

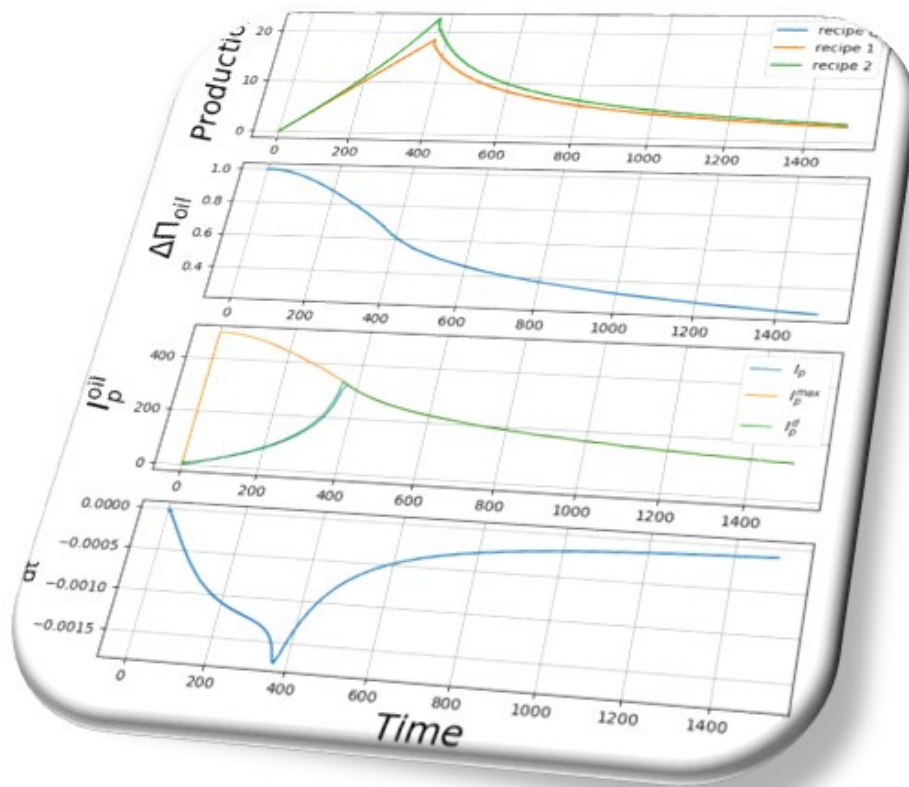
— EcoDYCO —

Economic Simulation in a World of Finite Resources

Author **DyCo**

Université Paris Cité, CNRS, UMR 8236

LIED, F-75013 Paris, France



User Manual v1.0

Sept. 2022

All the material necessary to run the following examples, including
this manual, can be found at

<https://github.com/dyco-uparis/EcoDyco>.

Contents

1	EcoDYCO: An economic model in a finite physical world	2
2	General structure of EcoDYCO	3
2.1	Structure of a Stock sheet	3
2.1.1	Stock sheet parameters	3
2.1.2	Dissipation resistance R_P	5
2.2	Structure of a flow sheet	6
2.2.1	Flow sheet parameters	6
2.3	Structure of the physical core	6
2.4	Structure of the economic zone	7
3	Simulate with EcoDYCO	7
3.1	List of files	7
3.2	Physical sphere settings	8
3.2.1	Add a cell	8
3.2.2	Retract a cell	8
3.2.3	Modification of the parameters and initial values of the variables of the physical sphere	9
3.3	Setting up the economic zone: the Goodwin case	9
4	Elementary case study	11
4.1	Parametrization	11
4.2	Results	12
5	Annexe A: Comment utiliser un autre modèle économique ?	13
5.1	Utiliser un autre modèle économique parmi la bibliothèque de modèles disponible	13
5.2	Créer un nouveau modeles éco	14
6	Annexe B: Equations gouvernants une feuille stock	15
6.1	Architecture générale	15
6.2	Zone de production	17
6.3	Zone de recyclage	21
7	Annexe C: Equations gouvernants un feuillet flux	21
8	Annexe D: Gestion du noyau central couplant les feuillets physiques: "recettes"	22
8.1	Mix énergétique	24
9	Annexe E: Economie	25
9.1	Sphère économique	25
9.1.1	Structure générale	25

9.1.2	progrès technique	25
9.1.3	Niveaux d'utilisation du modèle	26
9.1.4	Exemple de modèle: Solow	26
9.2	Adaptation pour la sphère économique	27
9.2.1	Fonction de requête de production	27
9.2.2	Investissement	28
9.2.3	Requête de recyclage	28
9.2.4	Autres inputs économiques	28
9.3	Analyse	28
10	Annexe F: Mécanisme de rétroaction Physique-Economique	29
10.1	Rétroactions de la sphère physique sur l'activité économique	29
10.2	Etat stable	30
10.3	Passage d'une économie basée sur des ressources flux à une économie basée sur des ressources stock	31
10.4	Variations du capital	32
11	Conclusion	33

1 EcoDYCO: An economic model in a finite physical world

The model ECODYCO was designed on the basis of five findings:

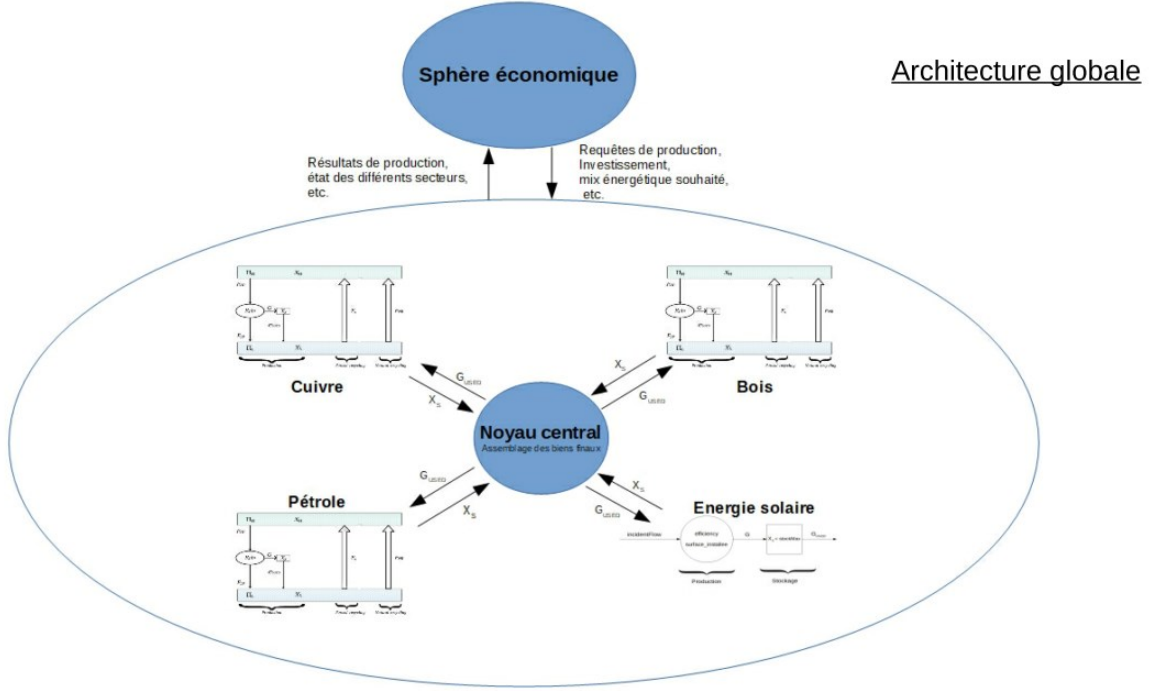
1. If the physical world is modified by the application of the laws of the economy of the economy, the fact remains that its evolution is governed by physical laws.
2. The physical world is finite, this is true for all material resources resources and for fossil energy resources.
3. In a finite world, the definition of a production function must take into account the state of the resources. Production is contingent on the available resource.
4. The intensity of withdrawal from a resource is a major factor on the fate of the resource.
5. If the economy is not strictly describable by thermodynamics, thermodynamics can provide it with some useful categories, and in particular the In particular, the distinction between *quantity* and *quality*, themselves linked to the intensive or extensive character of the variables.

These findings form the basis for the structure and operation of the model ECODYCO.

1. The descriptions of the physical and economic spheres of the model are disjointed. They communicate through specific variables and parameters.
2. Each resource is described in its own sheet. The collection of sheets thus obtained is the physical sphere. Each sheet quantifies the usable fraction and the used fraction of the Each sheet quantifies the usable fraction and the used fraction of the resource, which we will call waste. The used fraction can only be used again used again only after recycling.
3. It is defined a production query function called “demand”, which replaces, for the physical dimension, the production function. The structure and the parameterisation The structure and parameterisation of the production function are fixed by the specific choices The structure and parameterisation of the production function are fixed by specific choices made in the economic area of the model.
4. It is defined an intensity of operation of the economy which governs the whole of the physical sheets.
5. The quantities of resources are also associated with qualities, which, like the first and second principles, are the image of the first and second principles of thermodynamics, define, the difference in quality of a resource and its state of transformation, towards a transformation, towards a product or towards a waste.

2 General structure of EcoDYCO

The model is structured in sheets of stock type and flow type, linked to the economic module. Its overall architecture is as follows:



2.1 Structure of a Stock sheet

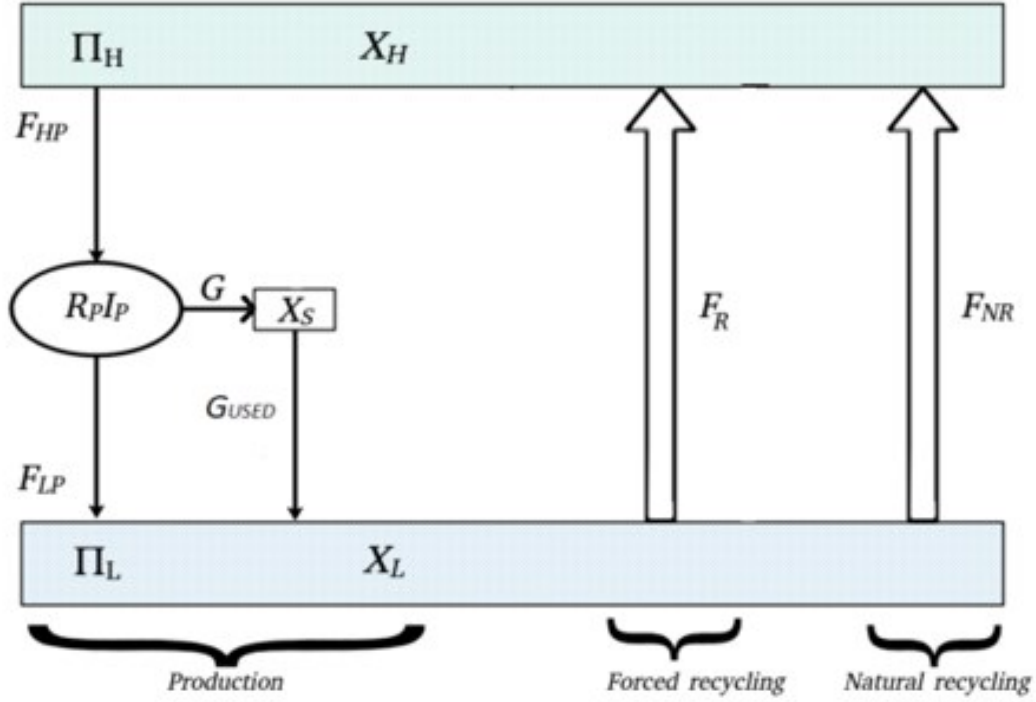
Stock sheets are intended for most resources, mineral, fossil or not, whose quantity on the planet is finite and of variable dispersion.

On a typical sheet of paper, there is a high zone containing the resource in quantity X_H and quality Π_H and a zone of used resource in quantity X_L and quality Π_L . The resource flows of F_{HP} and the waste flows F_{LP} constitute, together with the production flow G , the whole of the resource flows in its implementation for production. The quantity of resource used in excess constitutes a stock X_S . Recycling can be natural F_{NR} , or forced, F_R , according to specific laws. We call the difference of potentials the quantity $\Delta\Pi = \Pi_H - \Pi_L$.

2.1.1 Stock sheet parameters

A stock sheet is initially defined by the set of limited parameters listed below, values are given as an example.

- *type : stock*



- *name* : copper
- Total quantity — *total stock* : 500000
- Initial quantity of high level — *Xh_init* : 500000
- Initial quantity of sink — *Xl_init* : 0
- Production dissipation resistance — *Rp0* : 0.003
- Initial capital associated with the production apparatus — *K0* : 1
- Recycling energy ratio (number of energy unit to recycle 1 unit of the resource) — *recyclingEnergyFlux* : 1
- Usable as energy (e.g. for oil) — *isEnergy* : False
- Natural recycling rate (r=0 : no recycling) — *r* : 0
- Characteristic time — *to* : 9

The description and use of these parameters is described in detail in the in the annexes to this document. However, special attention is paid to particular attention is paid to R_p .

2.1.2 Dissipation resistance R_P

The dissipation resistance is a term that intervenes, via the production intensity, in the form $R_P I^2$. This term indicates the fraction of the resource that is not used for the production of consumer goods, even though the resource has been taken from the planet. R_P leads to a limitation of the capacity of a production tool that cannot operate at high intensity. An efficient production tool is associated with a low value for R_P . As a main parameter that drive the production tool R_P is therefore directly linked to capital. It follows that R_P naturally increases over time under the effect of the degradation of the capital. For the same reason, investment efforts lead to reduce R_P . The same is true of technical progress which results in a sudden drop in R_P under the effect of the implementation of this new method. Finally, with constant technical progress, the multiplication of production site corresponds to the setting in parallel of several resistances, which leads to a reduction of the global resistance by the same factor, thus allowing work to be carried out at a higher intensity since it is spread over the production sites. If a high value of R_P reflects a production tool that is not compatible with in a production-intensive economy, inversely, it is clear that a low value of R_P is not necessarily an enviable situation from an ecological point of view, in the sense that the very large capacity of the production tool is also leads to increase massively the resource extraction. The accelerated scarcity of the resource of this sheet then leads to a pinch of production.

Four main effects can be attributed to the presence of R_P :

1. Degradation of the capital which results in an increase of R_P . This imply consequences on the quality of exploitation of the resource.
2. Innovation effect which results in a decrease of R_P . This imply consequences on the quantity of increased withdrawal of the resource.
3. Increase in production capacity, at constant progress, which results in a decrease of the global R_P . This imply consequences on the quantity of increased withdrawal of the resource.
4. Effect of the investment which results in a decrease of R_P . This imply consequences on the quantity of increased withdrawal of the resource.

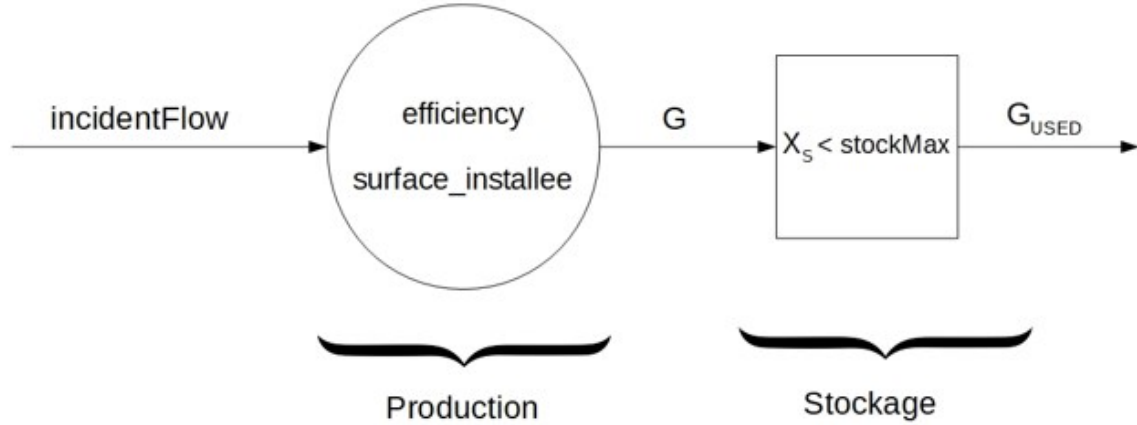
It should also be noted that whatever the value of R_P , a decrease in production yields is observed for production intensities above a certain threshold. In this sense, R_P contributes to the Ricardian character of the appearance of diminishing returns. It is important to note that the limitation of yields also originates in the mechanism of resource scarcity, which is highlighted by the decrease in the difference in potential R_P .¹

¹The question of the capacity for indefinite growth thus finds its main ingredients here, namely:

1. The decline in yields as a function of the intensity of harvesting, beyond a certain threshold.
2. The drop in production due to the unavailability of the resource (pinch) is present at the heart of the mechanism of each of the sheets. It thus appears that the flow of extraction of the resources

2.2 Structure of a flow sheet

The flow type sheets are intended for resources that are available on the planet in the form of a flow. The most common one is of course the solar energy.



2.2.1 Flow sheet parameters

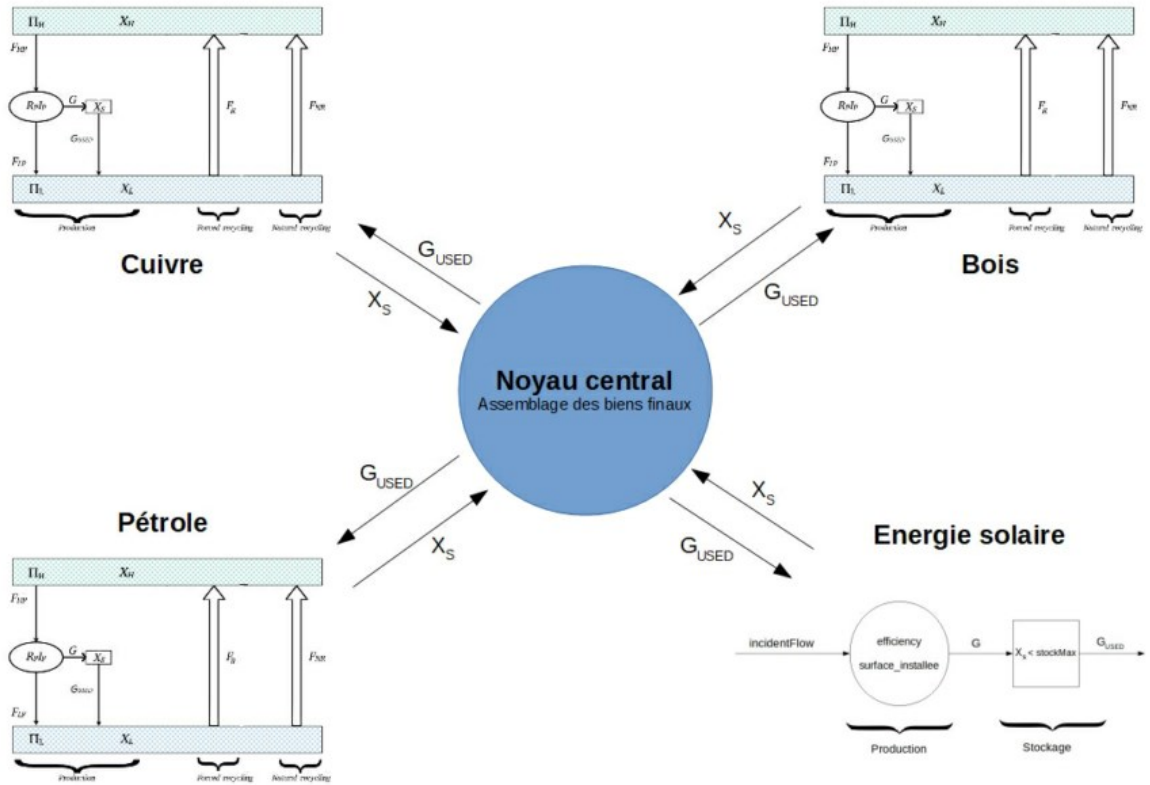
A flow sheet is initially defined by the set of limited parameters listed below (the values are given as an example):

- *type* : *flow*
- *name* : *solar energy*
- Incident flow — *incidentFlow* : *1e10*
- Conversion efficienc — *eff_init* : *0.15*
- Installed surface — *surface_installee* : *1e-9*
- Usable as energy — *isEnergy* : *True*
- Maximum storage capacity — *stockMax_init* : *50*

2.3 Structure of the physical core

The physical core is the place where manufactured goods are made. The schematic diagram of how this area works is given in the figure below.

depends at the same time on the capacities of production (via R_P) installed and on the difference of potential $\Delta\Pi$.



The “recipes” for the production of manufactured goods are indicated in the sheet *world.txt*. The *main.py* program carries out automatically the realization in respect of these “recipes”.

2.4 Structure of the economic zone

The economic zone is the place where the economic model is coded. To illustrate this point, two examples are given :

1. Goodwin
2. Solow

The advanced user can build his own model following the general structure of an economic structure of an economic sheet (see Appendix A)

3 Simulate with EcoDYCO

3.1 List of files

You must have in a folder:

- the python scripts :
 - the file **PhysicalWorld.py**
 - a file describing your economic sphere. In this manual we will use the Goodwin model, described in **Goodwin.py**.
 - the file **main.py**
- as many parameterization files as necessary. At least one resource sheet must be used.
 - **world.txt** (required)
 - **oil.txt** if you have an oil sheet
 - **copper.txt** if you have a copper sheet

The file **main.py** can then be run to launch the simulation. The time step *deltat*, and the temporal extent of the simulation *tmax* can be modified in **main.py**.

3.2 Physical sphere settings

To modify the physical parameters (cell parameters, and global parameters of the physical sphere), it is necessary to modify the ***.txt** files.

3.2.1 Add a cell

Parameter setting of the new cell:

1. to create a stock cell, take the template **StockCell.txt**, enter the desired parameters, and save under the name of the resource (*e.g.* **copper.txt**)
2. To create a flow cell, do the same with the template **FlowCell.txt**
3. then, add in **world.txt** your new cell in the *cells* table.
4. finally, add the column corresponding to recipeMatrix in **world.txt**

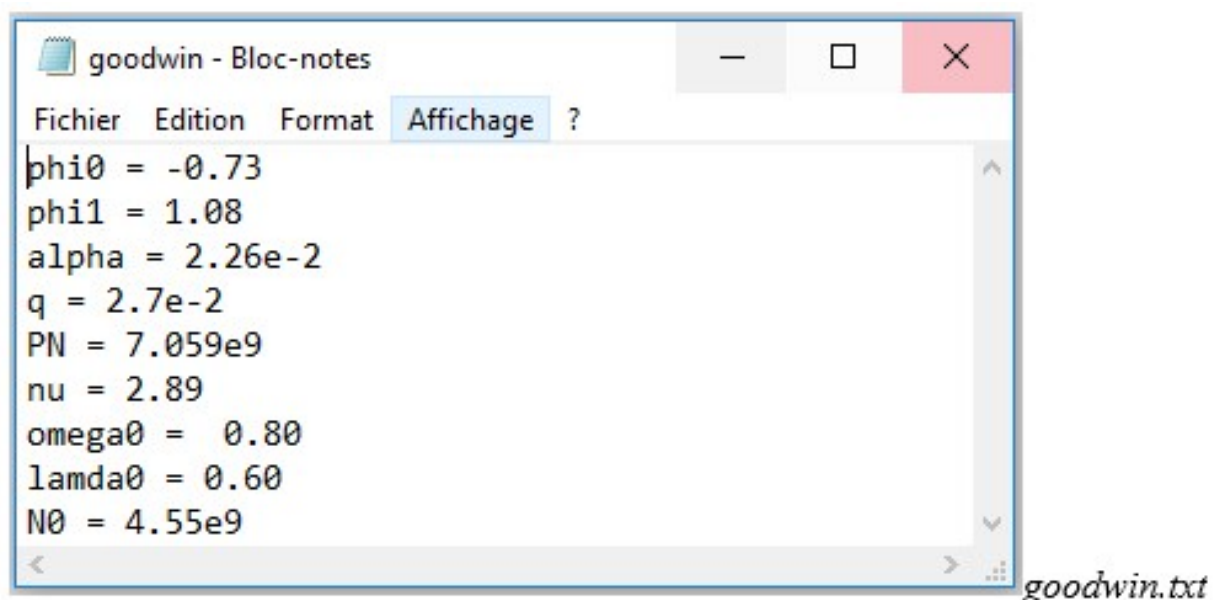
3.2.2 Retract a cell

1. Delete the cell in the cells table in **world.txt**
2. Delete the corresponding column from recipeMatrix in **world.txt**

3.2.3 Modification of the parameters and initial values of the variables of the physical sphere

- The global parameters and initial values of the global variables of the physical sphere are stored in the **world.txt** files.
- The parameters and initial values of the variables of the sheets are stored in the files **Name-Of-The-Sheet.txt**.
- Don't forget to save the file ***.txt** after modifying a value.²
- The message " world successfully created " is printed when the model has been initialized.

3.3 Setting up the economic zone: the Goodwin case



- ϕ_0 and ϕ_1 are the parameters of the Philipps curve
- α is the growth rate of labor productivity
- q is the growth rate of the population

²Caution, reading the parameters in the files is unstable. You must be careful to respect the spacing, not to add a line break at the end, etc. In particular, the strings in the cell array (e.g. "copper.txt") are then used to redirect to the file "copper.txt" for the initialization of the copper sheet. The name of the file containing the parameters of the sheet must therefore be the same string as the one that appears in cell.

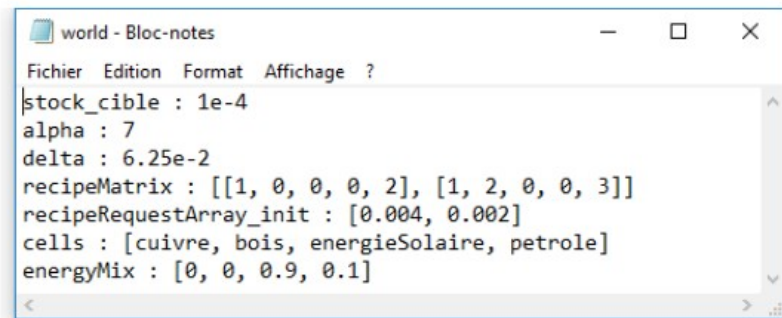
- P_N is the maximum value of the population (the real growth rate of the population N is $q(1 - N/P_N)$)
- nu is the productivity of capital
- ω_0 , λ_0 and N_0 are the initial values of the wageshare, employment rate and population

4 Elementary case study

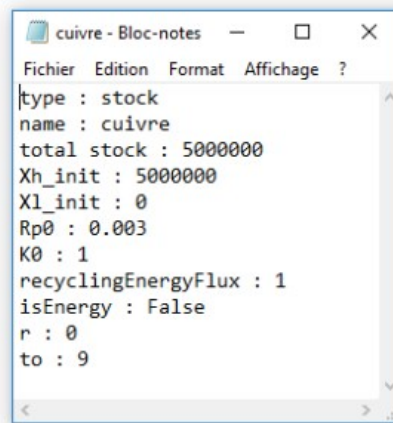
4.1 Parametrization

We propose to illustrate the functioning of ECODYCO by a case study based on

- Four resources. Two are material, (copper *Co* and wood *Wo*), and two are energies (oil *Oi* and solar energy *So*)
- Recipes are build on energy conservation. Three recipes for three different goods are considered :
 - Good 0 can be obtained with 1 unit of copper and 2 units of energy,
 - Good 1 can be obtained with 1 unit of copper and 2 units of wood and 3 units of energy
 - Good 3 (copper recycling) can be obtained with 1 unit of energy
- Target energy mix Mix énergétique cible, is composed of 90% solar and 10% oil.



```
world - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
stock_cible : 1e-4
alpha : 7
delta : 6.25e-2
recipeMatrix : [[1, 0, 0, 0, 2], [1, 2, 0, 0, 3]]
recipeRequestArray_init : [0.004, 0.002]
cells : [cuivre, bois, energieSolaire, petrole]
energyMix : [0, 0, 0.9, 0.1]
```



```
cuivre - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
type : stock
name : cuivre
total stock : 5000000
Xh_init : 5000000
Xl_init : 0
Rp0 : 0.003
K0 : 1
recyclingEnergyFlux : 1
isEnergy : False
r : 0
to : 9
```

In the main file **main.py**, the following parameters must be set :

1. Economic model. Here *Solow*, parameterized by the corresponding file **solow.txt**
2. Time step and the duration of the simulation

```
7 import matplotlib.pyplot as plt
8
9 import Solow as eco
10 import PhysicalWorld as phy
11
12 deltat = 0.1
13 tmax = 800
14
15 phySphere = phy.createPhysicalWorld("world.txt", deltat)
16 ecoSphere = eco.createEcoSphere("solow.txt", phySphere, deltat)
17
18 print("WORLD SUCCESSFULLY CREATED")
19
20 for k in range(int(tmax/deltat)):
21     phySphere.iterate()
22     ecoSphere.iterate(phySphere)
23     inputs = ecoSphere.inputsToPhySphere(phySphere)
24     phySphere.actualize(inputs)
25
26
27 #plot graphs
28 plt.close("all")
29 phySphere.plot()
30 ecoSphere.plot()
31 plt.show()
32
```

4.2 Results

Running the simulation via the module **main.py** leads to the following result for production and energy:

All the information related to each sheet being recorded, it is possible to follow the specific evolution of their parameters, for example here for oil:

```

107 def stock_cible(self, phySphere, i):
108     #renvoie la nouvelle valeur du stock cible (en pourcentage de la quantité totale de ressource i) de la ième feuille de phySphere (stock)
109     return phySphere.cells[i].cell.stock_cible
110
111 def newdelta(self, phySphere, i):
112     #renvoie la nouvelle valeur du taux de dépréciation du capital de la ième feuille de phySphere (stockcell)
113     return phySphere.cells[i].cell.delta
114
115 def efficiency(self, phySphere, i):
116     #renvoie la nouvelle valeur du paramètre efficiency de la ième feuille de phySphere (flowcell)
117     return phySphere.cells[i].cell.efficiency
118
119 def K1(self, phySphere, i):
120     #renvoie la nouvelle valeur du paramètre K1 (qui controle la variable surface_installee d'une cellule flux) de la ième feuille de phySph
121     cell = phySphere.cells[i].cell
122     K1 = cell.K1 + self.deltat*cell.record.Gused[-1]*self.s*0.55
123     return K1
124
125 def K2(self, phySphere, i):
126     #renvoie la nouvelle valeur du paramètre K2 (qui controle la variable stockMax d'une cellule flux) de la ième feuille de phySphere (flow
127     cell = phySphere.cells[i].cell
128     K2 = cell.K2 + self.deltat*cell.record.Gused[-1]*self.s*(1-0.45)
129     return K2
130
131 def recipeMatrix(self, phySphere):
132     #renvoie la nouvelle matrice des recettes
133     return phySphere.recipeMatrix
134
135 def recipeRequestArray(self, phySphere):
136     #renvoie la requête en production de biens finaux pour l'instant suivant
137     lastRequest = phySphere.recipeRequestArray
138     newRequest = [0]*len(lastRequest)
139     for i in range(len(lastRequest)):
140         ind = phySphere.isARecyclingRecipe(i)
141         if ind > -1 : #si la recette i est une recette de recyclage (elle permet de recycler la ressource d'indice ind dans le tableau
142             newRequest[i] = phySphere.cells[ind].cell.deltaX[i]*self.recycling
143         elif ind == -1 : #sinon c'est une recette de production de bien final)
144             if self.t > self.deltat :
145                 #fonction de requête :  $Y = K^{\alpha} * (A_i)^{(1-\alpha)}$ 
146                 var = math.pow(self.K/self.record.K[-2], self.alpha)*math.pow(self.A/self.record.A[-2]*self.L/self.record.L[-2], 1-self.alpha)
147                 newRequest[i] = var*phySphere.record.request[-1][i]
148             else :
149                 return lastRequest

```

Fichier "modèle éco" :
Solow.py

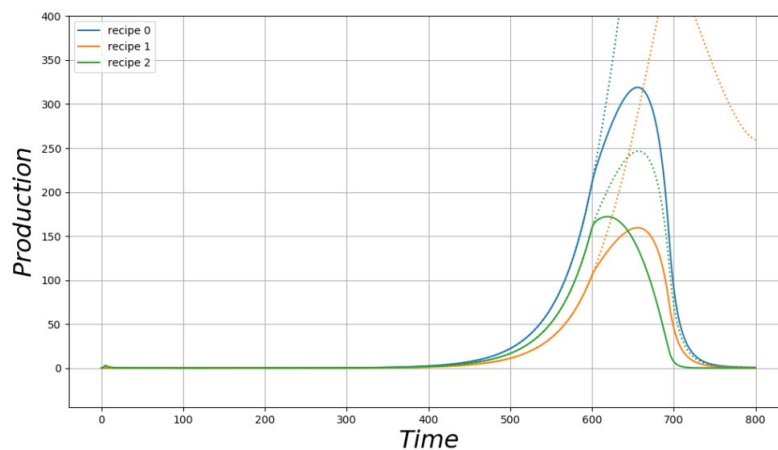
Spécification des lois du
modèle éco

```

solow - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
alpha = 0.4
q = 2.7e-2
PN = 7.059e9
L0 = 4.55e9
s = 0.15
g = 2.26e-2
recycling = 0.5

```

Fichier solow.txt : paramétrisation
de la sphère éco Solow.py

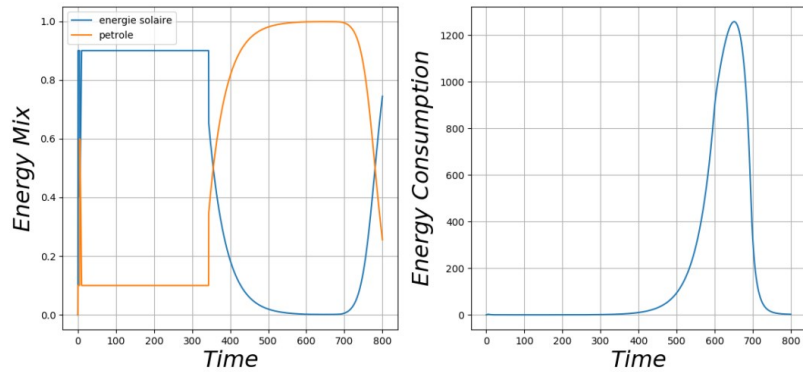


5 Annexe A: Comment utiliser un autre modèle économique ?

5.1 Utiliser un autre modèle économique parmi la bibliothèque de modèles disponible

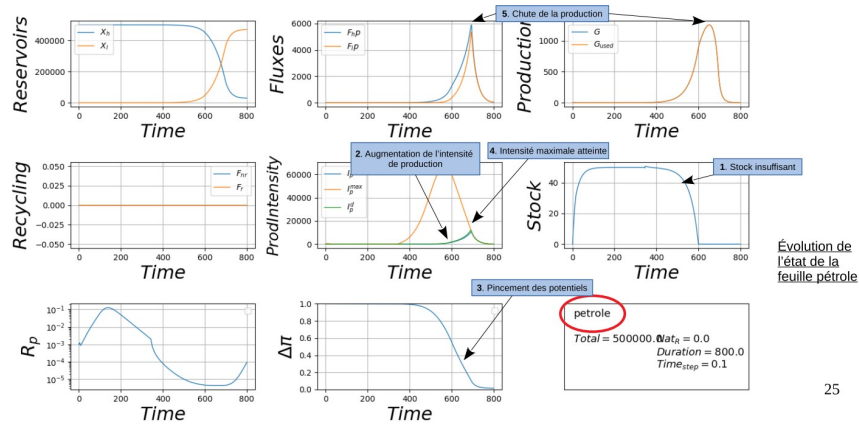
Si l'on souhaite utiliser un modèle économique différent pour la sphère économique, parmi les modèles disponibles, il faut effectuer les modifications suivantes dans le fichier main.py

- Ligne 9 : Spécifier le nom du fichier .py décrivant la sphère éco (ici Goodwin.py)
- Ligne 17-18 : créer une instance de la sphère éco avec un appel de la fonction `eco.createEcosphère()` - vérifier que les arguments pris par cette fonction correspondent bien aux arguments demandés par la fonction `createEcoSphere` de votre fichier `EcoModel.py` (ici Goodwin.py)
- Ligne 36: De même, vérifier les arguments pris par la fonction `ecoSphere.inv()`
- Ligne 40: De même, vérifier les arguments pris par la fonction `ecoSphere.iterate()`



Évolution du mix énergétique

Évolution de la consommation énergétique



25

- Ligne 42: De même, vérifier les arguments pris par la fonction `ecoSphere.newProdRequest()`

5.2 Créer un nouveau modèles éco

Il est possible d'insérer n'importe quel modèles économique au programme DyCoEco. Si vous souhaitez en écrire un vous même pour l'ajouter a la bibliothèque des modèles disponibles, vous devez respecter la structure suivante dans votre script :

Le fichier .py doit contenir :

- une fonction `createEcoSphere`
- une classe `EcoSphere` contenant :
 - un constructeur `__init__`
 - une fonction `iterate`
 - une fonction `inv`
 - une fonction `newProdRequest`


```

7 import matplotlib.pyplot as plt
8
9 import Goodwin as eco
10 import PhysicalWorld as phy
11
12 deltat = 0.1
13 tmax = 20000
14
15 phySphere = phy.createPhysicalWorld("world.txt", deltat)
16
17 delta = phy.extractWorldParameters("world.txt")[3]
18 ecoSphere = eco.createEcoSphere("goodwin.txt", delta, deltat)
19
20 print("WORLD SUCCESSFULLY CREATED")
21
22 for k in range(int(tmax/deltat)):
23     (Gused, produced) = phySphere.produce()
24
25     request = []
26     for i in range(len(phySphere.recipeRequestArray)):
27         request.append(phySphere.recipeRequestArray[i])
28     phySphere.record.actualize(produced, request, phySphere.computeEnergyMix(Gused))
29
30     Fr = [0]*phySphere.n_cells
31     for i in range(phySphere.n_cells):
32         if phySphere.cells[i].type == "stock" and phySphere.cells[i].cell.recyclingEnergyFlux >= 0 :
33             Fr[i] = produced[phySphere.recipeToRecycle[i]]
34     for i in range(len(phySphere.cells)) :
35         if phySphere.cells[i].type == "stock":
36             phySphere.cells[i].iterate(Gused[i], Fr[i], ecoSphere.inv(Gused)[i])
37         else :
38             phySphere.cells[i].iterate(Gused[i])
39
40     ecoSphere.iterate()
41     if k>1 :
42         phySphere.actualizeRecipeRequest(ecoSphere.newProdRequest(phySphere.recipeRequestArray, produced))
43
44
45
46 #plot graphs
47 plt.close("all")
48
49 for k in range(phySphere.n_cells):
50     phySphere.cells[k].plot(k+1)
51
52 phySphere.plot()
53
54 ecoSphere.plot()
55
56 plt.show()

```

main.py

– une fonction plot

Un exemple de modèle économique (trivial) respectant cette structure est donné ci-dessous (ecoVide.py).

Le rôle des fonctions citées ci-dessus est également détaillé

6 Annexe B: Equations gouvernants une feuille stock

6.1 Architecture générale

Les ressources de type " stock " sont supposés être en quantité globale constante. Une unité de ressource " stock " peut se trouver dans trois états différents.

Elle peut être " *disponible* ", c'est à dire pouvant être extraite par l'appareil de production en vue d'une transformation ultérieure (ressources valorisables). Elle peut également

```

7 import numpy as np
8 import matplotlib.pyplot as plt
9
10 def createEcoSphere(deltat):
11     #renvoie une instance de la classe EcoSphere.
12     return EcoSphere(deltat)
13
14 #####
15
16 class EcoSphere :
17
18     def __init__(self, deltat):
19         #constructeur
20         self.t = 0
21         self.deltat = deltat
22         self.employment = 0.9
23
24     def iterate(self):
25         #actualise les attributs de la sphère éco
26         self.t = self.t + self.deltat
27         self.employment = 0.9 + 0.05*np.sin(2*np.pi*self.t/100)
28
29     def inv(self, Gused):
30         #renvoie une liste de taille le nombre de feuilles contenant
31         #                                     [l'investissement pour chaque feuille]
32         #la valeur en ième position correspond à l'investissement pour la
33         #                                     [cellule en ième position dans la liste phySphere.cel]
34         return [0]*len(Gused)
35
36     def newProdRequest(self, prodRequest):
37         #renvoie la requête en production de biens finaux pour l'instant suiv.
38         return prodRequest
39
40     def plot(self):
41         return
42

```

ecoVide.py

avoir déjà été extraite, et être *en attente* de transformation en bien final. Enfin, elle peut être *usagée*, c'est à dire que la sphère économique est incapable de la valoriser.

On définit trois réservoirs contenant les ressources dans chacun de ces trois états : un *réservoir haut* pour la fraction disponible de la ressource, un *stock* pour la fraction de la ressource en attente de transformation ultérieure, et un *réservoir bas* pour la fraction usagée de la ressource.

On note X_H , X_S et X_L les quantités correspondantes, et X_T la quantité totale de ressource.

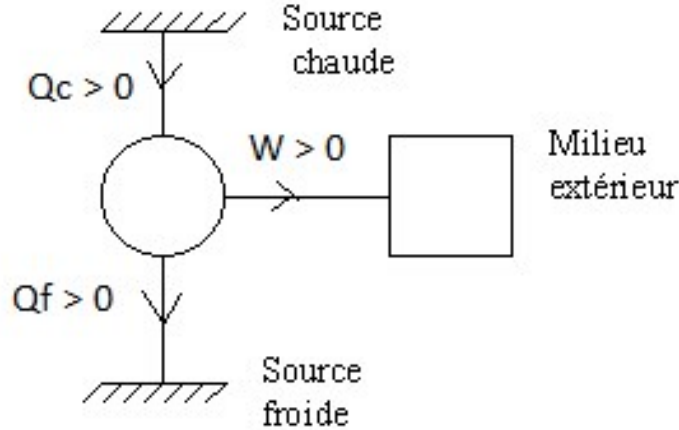
Ainsi, on a à chaque instant :

$$X_H + X_S + X_L = X_T$$

Ensuite, on comptabilise strictement les mouvements entre ces trois réservoirs.

L'extraction de la ressource est le processus permettant de convertir une unité de

ressource " disponible" en une unité de ressource " en attente ". Ce processus n'a le plus souvent pas une efficacité de 100%: une fraction des ressources disponibles extraites est immédiatement transformée en déchets. Ce processus est analogue à la production de travail par un moteur thermique : on produit, a partir de la différence de température entre deux thermostats, une certaine quantité de travail utile W , tandis qu'une part de l'énergie provenant de la source chaude Q_C est dissipée sous forme de chaleur Q_F .



Ici, la source chaude devient le réservoir de ressource " disponible ", la source froide le réservoir de ressource " usagée ", et le travail produit est stocké.

On note F_{HP} le flux provenant du réservoir haut, F_{LP} le flux en direction du réservoir bas, et G le flux de ressources en direction du stock. Ainsi,

$$G = F_{HP} - F_{LP}$$

Les ressources dans le stock X_S sont ensuite transformées en bien final. Après utilisation, la ressource devient déchet. On note G_{USED} ce flux entre le stock et le réservoir bas.

L'ensemble de ces flux définit la zone de production. Une unité de ressource usagée peut parfois être recyclée. Ce recyclage peut être naturel, ou la conséquence d'une activité humaine. On note F_{NR} le flux de recyclage naturel, et F_R le flux de recyclage humain.

6.2 Zone de production

Au fur et à mesure que l'on exploite la ressource disponible, sa qualité diminue, car on exploite la ressource de bonne qualité en premier. Or, la qualité de la ressource a un impact sur l'effort à fournir pour l'extraire. Par exemple, pour une ressource minière, il faut fournir un effort plus important (*l'intensité de production*) après trois années d'exploitation de la mine qu'au début de l'exploitation pour en extraire le même flux. En effet, la qualité de la ressource (sa concentration notamment) s'est dégradée. La notion de qualité est donc essentielle dans le processus d'extraction. La thermodynamique établit bien cette

distinction entre quantité et qualité. On introduit donc ici une notion de thermodynamique, le *potentiel*. C'est une variable intensive. Les ressources dans le réservoir haut sont a un certain niveau de potentiel, Π_H . Π_H diminue au fur et a mesure de l'extraction de la ressource du stock haut. Π_H est donc une fonction croissante de X_H .

On a :

$$F_{HP} = \Pi_H I_P$$

$$\Pi_H = f_1(X_H)$$

Les déchets dans le réservoir bas sont une pollution, qui a une rétroaction négative sur la production. Cette rétroaction se manifeste par l'augmentation du potentiel du réservoir bas, Π_L .

On a :

$$F_{LP} = \Pi_L I_P$$

$$\Pi_L = f_2(X_L)$$

Le choix des fonctions f_1 et f_2 est important si l'on souhaite obtenir des résultats quantitatifs avec le modèles. Si l'on ne souhaite que des résultats qualitatifs, on peut se contenter de décrire la forme que devraient avoir ces fonctions (croissante ou décroissante, concave ou convexe, etc...). Dans la suite, on prendra pour f_1 une fonction croissante et convexe, telle que $f_1(X_H = 0) = 0,5$ et $f_1(X_H = X_T) = 1$. On prendra pour f_2 une fonction croissante et concave, telle que $f_2(X_L = 0) = 0$ et $f_2(X_L = X_T) = 0,5$.

Lorsque toute la ressource est dans le réservoir haut, $\Pi_H = 1$ et $\Pi_L = 0$. La *différence de potentiel* $\Delta\Pi$ est maximale. Lorsque toute la ressource est dans le réservoir bas, $\Pi_H = \Pi_L = 0,5$. La différence de potentiel est nulle, et la production est impossible. L'activité économique sans recyclage entraı̃ne le passage de ressources entre le réservoir haut et le réservoir bas, donc une diminution de $\Delta\Pi$. Autrement dit, l'activité économique sans recyclage entraı̃ne une diminution de la capacité ultérieure à produire.

Finalement, on a introduit des variables extensives pour décrire la quantité (X_H, X_L, X_S, X_T), et des variables intensives pour décrire la qualité de la ressource (Π_H, Π_L)

Le temps joue un rôle dans le processus d'extraction de la ressource. Plus précisément, produire a une *intensité* très élevée n'est pas équivalent a produire a faible *intensité*. A faible intensité, le rendement du processus est meilleur, mais le flux produit G est moins important. A intensité élevée, G est plus élevé mais le rendement est dégradé.

On introduit donc une *résistance* R_P . On a alors un terme de friction $R_P I_P^2$, et F_{LP} devient :

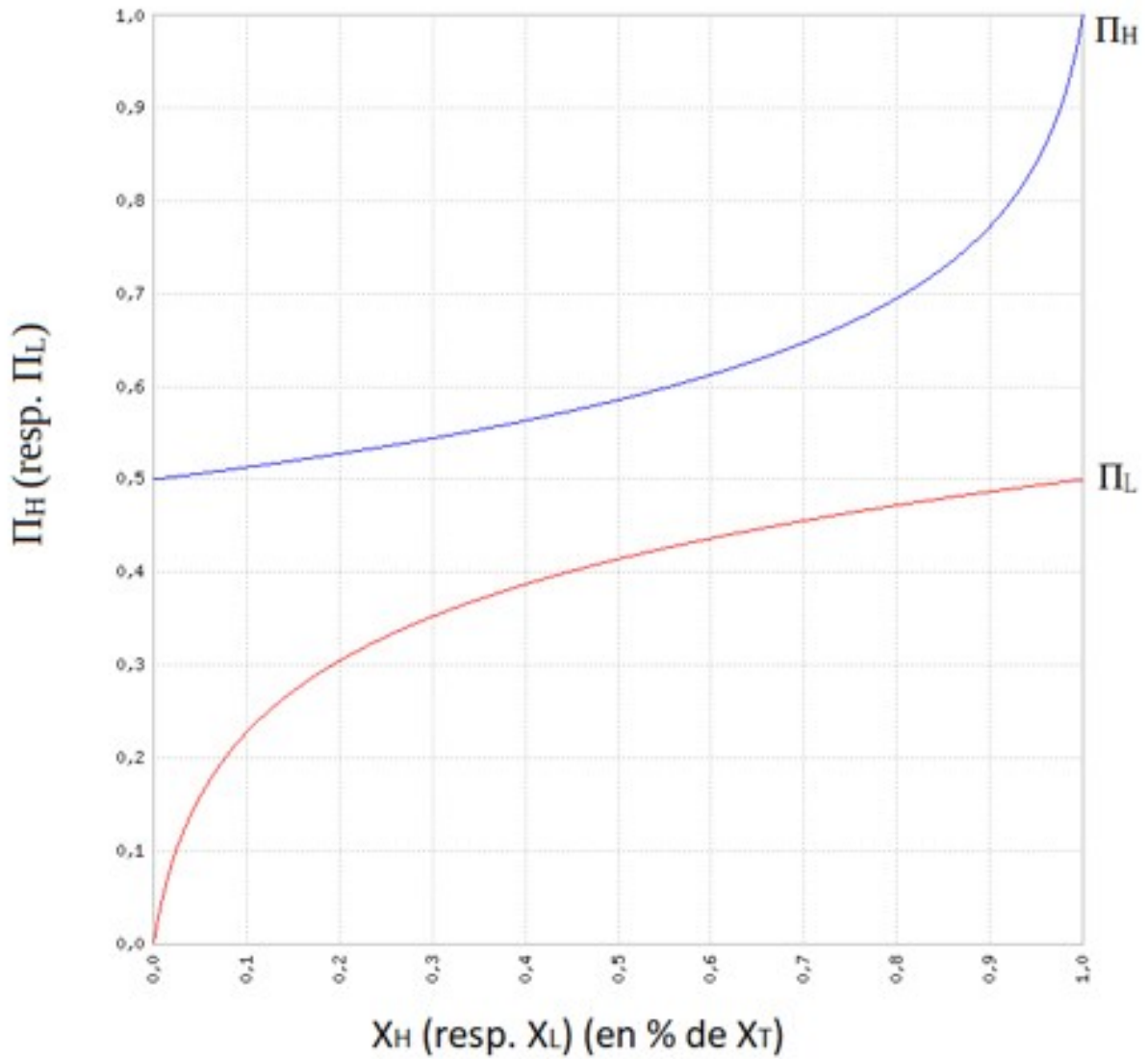
$$F_{LP} = \Pi_L I_P + R_P I_P^2$$

En résumé, les équations décrivant l'extraction sont :

$$F_{HP} = \Pi_H I_P$$

$$F_{LP} = \Pi_L I_P + R_P I_P^2$$

$$G = F_{HP} - F_{LP} = \Delta\Pi I_P + R_P I_P^2$$

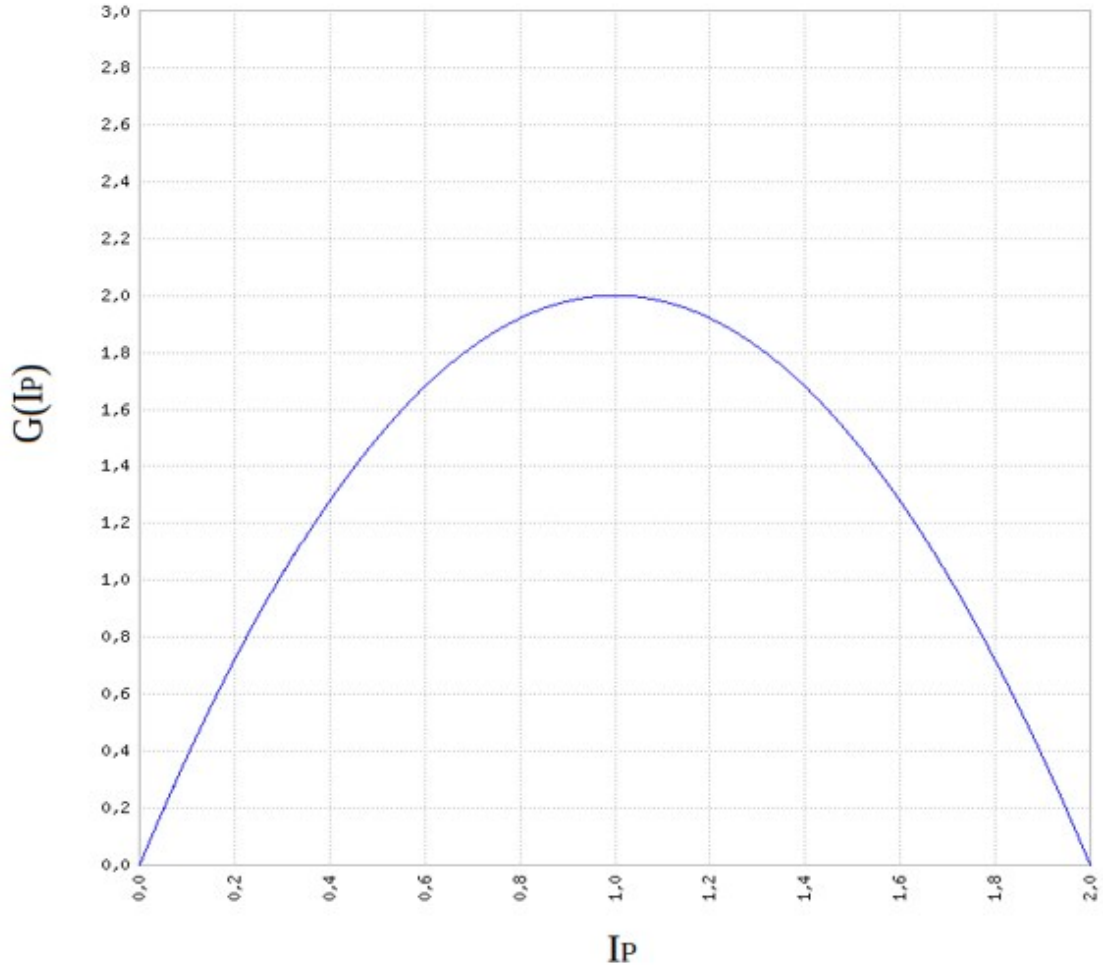


Le flux extrait G est donc fonction de la différence de potentiels, de l'intensité de production, et de la résistance. Supposons $\Delta\Pi$ et R_P fixés. G est alors une fonction parabolique de I_P .

Le terme de friction quadratique entraîne qu'au delà d'un certain seuil ($I_P = \Delta\Pi/2R_P$), augmenter encore l'intensité de production diminue en fait le flux extrait G .

Lorsque l'on souhaite atteindre un certain niveau de flux d'extraction G , il y a donc zéro, une, ou deux intensités de production possible. S'il y en a deux, on choisira systématiquement la plus basse. Ainsi, la valeur ($I_P = \Delta\Pi/2R_P$), qui permet d'atteindre le flux d'extraction maximal est aussi la valeur maximale de I_P . On notera cette valeur I_P^{max} .

De plus, il est possible que le niveau de flux d'extraction G requis ne soit pas atteignable,



selon le couple $(\Delta\Pi, R_P)$. La valeur maximale de G est

$$G^{max} = \Delta\Pi^2/4R_P$$

Il est donc possible que la sphère économique fixe une requête de production qui ne puisse pas être satisfaite. La possibilité de ce *défaut de production* constitue le cœur du modèle: c'est là que se manifeste la rétroaction de la sphère physique sur l'activité économique. Un tel défaut de production est favorisé par :

- Une requête de production élevée
- Une différence de potentiel faible (on parle de *pincement des potentiels*)
- Une résistance élevée

De plus, l'efficacité du processus d'extraction, définie par $\eta = G/F_{HP}$, vaut:

$$\eta = 1 - \Pi_L/\Pi_H - R_P I_P^2/F_{HP}$$

A intensité nulle, on retrouve une expression analogue au rendement de Carnot. Ensuite, l'efficacité diminue à mesure que l'intensité augmente. Il s'agit donc de trouver un compromis entre efficacité η et flux extrait G . Enfin, le processus d'extraction possède une certaine inertie. Si l'on est capable instantanément de calculer l'intensité de production idéale permettant de répondre à la requête de la sphère économique, l'intensité de production réelle s'ajuste avec un certain retard. On définit une *intensité de production demandée* I_P^D . Le retard est caractérisé par un *temps caractéristique de réponse de production* τ .

On a alors :

$$dI_P/dt + \tau I_P = I_P^D$$

Remarquons que cela permet de donner une signification physique au temps du modèle. Désormais, la période de $t = 10$ à $t = 20$ dans le modèles, soit $\Delta t = 10$, peut être comparé aux temps de réaction des feuilles, qui eux ont une signification physique.

6.3 Zone de recyclage

Le flux de recyclage naturel est donné par la relation:

$$F_{NR} = r \left(1 - \exp \left(\frac{X_L}{0.5 X_T} \right) \right)$$

ou r le taux de régénération naturel.

Parfois, un processus permettant de recycler une ressource est connu et maîtrisé par l'Homme. On parle de recyclage "humain", par opposition au recyclage naturel. Ces processus de recyclage humain sont des activités économiques à part entière, et le recyclage d'une unité de ressource nécessite un apport d'énergie (et de matière). Dans l'état actuel du modèle, on suppose que recycler "humainement" une unité de ressource nécessite un apport de x unités d'énergie. La valeur x correspond au paramètre **recyclingEnergy**, spécifique à chaque feuillet³. On a introduit ici une notion de finalité de la production : la combinaison de certaines ressources permet de produire un bien (ici un service) : le recyclage d'une autre ressource. Les notions de *bien final* et de *recettes de production* formalisent cette idée. Dans le modèle, elles sont implémentées au niveau de la sphère physique, au-dessus des différentes feuilles ressources. On parle de noyau central, englobant toutes les feuilles ressources.

7 Annexe C: Equations gouvernants un feuillet flux

Un feuillet de type "flux" est défini par un flux incident P_i (intégré sur toute la surface de la Terre), et un appareil de production caractérisé par un rendement η et une surface installée

³Remarquons que ce choix de modélisation est peu réaliste. Non seulement il faut en général d'autres ressources que juste de l'énergie pour opérer un processus de recyclage, mais la difficulté à recycler (c'est à dire la quantité d'énergie à apporter pour recycler une unité de ressource) varie, selon la qualité du déchet. Ce point sera à améliorer dans la suite du développement du modèle.

S (en pourcentage de la surface terrestre). L'appareil de production permet l'extraction de cette ressource, c'est à dire sa mise à disposition pour une transformation ultérieure.

Le flux extrait est :

$$G = \eta P_i S$$

Ce flux peut être immédiatement utilisé, ou stocké en attente d'utilisation. La capacité de stockage est définie par le paramètre $stock_{Max}$.

L'utilisation de la ressource correspond à un flux sortant du stock, noté G_{USED} .

Ainsi, le stock X_S vérifie :

$$\begin{aligned} \Delta X_S &= G - G_{USED} \\ 0 &< X_S < stock_{Max} \end{aligned}$$

8 Annexe D: Gestion du noyau central couplant les feuillets physiques: "recettes"

Le noyau central est la zone d'assemblage des ressources précédemment extraites pour formation des biens finaux. Les recettes de production définissent les ingrédients et quantités nécessaires à la formation d'une unité d'un bien final. Par exemple, on peut définir le bien final "barque" avec la recette :

$$5 \text{ bois} + 3 \text{ énergie} = 1 \text{ barque}$$

L'ensemble des coefficients des recettes définit une *matrice des recettes*, dont les colonnes représentent les ressources et les lignes les biens finaux.

On suppose que les requêtes de la sphère économique s'expriment en unité de bien final. Les requêtes de production de chaque ressource se déduisent grâce aux coefficients des recettes.

Comme les recettes définissent des proportions entre les ressources, les productions de chaque ressources doivent s'ajuster les unes aux autres en permanence. Par exemple, en reprenant l'exemple précédent, si la production de bois chute, la production d'énergie doit diminuer d'autant : il ne sert à rien de continuer à brûler du pétrole si l'on n'utilise pas l'énergie produite.

La mise en place de stratégies permettant d'obtenir ce résultat a fait l'objet de plusieurs tentatives⁴.

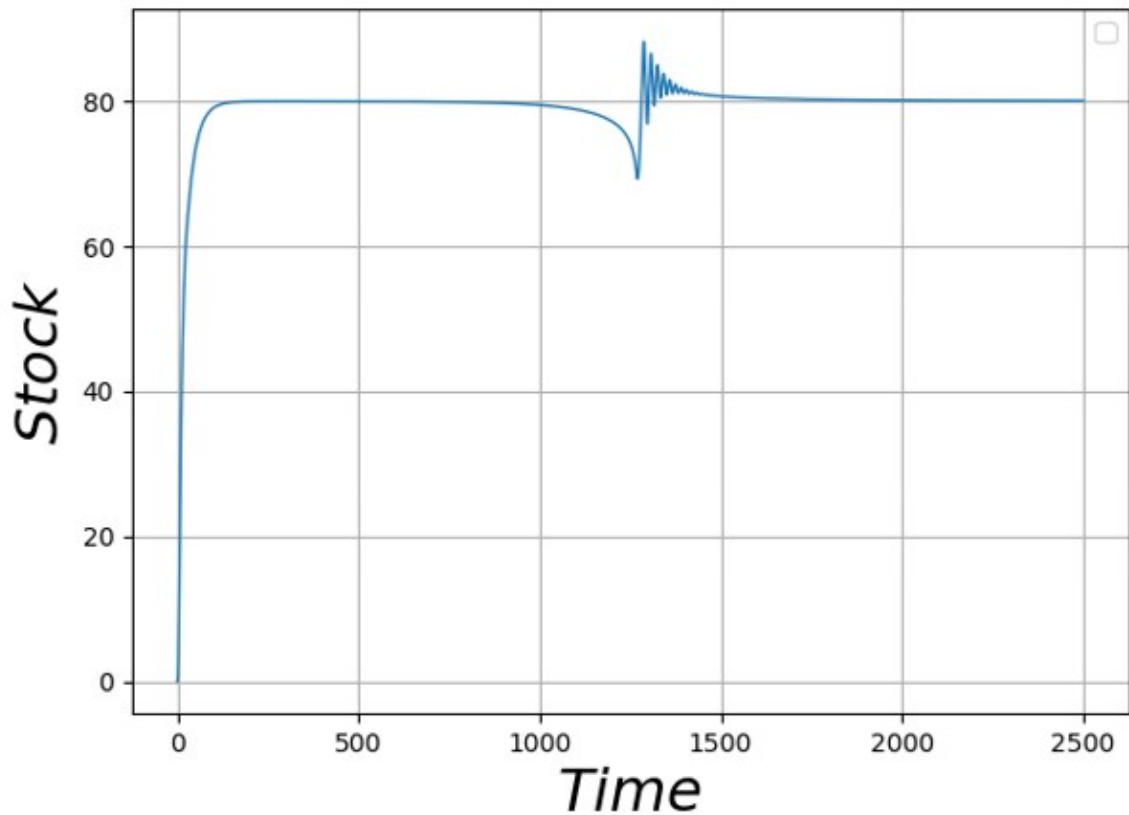
⁴Dans une première tentative, le noyau central indique (à chaque nouveau pas de temps) à chaque feuille le niveau de production souhaité. Le noyau central doit donc recueillir depuis les feuilles les informations concernant les quantités de ressources disponibles pour utilisation (X_S), les traiter, puis renvoyer à chaque feuille le niveau de production requis pour l'instant suivant. La complexité de ce processus augmente exponentiellement avec le nombre de ressources et le nombre de recettes. Finalement, il a été impossible de réaliser un algorithme satisfaisant permettant de traiter toutes ces données, car un tel algorithme nécessite l'introduction de multiples tests conditionnels qui rendent le processus très peu stable. Remarquons enfin que ce fonctionnement est peu naturel (dans un système de marchés), puisqu'il correspond à l'hypothèse

Dans la stratégie retenue on fixe à chaque feuillet un objectif de stock à atteindre. Ensuite, l'intensité de production de chaque feuillet s'ajuste afin de faire converger la valeur du stock vers le stock cible, et de l'y maintenir. Plus précisément, la variation de l'intensité de production demandée ΔI_P^D est donnée par l'équation :

$$\Delta I_P^D = a(X_S - X_S^{CIBLE}) + b(dX_S/dt - 0)$$

On souhaite que X_S converge vers X_S^{CIBLE} , et dX_S/dt vers 0 : ΔI_P^D est donc fonction des écarts $X_S - X_S^{CIBLE}$ et $dX_S/dt - 0$. A l'équilibre, ΔI_P^D est nulle.

a et b sont des paramètres définissant la préférence relative entre les deux objectifs ($X_S = X_S^{CIBLE}$ et $dX_S/dt = 0$).



Dans cette stratégie, chaque feuillet fixe de manière autonome son intensité de production. On décrit ainsi une situation où chaque secteur de production auto-régule sa production en fonction de ce qu'il vend. L'introduction de la notion de recette permet également de faire apparaître l'idée qu'on ne peut pas produire de bien final sans énergie. En effet, la recette de production indique la quantité d'énergie nécessaire à la réalisation d'une unité de bien final. Si cette quantité n'est pas disponible, on ne produit pas de bien final,

d'une entité centrale régulatrice qui indique à chaque secteur de production le niveau de production requis en fonction des résultats des autres secteurs.

c'est à dire qu'on " n'utilise " pas la ressource qui a été extraite pour, une fois associée à de l'énergie, être transformée en un bien final. Face à cette non utilisation, et afin de ne pas constituer de stock trop important, la feuille ressource va de manière autonome diminuer son intensité de production. Ainsi, l'introduction de la notion de recette permet de rétroagir sur l'extraction de toutes les ressources en cas de manque d'énergie : on ne peut rien produire sans énergie. Ce raisonnement est également valable en cas de défaut de production d'une ressource autre qu'énergétique.

Ainsi, chaque feuille extrait à chaque pas de temps une certaine quantité de ressources. Elle s'ajoute à la quantité de ressources "en stock" X_S disponible pour transformation ultérieure. La détermination du nombre d'unités de biens finaux produits est fonction:

- des quantités de ressources "en stock"
- des requêtes de production de bien final provenant de la sphère économique
- de la matrice des recettes

Il s'agit donc d'allouer les ressources aux différentes recettes de production de biens finaux. Il existe différentes méthodes d'allocations possibles. Par exemple : prioriser absolument la production du bien final n^o1 au détriment de tous les autres, ou, à l'inverse, produire des biens finaux en quantité égale sans tenir compte des requêtes de production, ou encore, produire des biens finaux en respectant au maximum les proportions définies par les requêtes de production émanant de la sphère économique.

Cette dernière stratégie semble la plus naturelle. Cela signifie que l'on considère que les requêtes de production de biens finaux correspondent à la demande du marché, et que l'on souhaiterait satisfaire toutes les demandes simultanément, mais qu'en cas d'impossibilité, on répartit le défaut de production entre tous les biens finaux utilisant cette ressource. L'algorithme renvoie les allocations des ressources à la production des différents biens finaux.

8.1 Mix énergétique

Lorsque la production d'un bien requiert de l'énergie, elle peut être réalisée quelle que soit la provenance de cette énergie: pétrole, charbon, gaz, nucléaire, solaire, etc. Il faut donc spécifier dans la recette le besoin en énergie, et non pas le besoin en chaque ressource énergétique. Cela implique qu'il faut indiquer, parmi les feuilles, lesquelles sont des ressources énergétiques. On utilise ensuite ces ressources pour répondre au besoin en énergie. On définit ainsi un mix énergétique effectif.

De plus, on définit lors du lancement d'une simulation un mix énergétique souhaité, que l'on va chercher à satisfaire lorsque c'est possible. Le mix énergétique effectif peut être différent du mix énergétique souhaité, par exemple si une ressource énergétique vient à manquer.

Finalement, la sphère physique décrit l'évolution de l'état de la ressource au cours du temps, et comptabilise les flux de matière et d'énergie engendrés par la production de

biens et par le recyclage. Mais les niveaux de production et de recyclage souhaités sont des décisions humaines, auxquels la sphère physique ne fait que répondre. Les lois décrivant l'évolution de ces requêtes sont décrites dans la sphère économique.

9 Annexe E: Economie

9.1 Sphère économique

9.1.1 Structure générale

Le rôle de la sphère économique est de spécifier l'évolution de l'ensemble des variables économiques. En particulier, elle indique à la sphère physique :

- des requêtes de production pour chaque bien final
- une requête de recyclage "humain" pour chaque ressource concernée
- le mix énergétique souhaité
- l'investissement, pour chaque secteur (feuille), qui permet d'augmenter le capital. Le capital est directement relié à la résistance R_P des feuilles "stock", et aux variables *surface installée* S et *stockMax* des feuilles "flux"
- le niveau de stock cible pour les feuilles de type "stock"

9.1.2 progrès technique

On spécifie dans la sphère économique les lois décrivant le progrès technique éventuel. Le progrès technique correspond ici à la diminution des quantités de ressources nécessaires à la production d'une unité de bien final. C'est donc un gain d'efficacité: il faut moins d'énergie pour usiner une pièce, ou moins d'aluminium pour produire une canette. Dans le modèle, cela correspond à la diminution des coefficients de la matrice des recettes. La découverte d'un nouveau matériau, ou le développement d'une technologie permettant de substituer un matériau par un autre constitue une autre forme de progrès technologique.⁵ Dans la suite du développement du modèle, la notion de substitution pourra être représentée par une modification des recettes de production. Remarquons bien que la sphère économique n'adresse que des "requêtes de production" à la sphère physique. Cela implique que ces requêtes peuvent être, ou non, satisfaites, par exemple en cas de pincement des potentiels décrivant l'état de la ressource. Ce point est capital, puisqu'il implique la possibilité d'une rétroaction de la sphère physique sur la sphère économique. L'ensemble de lois décrivant l'évolution de ces variables constitue la sphère économique. L'architecture du code du modèle rends ces lois accessibles et modifiables facilement. Dans la démarche du projet,

⁵Par exemple, dans les années 1970, la demande en nickel a chuté de 20%, principalement à cause de la substitution du manganèse au nickel dans la production de pare-chocs automobiles[11].

l'utilisateur est encouragé à tester divers paramètres, lois et modèles macroéconomiques. Une bibliothèque d'exemples de telles lois commence à être constituée. En particulier, on peut utiliser comme requête de production les fonctions de production de modèles macroéconomiques, et comme investissement celui décrit par ces mêmes modèles.

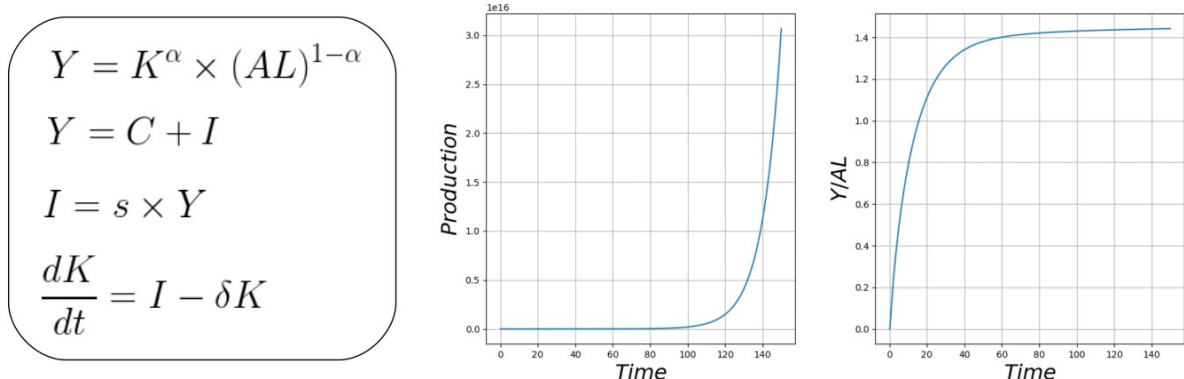
9.1.3 Niveaux d'utilisation du modèle

Il existe plusieurs niveaux d'utilisation du modèle:

1. le premier niveau consiste à faire tourner le modèle en utilisant dans la sphère économiques des lois déjà pré-écrites et en faisant uniquement varier les paramètres (nombre de ressources, leurs caractéristiques, choix du mix énergétique, recyclage demandé, etc). Par exemple, à faire varier le taux de croissance de la productivité du travail dans un modèle de Solow.
2. Le second niveau consiste à tester diverses lois (et modèles macro-économiques) parmi la bibliothèque de lois disponibles. Cela permet d'observer la sensibilité de la sphère physique au choix de ces lois.
3. Enfin, l'utilisateur maîtrisant déjà bien le modèle est invité à proposer de nouvelles lois lui-même, afin d'enrichir la bibliothèque. Une loi peut correspondre par exemple à la fonction de production d'un modèle macroéconomique, à une hypothèse concernant le rythme du progrès technique, ou à l'introduction d'une rétroaction entre l'état des ressources et le mix énergétique souhaité.

9.1.4 Exemple de modèle: Solow

Un exemple de sphère économique basée sur le modèle de Solow



Le modèle de Solow, créé en 1956, est un modèle macroéconomique qui explique la croissance par l'accumulation du capital, la croissance de la population active, et la croissance de la productivité du travail. C'est un modèle de référence de l'économie néo-classique.

Il utilise une fonction de production de Cobb-Douglas à deux facteurs :

$$Y = K^\alpha (AL)^{1-\alpha}$$

avec :

- Y la production
- K le capital
- A la productivité du travail
- L la population active

La productivité du travail augmente de manière exogène, au taux g_A .

La population active augmente également de manière exogène. Dans notre modèle, on choisit de faire tendre la population active vers une valeur limite P_L : le taux de croissance de la population active est $g_L = q(1 - L/P_L)$. Le taux de croissance diminue à mesure que la population active L se rapproche de sa valeur limite P_L .

Le capital s'érode au taux δK , érosion compensée par l'investissement I .

$$\frac{dK}{dt} = I - \delta K$$

Une part s de la production est réinvestie :

$$I = sY$$

Dans ce modèle, la production Y augmente exponentiellement, grâce à la croissance de la productivité du travail. La production par unité de travail effectif Y/AL converge vers un état stationnaire.

9.2 Adaptation pour la sphère économique

9.2.1 Fonction de requête de production

On utilise la fonction de production du modèle de Solow comme fonction de requête de production (section 1.2.1).

On initialise les requêtes de production de chaque bien final au lancement de la simulation. À chaque instant, on calcule la requête pour l'instant $t+dt$ à partir du résultat de production de l'instant t

$$Y_{REQ}(t + dt) = Y(t) * \left(\frac{K(t + dt)}{K(t)} \right)^\alpha \left(\frac{A(t + dt)L(t + dt)}{A(t)L(t)} \right)^{1-\alpha}$$

avec

- Y_{REQ} la requête de production adressée à la sphère physique.

- Y la production effective (qui peut différer de la requête de production)

Ainsi, tant que la requête de production est satisfaite, la production est égale à celle prédite par le modèle de Solow. Si la requête de production n'est pas satisfaite à l'instant t , la requête à l'instant $t+dt$ s'adapte : on ne continue pas à demander une croissance exponentielle indéfiniment alors que la production effective ne suit plus.

9.2.2 Investissement

L'investissement est défini pour chaque feuille ressource. On définit un paramètre s commun à toutes les feuilles, qui correspond à la fraction de la production réinvestie. La production de chaque feuille correspond à ce qui a été effectivement utilisé par le noyau central de la sphère physique, c'est à dire la variable G_{USED} .

Ainsi,

$$I = sG_{USED}$$

9.2.3 Requête de recyclage

Pour la requête de recyclage, on définit la loi suivante : on souhaite recycler une proportion constante de la quantité de déchets produits. On définit cette proportion à l'initialisation de la simulation., en indiquant la valeur du paramètre *recycling* compris entre 0 et 1.

L'équation de la requête de recyclage est donc :

$$Y_{REQ}(t + dt) = (F_{LP}(t) + G_{USED}(t)) * recycling$$

Cette loi n'est qu'une proposition. On pourrait également tenir compte de la quantité totale de déchets X_L pour la requête de recyclage, et non pas simplement de la variation de cette quantité.

9.2.4 Autres inputs économiques

Il a été choisi de ne pas faire varier le niveau cible de stock demandé aux feuillets, ni le mix énergétique souhaité, ni les quantités de ressources nécessaires à la production d'une unité de chaque bien final (coefficients de la matrice des recettes). Le modèle a été créé dans un souci de permettre à l'utilisateur de proposer et tester ses propres fonctions et scénarios de variation de toutes ces requêtes de la sphère économique à la sphère physique. Ainsi, la partie contenant toutes les fonctions accessibles à l'utilisateur est située dans un fichier à part, court et commenté.

9.3 Analyse

Ce modèle n'a pas pour but de reproduire le plus fidèlement possible la trajectoire de l'économie mondiale des dernières décennies, ni de prédire quantitativement ce qui pourrait

advenir. Il s'agit d'un outil permettant de tester une multitude d'hypothèses, de scénarios, de modèles macro-économiques dans un cadre prenant en compte explicitement l'impact de l'activité économique sur la sphère physique et les rétroactions de celle-ci.

Le nombre d'hypothèses et scénarios pouvant être testés n'est limité que par l'imagination de l'utilisateur. Par conséquent, cette partie n'a pas pour ambition de livrer une analyse complète de ce que l'on peut tirer du modèle, mais de livrer quelques résultats fondamentaux obtenus. On tâchera de présenter ces résultats, puis de les illustrer au moyen d'un exemple qui permet d'isoler le phénomène ou motif discuté.

On retrouve des résultats attendus, mais qui ne sont pas obtenus par la plupart des modèles macroéconomiques. Cela permet de vérifier que cet outil atteint son objectif de proposer une base physique aux modèles macroéconomiques via la prise en compte directe des flux de matière et d'énergie engendrés par l'activité économique.

10 Annexe F: Mécanisme de rétroaction Physique-Economique

10.1 Rétroactions de la sphère physique sur l'activité économique

On observe, selon le paramétrage de la situation, des rétroactions de la sphère physique sur l'activité économique. En particulier, lorsque le flux de recyclage (naturel ou humain) est nul (ressources non recyclables par exemple) ou insuffisant, on observe l'épuisement des ressources "stock", et leur rétroaction sur la production. Cette rétroaction prend la forme de rupture de pentes : il s'agit donc d'effondrement davantage que de diminution progressive. Illustrons ce point par un exemple jouet qui permet de faire apparaître le mécanisme de l'effondrement.

On considère un monde à trois ressources, cuivre, bois et pétrole. Ces trois ressources permettent de produire deux biens finaux, selon les recettes :

- cuivre + énergie = bien 0
- cuivre + bois + énergie = bien 1

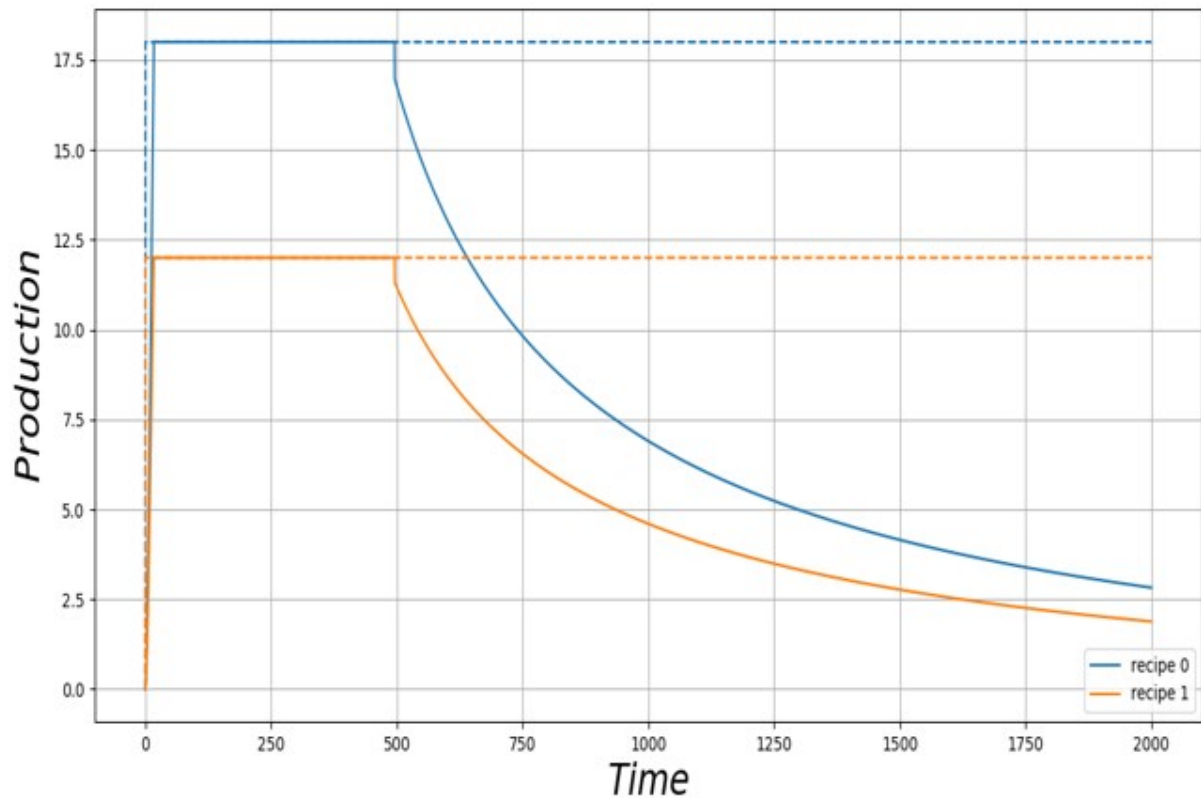
Par souci de simplicité, on considère que l'on n'est pas capable de recycler le cuivre (ou que l'on ne le souhaite pas). Le bois se recycle naturellement. On suppose également que les résistances des appareils de production sont constantes (érosion du capital et investissement nuls)

Enfin, on se place dans un scénario de croissance nulle. La demande en biens finaux est constante (respectivement 12 bien 0 et 18 bien 1 par unité de temps).

On observe une chute de la production des biens 1 et 2 à $t=500$, malgré une requête de production constante. La production semble converger exponentiellement vers une production nulle (ce qui est confirmé par un passage en échelle logarithmique).

Les ressources cuivre et pétrole (seule ressource énergétique de la simulation) sont communes aux deux recettes de production. La simultanéité des chutes de production des biens 0 et 1 suggère que l'une de ces deux ressources a fait défaut.

En effet, l'état de la ressource pétrole semble s'être dégradé rapidement, entraînant une chute de la production de pétrole à $t=500$. Examinons le mécanisme menant à cet



effondrement.

La figure 8a indique que le réservoir haut se vide progressivement, tandis que le réservoir bas se remplit. En conséquence, la différence de potentiels diminue (figure 8b). Malgré une requête de production constante, les flux de pétrole venant du réservoir haut (FHP) et en direction du réservoir bas (FLP) augmentent rapidement, à cause du pincement des potentiels (figure 8c). Dans le même temps, l'efficacité du processus chute (figure 8d). L'intensité de production augmente pour compenser la chute de l'efficacité et satisfaire la requête. L'intensité de production maximale possible diminue, et à $t=500$, l'intensité de production atteint l'intensité de production maximale (figure 8e). Immédiatement, la production chute (figure 8f).

Ainsi, un scénario de croissance nulle, sans recyclage, entraîne un emballement avec une explosion des flux de ressource afin de compenser la perte d'efficacité, dans un cercle vicieux. On observe ici un défaut de production lié à l'épuisement d'une ressource non-renouvelable et non-substituée.

10.2 Etat stable

Cependant, une activité économique stable (qui ne s'effondre pas à temps infini) est possible, si elle n'implique l'utilisation que de ressources stock recyclables (naturellement ou humainement) et de ressources renouvelables (ressources flux).

Pour illustrer ce point, on se place dans une situation similaire à l'exemple précédent, en remplaçant la feuille "pétrole" par une feuille "énergie solaire". La demande en biens finaux 0 et 1 est constante. On suppose que la ressource bois est très abondante, contrairement à la ressource cuivre. Cependant, on est capable de recycler le cuivre, au moyen d'un apport d'énergie : une unité d'énergie permet de recycler une unité de cuivre.

On suppose également que la surface de panneaux solaires installée est très importante, et qu'il n'y a pas d'érosion du capital. Ainsi, la quantité d'énergie renouvelable est largement supérieure aux besoins de l'activité économique. C'est une hypothèse forte.

De $t = 0$ à $t = 500$, on décide de ne pas recycler le cuivre. À $t = 500$ et pour tous les instants ultérieurs, on décide de recycler 100 % des déchets de cuivre nouvellement produit.

Le système semble stable (Fig. 10.2). Mais l'observation de l'évolution de l'état de la ressource cuivre montre que la décision de fixer une requête de recyclage de 100 % à $t=500$ a permis d'éviter un effondrement, et d'atteindre cet état stable (Fig. 10.2).

10.3 Passage d'une économie basée sur des ressources flux à une économie basée sur des ressources stock

Il existe donc, pour un ensemble de ressources et de recettes donnée, un niveau de production stable maximum. L'activité économique peut dépasser ce niveau stable maximum grâce à l'usage de ressources "stock" dont le rythme d'exploitation est virtuellement illimité. Mais si l'exploitation de ces ressources est plus rapide que le recyclage naturel, ou si elle ne s'accompagne pas d'une augmentation égale du recyclage humain (en particulier si celui-ci est impossible, comme pour les ressources fossiles), on risque de dégrader ces ressources, si bien que le nouvel état n'est pas stable.

En fin de compte, les facteurs limitant sont :

- l'utilisation de ressources stock que l'on ne sait pas recycler, et pour lesquelles on ne trouve pas de substituts.
- La production d'énergie renouvelable, nécessaire au recyclage de toutes les autres ressources stock.

Si les ressources stock s'épuisent, on revient de manière forcée à un niveau stable, vérifiant les conditions énoncées précédemment (section 2.2). La dégradation de l'état des ressources stock advenue est irréversible, et le nouveau niveau de production stable maximum a diminué.

Afin d'illustrer ces propos, on considère un monde à quatre ressources : cuivre, bois, pétrole et énergie solaire. Par souci de simplicité, on suppose à nouveau que l'on ne sait pas recycler le cuivre, mais que cette ressource est extrêmement abondante. On suppose également que le taux de régénération du bois est très élevé.

On considère les mêmes recettes que précédemment (section 2.1). La requête de production des biens finaux suit une trajectoire de croissance exponentielle obtenue par une loi de type "Solow", semblable à celle décrite en section 1.2.2.2. Les requêtes de production initiales sont proches de zéro.

Le mix énergétique souhaité est : 100 % d'énergie solaire. Le mix énergétique réel peut

être différent, si le mix énergétique souhaité ne permet pas de répondre aux requêtes de production.

On observe (Fig. 10.3) dans un premier temps une augmentation exponentielle de la production de biens 1 et 2, suivant la croissance exponentielle des requêtes de production. A $t=1250$, la production de biens 1 et 2 chute, et les requêtes de production ne sont plus satisfaites. Les flux de production semblent converger vers un niveau plus faible mais non-nul.

L'étude de l'évolution du mix énergétique réel au cours du temps indique que dans un premier temps ($t < 800$), le besoin en énergie est entièrement couvert par la feuille "énergie solaire" (Fig. 10.3). Le mix énergétique réel est donc égal au mix énergétique souhaité. Pour $t > 800$, le besoin en énergie dépasse la production d'énergie solaire. On fait donc appel à la feuille pétrole afin de continuer à satisfaire la requête en énergie. Le mix énergétique réel voit la place du pétrole devenir prépondérante, à mesure que la demande en énergie croît. La feuille pétrole permet donc de continuer à suivre la trajectoire de croissance exponentielle au-delà du niveau permis par l'utilisation unique de l'énergie solaire. A $t=1250$, la production de pétrole chute, ce qui semble indiquer un défaut de production de la feuille. Un regard sur l'évolution de l'état de la feuille pétrole le confirme. La production de biens finaux chute, suivant la production de pétrole. Le mix énergétique revient peu à peu vers un mix 100 % solaire. Les niveaux de production convergent vers le niveau maximal permis par le flux d'énergie solaire disponible.

10.4 Variations du capital

Toutes les illustrations jusqu'ici proviennent de simulations avec capital fixé : le taux d'érosion du capital α était nul, et l'investissement également. Ainsi, les résistances R_P des feuilles stock et paramètres "surface installée" des feuilles flux étaient constantes. L'introduction d'un taux d'érosion et d'un investissement non-nul modifie les trajectoires observées.

Dans la suite, on suppose que l'investissement dans le capital d'une feuille est une proportion fixe de la production de cette feuille : le secteur "vend" x unités de ressource, et en réinvestit une proportion s . C'est la loi d'investissement décrite en section 1.2.2.2. Notons que les résultats présentés ci-après dépendent fortement de cette loi d'investissement. En particulier, il serait judicieux d'écrire une loi modélisant une situation où le secteur A peut choisir d'investir une part de ses revenus dans le secteur B si celui-ci est plus "rentable". Toute la démarche du projet consiste à laisser accessible à l'utilisateur la partie de modélisation économique afin de lui permettre, par exemple, de tester une telle loi.

Les notions d'érosion du capital et d'investissement entraînent l'apparition de cercles vertueux et de cercles vicieux dans un contexte de requête de production croissante.

Tant que la production augmente, l'investissement augmente. Le capital augmente donc également, et la résistance R_P diminue. Le terme de friction diminue donc, et la valeur maximal du flux produit G_{MAX} augmente. La production peut donc augmenter encore d'avantage, et ainsi de suite.

A l'inverse, si la production chute, l'investissement chute, donc le capital également, et la résistance augmente, ce qui aggrave encore la chute de la production.

Pour illustrer ces propos, on considère un monde à trois ressources : cuivre, bois, pétrole, et deux recettes (les mêmes que précédemment). Le cuivre et le bois sont supposés très abondants. La requête de production est exponentiellement croissante. On effectue deux simulations successives, une avec érosion du capital et investissement nuls, une seconde avec érosion du capital et investissement positifs (Fig. 10.4).

On constate que la croissance et la décroissance sont bien plus rapide dans la simulation avec investissement et érosion du capital. On peut l'expliquer en examinant l'évolution de l'état de la feuille pétrole.

De $t=0$ à $t=700$, la production de pétrole augmente, en réponse à l'augmentation exponentielle des requêtes. L'investissement augmente donc, ce qui permet d'augmenter le capital et de diminuer la résistance (Fig. 10.4c). Par conséquent, l'intensité de production maximale possible augmente (Fig. 10.4e). De plus, la diminution de la résistance compense la chute de la différence de potentiel (Fig. 10.4b). Ainsi, on parvient à extraire presque toute la ressource du réservoir haut (Fig. 10.4a). A $t = 700$, le réservoir haut est presque vide. Malgré la faible valeur de la résistance, la production chute.

On rentre alors dans un cercle vicieux : l'investissement chute également, et ne parvient plus à compenser l'érosion du capital. La résistance de l'appareil de production augmente à nouveau, et la production ultérieure est encore plus difficile. La chute s'accélère.

11 Conclusion

- Outil d'ancrage dans la réalité physique de n'importe quel modèle macroéconomique, et observation de l'action de la sphère économique sur la sphère physique.
- modèle développé dans un souci de simplicité et modularité afin de faciliter son appropriation par ses utilisateurs.
- Modélisation du monde physique utilisant certaines catégories de la thermodynamique sans revendication d'être un modèle thermodynamique.
- requêtes économiques satisfaites ou non selon la disponibilité des ressources physiques.

References

- [1] Boulding, K.E. The economics of the coming spaceship earth. In Environmental Quality in a Growing Economy.H. Jarrett, Ed.: 3–14. Johns Hopkins University Press. Baltimore, 1966.
- [2] Georgescu-Roegen, N. The Entropy Law and the Economic Process. Harvard University Press. Cambridge, MA, 1971.

- [3] Fritz SÄ¶llner, A reexamination of the role of thermodynamics for environmental economics, *Ecological Economics*, Volume 22, Issue 3, Pages 175-201, 1997.
- [4] Cutler J Cleveland, Matthias Ruth, When, where, and by how much do biophysical limits constrain the economic process?: A survey of Nicholas Georgescu-Roegen's contribution to ecological economics, *Ecological Economics*, Volume 22, Issue 3, Pages 203-223, 1997.
- [5] Herman E Daly, Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz, *Ecological Economics*, Volume 22, Issue 3, Pages 261-266, 1997.
- [6] Robert M Solow, Georgescu-Roegen versus Solow-Stiglitz, *Ecological Economics*, Volume 22, Issue 3, Pages 267-268, 1997.
- [7] Joseph E Stiglitz, Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz, *Ecological Economics*, Volume 22, Issue 3, Pages 269-270, 1997.
- [8] Herman E Daly, Reply to Solow/Stiglitz, *Ecological Economics*, Volume 22, Issue 3, Pages 271-273, 1997,
- [9] Meadows, D. H., Meadows, D.H., Randers, Jørgen, et al. The limits to growth: a report to the club of Rome (1972). 1972.
- [10] Glucina, M. D. and Mayumi, K, Connecting thermodynamics and economics. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185: 11-29. (2010)
- [11] Godard O., Baillon J., Céron J., Substitutions et économie sociale des ressources naturelles, page 15, 1980

