### 4.3 Limites

Les différentes expériences menées ont été finalement assez peu concluantes, et il y a de très bonnes raisons à cela. Pour le cas particulier de World3, mais des données réelles aussi, les corrélations sont si fortes, homogènes et simultanées qu'il est impossible d'en extraire une causalité et encore moins un mécanisme. Nous ne pourrions obtenir plus de précisions qu'en rajoutant des hypothèses (sur le sens des causalités, sur la forme des fonctions, etc).

En fait, même si de plus amples recherches auraient pu être menées<sup>22</sup> elles auraient peut-être consisté en un immense effort pour une utilité contestable. En effet, une compréhension qualitative des principes les plus importants que nous pouvons tirer d'observations empiriques et du modèle World3 sont totalement accessibles à l'intelligence humaine. L'usage d'algorithmes d'inférence et de masses de données comme moyen d'obtenir de la connaissance correspond plus, dans le cas présent, à un rêve cybernétique qu'à un réel besoin de compréhension. C'est pourquoi nous nous sommes détournés de ce pan de recherche pour nous concentrer vers quelque chose de plus concret.

<sup>22</sup>J'ai regardé [23] pour une approche de la causalité en machine learning et vu [11] pour un apprentissage des dynamiques de système avec du deep learning.

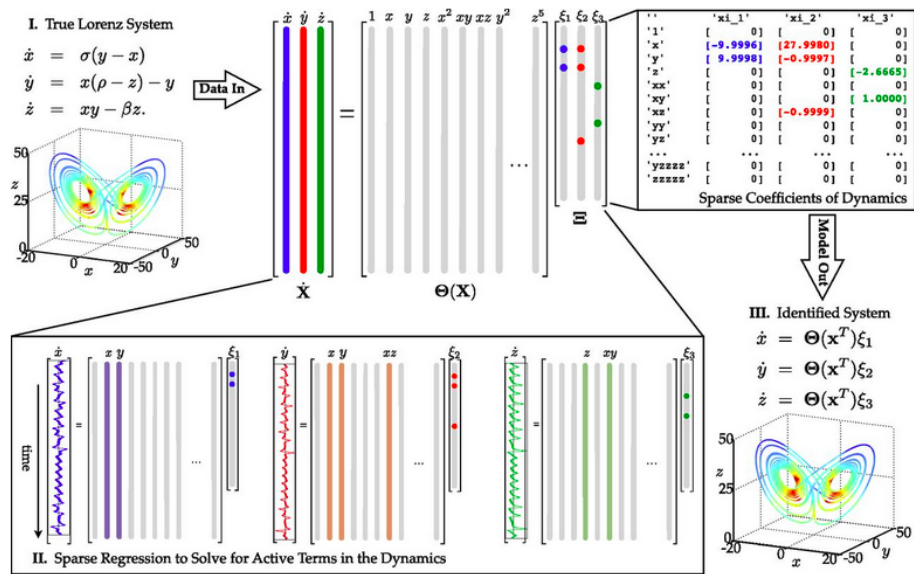


Figure 11: Schéma de fonctionnement de l'approche par *features*, tiré de [3]. En haut à gauche, le système de Lorenz fournit les données (bleu, rouge et vertes), d'où sont calculées les *features* en bas (violet, orange et vert fluo). Celles-ci sont ensuite sélectionnées par régression linéaire épaisse qui donne les coefficients  $\xi$  en haut à droite, pour obtenir les équations apprises en bas à droite.

## 5 Pydynamo

Nous avons vu dans la partie 3.3 pourquoi les implémentations existantes de World3 ne permettaient pas de réaliser simplement ce que je voulais faire, et c'est pourquoi j'ai décidé de me lancer sur mon propre module Python, pydynamo. J'explique dans cette partie comment je l'ai développé afin d'implémenter, de simuler et de visualiser simplement des modèles dynamiques comme World3. Je présente les aspects techniques de la syntaxe et du module dans les parties 5.1 à 5.4. Ensuite, je montre dans la partie 5.5 quelques expériences intéressantes que j'ai pu réaliser à partir du module, puis la séance de travaux pratiques que j'ai conçue dans la partie 5.6.

### 5.1 Syntaxe

*J'ai en tête un modèle dynamique, avec des variables, des constantes et des équations de mise à jour, et je désire l'exprimer formellement le plus simplement possible.* Voilà le cas d'usage auquel le choix de la syntaxe doit convenir. Il doit y avoir un minimum de règles à connaître pour décrire complètement le modèle imaginé. La syntaxe du langage DYNAMO [17], utilisé par la première version de World3, a été conçue précisément pour modéliser les systèmes dynamiques. Mon idée a donc été de reprendre cette syntaxe pour la simplifier et la *pythoniser*, c'est-à-dire la rendre plus lisible par un utilisateur, un compilateur ou un coloriseur de langage Python. On peut voir un exemple de traduction de la syntaxe DYANMO vers pydynamo, pour décrire le même modèle, sur la figure 12.

```
NOTE
NOTE AGRICULTURAL SECTOR
NOTE
NOTE LOOP 1: FOOD FROM INVESTMENT IN LAND DEVELOPMENT
NOTE
84 A LFC.K=AL.E/PALT
C PALT=2.3E9
85 L AL.J=AL.J+(DT)*(LDR.JK-LER.JK-LRUI.JK)
N AL=AL
C ALI=9E9
86 L PAL.K=PAL.J+(DT)*(-LDR.JK)
N PAL=PAL
C PALI=2.3E9
87 A F.K=AL.I*PAL.K*LFH*(1-PL)
C LFI=7
C PL=1
88 A FPC.K=F.K/POP.K
89 A IFPC.K=CLIP(IFPC2.K,IFPC1.K,TIME.K,PYEAR)
90 A IFPC1.K=TABHL(IFPC1T,IOPC.K,0,1600,200)
T IFPC1T=[230,480,690,850,970,1070,1150,1210,1250]

# Agricultural sector
## Loop1: food from investment in land development
lfc.k = al.k/palt
palt = 3.2e9
al.k = al.j + dt*(ldr.j - ler.j - lrui.j)
ali = ali
ali = 0.9e9
pal.k = pal.j + dt*(-ldr.j)
pali = pali
pali = 2.3e9
f.k = ly.k*al.k*lfh*(1-pl)
lfh = 0.7
pl = 0.1
fpc.k = f.k/pop.k
ifpc.k = clip(ifpc2.k, ifpc1.k, time.k, pyear)
ifpc1.k = tabhl(ifpc1t, iopc.k, 0, 1600, 200)
ifpc1t = [230, 480, 690, 850, 970, 1070, 1150, 1210, 1250]
```

Figure 12: Équivalence des syntaxes DYNAMO (à gauche) et pydynamo (à droite) pour quelques équations du secteur Agricole du modèle World3

Avec la syntaxe pydynamo, il y a 3 types d'équations possibles:

- **c = a**: assigner la valeur **a** à la constante **c**.
- **v.i = a**: assigner la valeur **a** à l'initialisation de la variable **v**.
- **v.k = a**: la variable **v** est mise à jour avec l'expression **a** à chaque étape.

**v.k** appelle la variable **v** au pas de temps actuel **k**, **v.j** la variable au pas de temps précédent **k - 1**.

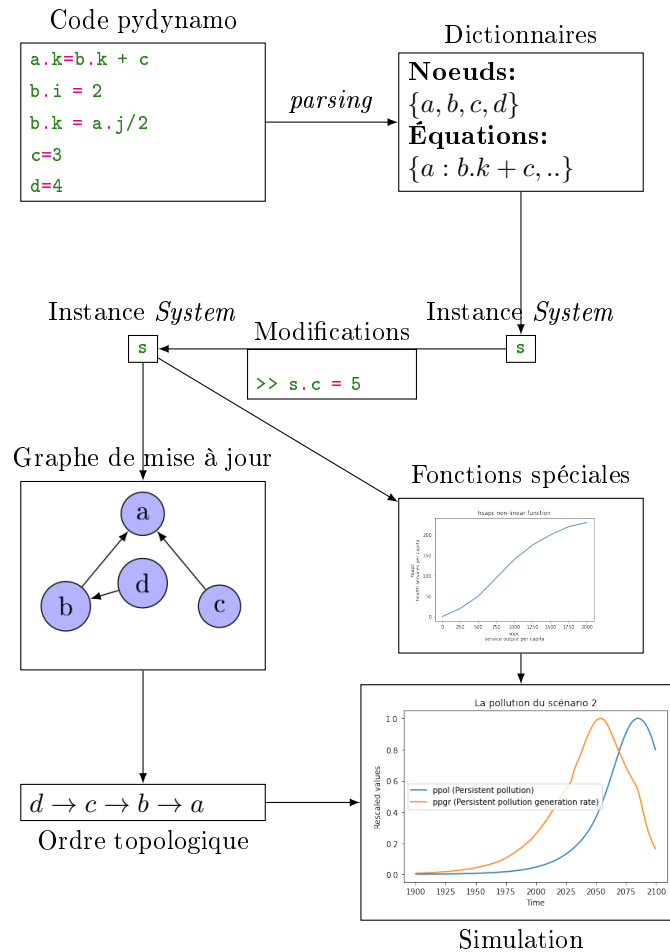


Figure 13: Étapes de lecture et de simulation avec Pydynamo

Il existe aussi des fonctions spéciales, comme `clip` et `tabhl`, qui servent d'implémenter des changements de politique ou des fonctions non linéaires.

Après avoir conçu les modalités de cette syntaxe, j'ai converti l'ensemble des équations DYNAMO du modèle World3 en langage pydynamo, à l'aide d'un script python utilisant le module regex pour gérer les expressions régulières.

## 5.2 Compilateur

Le module pydynamo procède en plusieurs étapes, illustrées sur la figure 13.



## Parser

J'ai ensuite réalisé un *parser*, c'est-à-dire un ensemble de fonctions qui permettent d'interpréter ce qui est écrit avec la syntaxe pydynamo. Les fonctions du parser analysent les équations pour récupérer deux types d'information. D'abord, l'ensemble des variables, des constantes et des fonctions spéciales. Ensuite, l'ensemble des équations fixant les constantes, les initialisations et les mises à jour. Après certaines transformations pour les faire correspondre à une syntaxe réellement lisible par un compilateur python, ces informations sont envoyées dans un objet `System`, qui manipulera la simulation. Je me suis servi du module `ast`, le parser du langage python, pour implémenter ces fonctions.

## System

Une instance `System` contient toutes les informations relatives aux équations, et permet de lancer des simulations. Chaque constante, variable et fonction spéciale du modèle est un attribut de l'instance, ce qui permet de facilement manipuler les paramètres et résultats d'une simulation. Pour construire les fonctions de mise à jour, le système écrit des `lambda` fonction à l'aide des équations récupérées, puis les évalue avec la fonction `eval` du module `builtins`. L'astuce des `lambda` fonctions permet d'éviter d'avoir à recompiler à chaque mise à jour une équation sous forme de chaîne de caractères.

## Ordre topologique

Le défi le plus théorique résidait dans l'ordre de mise à jour des variables: comment s'assurer que lorsqu'on calcule la nouvelle valeur d'une variable, toutes les valeurs dont elle a besoin sont déjà calculées ? En effet, en calculant les équations dans un ordre arbitraire, il y a fort à parier que l'une des variables ait besoin d'une variable au temps actuel qui n'a pas encore été calculé ... L'enjeu est donc de vérifier si un système d'équations est simulable, et ensuite de déterminer le bon ordre de mise à jour des variables. Pour cela, j'ai considéré le problème sous la forme d'un graphe, dont deux exemples sont illustrés sur la figure 14. On peut alors reformuler le problème avec les termes suivants: je dois d'abord vérifier que le graphe n'est pas *cyclique*, avec un chemin qui tourne en rond indéfiniment. Si ce n'est pas le cas, je dois mettre à jour les variables selon un *ordre topologique*, c'est-à-dire tel que si une variable  $x$  est mise à jour avant une variable  $y$  alors il n'existe AUCUN chemin qui va de  $y$  à  $x$ . On est ainsi certain que lorsqu'on met à jour une variable  $z$ , toutes celles dont on a besoin, qui ont donc un chemin vers  $z$ , ont déjà été mises à jour, car elles sont avant dans l'ordre topologique. J'ai utilisé la bibliothèque `Networkx`<sup>23</sup> pour l'algorithme qui trouve un ordre topologique.

J'ai implémenté une astuce similaire pour le cas particulier de l'initialisation.

---

<sup>23</sup><https://networkx.org/>

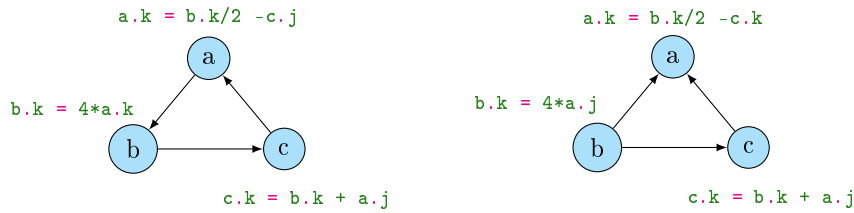


Figure 14: Graphes de mises à jour de deux systèmes d'équations, avec une flèche  $x \rightarrow y$  si  $y$  a besoin de  $x$  au temps actuel ( $.k$ ) pour être mis à jour. À gauche, le schéma de mise à jour est impossible, car le graphe est cyclique. À droite, on peut mettre à jour  $b$ , puis  $c$  et enfin  $a$ .

### Optimisation

Il y a 3 étapes à respecter pour optimiser un code python:

- Ne pas optimiser
- Attendre d'avoir un code qui marche
- Commencer par regarder ce qui coûte cher

En effet, se focaliser sur des problèmes de performance dès le départ, alors que ce n'est pas forcément utile, nuit profondément au développement du code. Une fois qu'il fonctionne et qu'on est certain que ce serait sympathique de le faire aller plus vite, on peut alors se focaliser sur ce qui est vraiment coûteux dans le code. J'ai utilisé un profileur<sup>24</sup> pour déterminer ce qui prenait le plus de temps dans une simulation. Il s'est avéré que c'était une fonction de la librairie `scipy` utilisée à tort qui plombait toutes les performances. En changeant quelques lignes, le temps de simulation du modèle `World3` est passé de quelques secondes à 200ms, et je me suis dit que c'était suffisant. En effet, cette durée est inférieure au temps d'affichage des graphiques sur un Jupyter Notebook, et consacrer du travail supplémentaire à complexifier le programme pour gagner quelques centièmes de secondes n'aurait pas d'intérêt pour l'utilisateur.e.

### 5.3 Usage

Je montre dans la figure 15 un usage basique du module `pydynamo`, pour représenter l'évolution exponentielle d'une population.

J'ai directement inclus le modèle `World3` et des fonctions d'affichages spécialisées dans le module, afin de faciliter sa manipulation. La figure 16 montre comment l'utiliser.

<sup>24</sup>Snakeviz, utilisable dans un Jupyter Notebook, <https://jiffyclub.github.io/snakeviz/>

## Modélisation: une première équation

Un premier exemple simple illustrant comment modéliser et simuler un système avec `pydynamo` :

- Il y a aujourd'hui à la louche 8 milliards d'êtres humains sur terre, et ce nombre est en croissance de 2% par an. Si ce rythme de croissance reste identique, on peut écrire un modèle d'évolution de la population très simple de cette manière:

```
# On déclare une fonction dans laquelle sont écrites les équation
def equation_pop():
    # Calcule la population actuelle (.k) en fonction de sa valeur précédente (.j) et du pas de temps (
    POP.k = POP.j + dt*POP.j*0.02 # World population

    # Date de début de la simulation
    initial_time = 2020

    # Valeur initiale (.i) de la population
    POP.i = 8e9
```

Une fois les équations écrites, on crée un nouvel objet système avec `new_system`, on peut le simuler avec `run` et l'afficher avec `plot`

```
s = new_system(equation_pop)
s.run(80, 1) # Simuler pendant 80 ans avec un pas de temps de 1 an
s.plot()
```

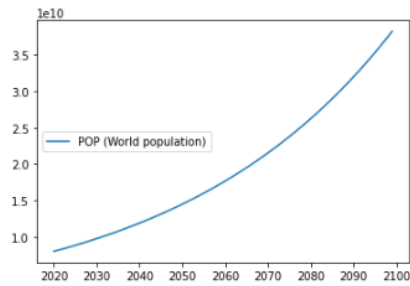


Figure 15: Usage de `pydynamo` pour une équation très simple

```
# Déclaration d'une instance du premier (=1) scénario du modèle world3
w = World3(1)

# Lancement de la simulation, par défaut de 1900 à 2100
w.run()

# Affichage de l'évolution principales variables du monde, avec un titre
w.plot_world(title="Scénario 1: Business as usual")
```

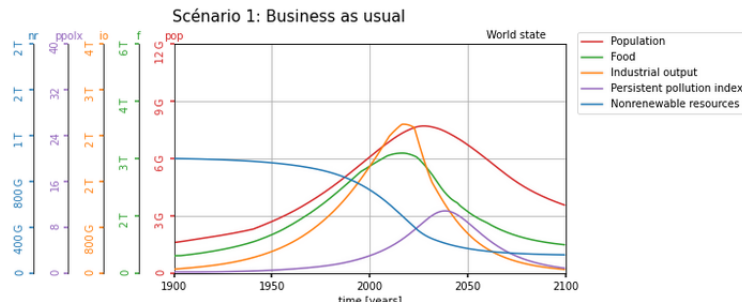


Figure 16: Usage de `pydynamo` pour le modèle World3

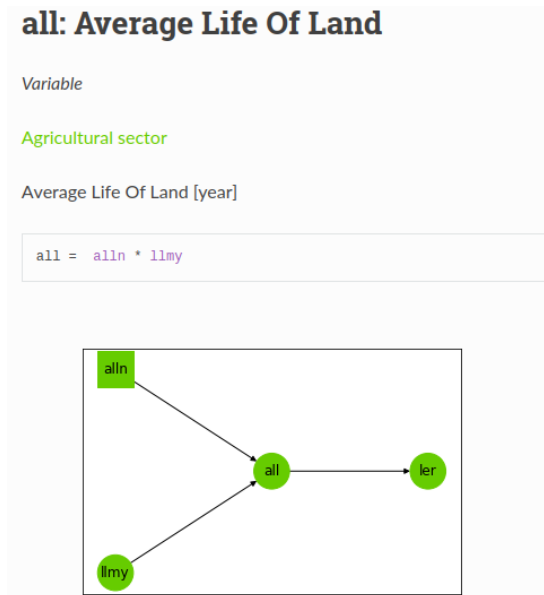


Figure 17: Page de documentation de la variable *all*, la durée de vie moyenne des terres cultivées, avec son graphe d'influence.

## 5.4 Documentation

À partir du module ainsi implémenté, j'ai généré une documentation du modèle World3. Pour chaque variable on peut lire sa définition, ses liens avec les autres variables, et potentiellement sa fonction non-linéaire associée. J'ai généré cette documentation automatiquement à l'aide de la librairie Sphinx<sup>25</sup>. Un exemple de page de cette documentation est montré dans la figure 17.

J'ai mis cette documentation en ligne sur gitlab, à l'adresse <https://abaucher.gitlabpages.inria.fr/pydynamo/index.html>.

## 5.5 Expériences

Avec ce module, j'ai pu reproduire quelques modèles dynamiques intéressants. Divers modèles ont été proposés pour représenter les dynamiques systémiques des populations humaines et de la nature. Je présente brièvement dans cette partie chacun des modèles illustrés dans la figure 18.

### BT model

Le modèle de Brand et Taylor [2] tente de modéliser l'effondrement de la civilisation de l'Île de Pacques. Les hypothèses peuvent être résumées ainsi:

<sup>25</sup><https://www.sphinx-doc.org>

- La nature se régénère seule.
- L'augmentation de la population humaine est proportionnelle à leur taille et à la différence entre consommation et besoins.
- La consommation des humains est proportionnelle à leur taille et à la quantité de nature disponible.

À partir de ces hypothèses, la population de l'Île de Pacques connaît un effondrement dû à l'insuffisance de la nature (ici des forêts et terres fertiles) qui se régénère moins vite que la consommation.

### Hubbert curve

Ce modèle reprend globalement les mêmes hypothèses que pour le BT model mais dans un cas plus général, en remplaçant la population humaine par le capital et la nature par les ressources. Cependant, les valeurs choisies aboutissent à un effondrement total des deux grandeurs.

### HANDY model

Le modèle Human And Nature DYNamics [21] pose les mêmes hypothèses, en intégrant cette fois deux groupes, les élites et le peuple, qui se partagent inégalement ou non les richesses et le travail. Les richesses peuvent être mises sous forme de stock. Une étude de plusieurs scénarios semble montrer que les inégalités de ce type nuisent à la pérennité de l'ensemble.

### Anthropo model

J'ai aussi tenté de générer mon propre modèle systémique, que j'affiche pour l'illustration. Celui-ci représente le monde anthropique comme une entité grandissante, qui capture des ressources renouvelables et fossiles, occupe de l'espace et génère de la pollution. À noter que je ne pense pas cette représentation comme inhérente à l'humain, mais simplement reflétant les dynamiques du monde industrialisé. Les paramètres ont été choisis arbitrairement de manière à ce que les simulations soient cohérentes.

## 5.6 TP

Notre objectif concernant le module pydynamo était de concevoir une séance de travaux pratique permettant à des étudiant.e.s de s'approprier facilement le modèle World3 et d'en retirer les concepts les plus intéressants. J'ai donc réalisé un jupyter notebook contenant une 30aine de questions pratiques et de réponses dépliées, avec les instructions d'installation, hébergé sur un git<sup>26</sup>. J'ai passé quelques semaines à concevoir les scénarios et interpréter les résultats, à proposer des questions et corrections progressives, et à mettre le TP sous forme

<sup>26</sup><https://gitlab.inria.fr/abaucher/pydynamo/-/tree/TPworld3>

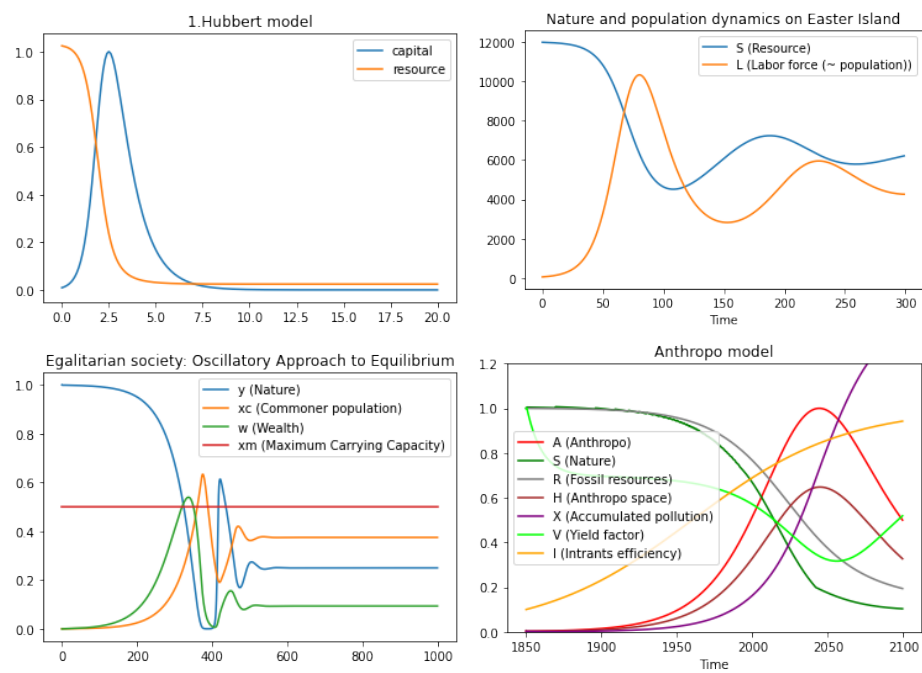


Figure 18: Exemples de simulations pour chaque modèle. Haut Gauche: Hubbert, Haut Droite: Brand and Taylor, Bas Gauche: HANDY et Bas Droite: mon modèle

ergonomique. Un exemple de question et de correction dépliant est montré sur la figure 19.

Au cours de ce TP, après une partie d'introduction et de prise en main, on étudie un scénario de transformation agricole, puis un scénario de décroissance. À travers ces expériences, on réalise d'abord que tout est interconnecté dans un système global. Après quelques tentatives pour éviter l'effondrement, on apprend que la finitude de la planète se manifeste par beaucoup d'aspects différents: ressources, pollution, érosion, place pour les cultures. La partie du TP portant sur la décroissance fait réaliser qu'une grande quantité de choses sont à changer conjointement pour espérer un avenir souhaitable: tant le système de santé que d'agriculture et la vie urbaine.

Nous n'avons pas encore testé le TP en réel, mais nous serions ravis d'en avoir une occasion: la première se présentera les mois qui suivent ou en octobre prochain. J'ai eu des retours très positifs de la part de mon tuteur de stage et de quelques collègues, car les phénomènes observés au long des scénarios sont bien moins évidents qu'on l'imagine initialement, et ont selon moi une forte plus-value pédagogique que des écrits, aussi clairs soient-ils, sur le sujet, ne parviennent pas à conférer de manière aussi "holistique.

## 6.2.2. Réduction de l'érosion des sols

### Exercice 6.2.2.29

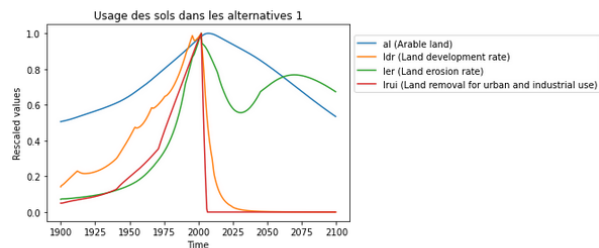
En affichant le lien entre la nourriture  $f$  (food) et  $al$  (arable land), et en affichant les courbes des variables qui servent au calcul de  $al$ , tentez de comprendre pourquoi la production de nourriture diminue.

Hide Solution

### Solution 6.2.2.29 Pourquoi y-a-t-il moins de terres cultivées ?

```
print(w_dec_reu_1.equation('al'))  
w_dec_reu_1.plot(['al', 'ldr', 'ler', 'lrui'], rescale=True, title="Usage des sols dans les alternatives 1")
```

```
al.k = al.j + dt*(ldr.j - ler.j - lrui.j)
```



Malgré la chute de la mise en culture  $ldr$  et de l'urbanisation  $lrui$ , l'érosion  $ler$  est toujours élevée.

Figure 19: Exemple d'une question à propos de l'érosion des terres dans la section "Décroissance" du TP.



## 6 Conclusion

J'ai d'abord eu une chance immense de pouvoir placer au centre des objectifs de mon travail une visée écologique, et une nécessité de critiquer et de changer les pratiques de la recherche. Ça n'a été possible que grâce à Romain, qui fait preuve à la fois d'une immense volonté de changer les choses et d'un recul par rapport à ses engagements, et prend énormément d'initiative dans cette direction. De plus en plus de chercheur.e.s commencent à exprimer les contradictions qu'ils vivent, mais le mythe du progrès technologique salvateur perdure et les structures de la recherche scientifique sont conçues pour y contribuer. Même si je trouve que les changements à réaliser sont encore énormes, ce stage a été un premier pas prometteur et motivant pour continuer à accompagner une transition.

Le fruit de mon travail convient bien à ce que nous avons convenu de réaliser et a suscité beaucoup de remarques positives, mais je reste encore prudent pour en affirmer la pertinence. Le TP permet bien de se sensibiliser aux principaux concepts de World3 avec des manipulations simples, mais il faudra voir si nous arrivons à lui trouver un bon format de cours et s'il est concrètement appropriable par des élèves. Tout en restant mesuré et critique, je suis content d'avoir pu faire aboutir ce travail et j'ai bon espoir de lui donner une suite.

Ce stage a été une occasion de mieux maîtriser un bon ensemble d'outils informatiques essentiels, et d'en apprendre énormément sur les enjeux environnementaux et politiques. Je me sens à présent mieux préparé à un travail de thèse. J'ai aussi constaté que les moments les plus épanouissants pour moi étaient de découvrir, penser et manipuler des concepts mathématiques. J'aurais aimé y passer plus de temps, pour compenser les moments parfois chronophages des bidouilles et debuggages informatiques.

J'ai réalisé que la liberté et l'autonomie dans le travail étaient pour moi d'une importance capitale. La confiance en mon discernement m'a permis de décider de l'orientation de mes recherches et de rester critique face à mes résultats. Cette liberté se retrouve aussi dans les méthodes et le rythme du travail, ce qui m'a permis de prendre du temps pour m'engager dans des associations (politique, théâtre), pour lire, explorer (conférences, autostop, course à pied). Ces moments ont largement contribué à enrichir mes recherches, en diversifiant mes sensibilités. Ce sont, avec l'épanouissement intellectuel, les raisons principales de ma volonté de continuer dans la recherche publique.

Pour ces raisons et grâce à l'expérience positive de ce stage, j'ai pu décider avec Romain de poursuivre en thèse au même endroit. Pour des raisons administratives, je continuerai en tant que technicien jusqu'en été, et commencerai ma thèse en octobre après une coupure. Nous sommes en train d'élaborer le sujet, qui consisterait en une analyse mathématiques des grands réseaux en interaction, pour mieux comprendre notre macro-système technique et nous aider à concevoir des organisations plus résilientes, sobres justes. L'idée est de servir d'appui théorique à l'élaboration d'une société low-tech.

## References

- [1] Ignacio Arnaldo, Una-May O’Reilly, and Kalyan Veeramachaneni. Building Predictive Models via Feature Synthesis. In *Proceedings of the 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, pages 983–990, Madrid Spain, July 2015. ACM.
- [2] James A. Brander and M. Scott Taylor. The simple economics of easter island: A ricardo-malthus model of renewable resource use. *The American Economic Review*, 88(1):119–138, 1998.
- [3] Steven L. Brunton, Joshua L. Proctor, and J. Nathan Kutz. Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15):3932–3937, April 2016. Number: 15 Publisher: National Academy of Sciences Section: Physical Sciences.
- [4] Romain Couillet, Gilles Wainrib, Hafiz Tiomoko Ali, and Harry Sevi. A random matrix approach to echo-state neural networks. In Maria Florina Balcan and Kilian Q. Weinberger, editors, *Proceedings of The 33rd International Conference on Machine Learning*, volume 48 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 517–525, New York, New York, USA, 20–22 Jun 2016. PMLR.
- [5] TRYSTRAM Denis COUILLET Romain, AMBLARD Pierre-Olivier. L’intelligence artificielle peut-elle devenir un outil convivial? <http://polaris.imag.fr/romain.couillet/docs/articles/IAconviviale.pdf>.
- [6] G. Cybenko. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Math. Control. Signals Syst.*, 1989.
- [7] Brian M. de Silva, Kathleen Champion, Markus Quade, Jean-Christophe Loiseau, J. Nathan Kutz, and Steven L. Brunton. PySINDy: A Python package for the Sparse Identification of Nonlinear Dynamics from Data. *arXiv:2004.08424 [physics]*, April 2020. arXiv: 2004.08424.
- [8] Anabelle et Jérémy. Décolonisons l’écologie. <https://www.youtube.com/watch?v=v9wBM4y-018>, 2021.
- [9] Lukas Gonon and Juan-Pablo Ortega. Reservoir Computing Universality With Stochastic Inputs. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 31(1):100–112, January 2020. Number: 1 Conference Name: IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems.
- [10] Hayden Schaeffer, Russel Caffisch, Cory D. Hauck, and Stanley Osher. Sparse dynamics for partial differential equations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(17):6634–6639, April 2013. Number: 17 Publisher: National Academy of Sciences Section: Physical Sciences.

- [11] Moritz Hoffmann, Martin Scherer, Tim Hempel, Andreas Mardt, Brian de Silva, Brooke E. Husic, Stefan Klus, Hao Wu, Nathan Kutz, Steven L. Brunton, and Frank Noé. Deeptime: a Python library for machine learning dynamical models from time series data. *Machine Learning: Science and Technology*, 3(1):015009, March 2022. Number: 1 arXiv: 2110.15013.
- [12] Ivan ILLICH. *Némésis médicale*. Points, 1975.
- [13] H. Jaeger. A tutorial on training recurrent neural networks , covering BPPT , RTRL , EKF and the *undefined*, 2005.
- [14] Herbert Jaeger. The" echo state" approach to analysing and training recurrent neural networks-with an erratum note'. *Bonn, Germany: German National Research Center for Information Technology GMD Technical Report*, 148, 01 2001.
- [15] Herbert Jaeger. A tutorial on training recurrent neural networks , covering bppt , rtrl , ekf and the " echo state network " approach - semantic scholar. 2005.
- [16] François JARRIGES. *Techocritiques, Du refus des machines à la contestation des technosciences*. 2016.
- [17] PUGH Alexandre L. *DYNAMO user's manual*.
- [18] Ghazaale Leylaz, Shuo Wang, and Jian-Qiao Sun. Identification of nonlinear dynamical systems with time delay. *International Journal of Dynamics and Control*, April 2021.
- [19] Anne-Laure Ligozat. Ia responsable. [https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/04/Cours\\_CentralesSupelec\\_IA\\_responsable-1.pdf](https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/04/Cours_CentralesSupelec_IA_responsable-1.pdf).
- [20] Meadows, Behrens, Meadows, Nail, Randers, and Zahn. *Dynamics of Growth in a Finite World*. 1972.
- [21] Safa Motesharrei, Jorge Rivas, and Eugenia Kalnay. Human and nature dynamics (HANDY): Modeling inequality and use of resources in the collapse or sustainability of societies. *Ecological Economics*, 101:90–102, May 2014.
- [22] Samuel H Rudy, Steven L Brunton, Joshua L Proctor, and J Nathan Kutz. Data-driven discovery of partial differential equations. *Science advances*, 3(4):e1602614, April 2017. Number: 4.
- [23] Bernhard Schölkopf. Causality for Machine Learning. *arXiv:1911.10500 [cs, stat]*, December 2019. arXiv: 1911.10500.