Rapport écrit

ARE DYNAMIC

2018-2019

EllE6274289\*\*

**Limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C : quels scénarios ?**

Tahar AMAIRI

Cyrielle CLASTRES

Thanh Liem TA

Catherine YONG

1. **Résumé**

L’objectif de notre projet est de trouver plusieurs scénarios logiques et réalistes permettant de maintenir le réchauffement climatique sous le seuil des 1,5 °C, une limite qui d’après le GIEC (**G**roupe d'experts **I**ntergouvernemental sur l'**E**volution du **C**limat) permettrait d’éviter des conséquences désastreuses(1). Pour cela, nous avons utilisé une équation générique permettant de relier plusieurs paramètres économiques et énergétiques aux émissions de CO2 : c’est l’équation de KAYA. Ainsi, pour modéliser cette équation, nous avons choisi de travailler sous Python 3 avec le Jupyter Notebook, un environnement permettant d’utiliser plusieurs librairies qui sont indispensables pour notre programme.

**SCENARIOS : A COMPLETER**

1. **Introduction**

Le réchauffement climatique est de nos jours un sujet très important de par son actualité omniprésente et du fait qu’il nous concerne tous. Mais lorsqu’un groupe de scientifiques tel que le GIEC préconise de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C, on ne peut réellement s’imaginer les efforts qui doivent être accomplis par l’humanité pour arriver à cet objectif, nous savons impertinemment que nous avons tous une part de responsabilité, mais d’une façon globale et mondiale on ne se rend pas compte des ordres grandeurs et de la faisabilité de cet engagement. C’est pour cela qu’à travers plusieurs scénarios (réalistes et probables avec des conditions) nous essayerons de mettre à jour ces ordres de grandeurs et les engagements nécessaires afin de respecter cette préconisation. Avant de commencer, il nous fallait un moyen simple de lier certaines données clés (et qui sont compréhensibles pour la majorité des gens) au réchauffement climatique. Comme tout le monde le sait, le réchauffement climatique est majoritairement induit par les émissions de CO2, c’est alors là que nous avons découvert une équation à la fois simple et très ingénieuse : l’équation de KAYA. Tout notre travail se repose donc sur cette simple équation qu’on vous présentera ultérieurement.

Il est cependant important de noter qu’un modèle simplifie la réalité pour la rendre plus facile à étudier. Ainsi, tout modèle présente des limites. Dans notre cas, seuls 4 paramètres sont pris en compte. D’autres facteurs jouent aussi un rôle, comme le précise le GIEC (Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat). De plus, les prévisions ne sont pas forcément les plus fiables. En effet, l’activité humaine et son impact sur l’environnement ne sont pas pris en compte, c’est une activité instable et imprévisible. De plus, à cause de l’interdépendance des paramètres, les incertitudes peuvent s’accumuler. Dans l’équation de Kaya, étant donné qu’on multiplie chaque rapport par un coefficient différent, les valeurs ne se simplifient pas comme dans une multiplication, ce qui diminue la dépendance mutuelle des paramètres.

L’équipe de développement se compose de Catherine YONG, Thanh Liem TA, Cyrielle CLASTRES, Tahar AMAIRI. Chaque membre du groupe s’est donc occupé de la modélisation d’un des paramètres. Dans un premier temps, nous allons vous présenter les notions fondamentales sur lesquelles reposent notre travail puis dans un second temps les contributions en termes de modélisation et finalement nous dresserons un bilan général sur cette UE et notre travail.

1. **Présentation de la thématique**

Notre travail se repose sur l’équation de KAYA(2). Celle-ci n’est qu’une simple égalité mathématique :

Avec :

* CO2 : Quantité de CO2 émise au niveau mondial/an,
* TEP : Quantité d’énergie consommée au niveau mondial/an en tonne équivalent pétrole,
* PIB : Produit Intérieur Brut annuel mondial/an,
* POP : Population mondiale/an.

On remarque l’apparition de différents rapports :

* = contenu en gaz à effet de serre de l’énergie,
* = intensité énergétique de l’économie,
* = production par personne.

Cette équation nous permet donc de lier les émissions de CO2 à ces différents rapports. En effet, si nous voulons par exemple diviser le côté gauche de l’équation (donc les émissions de CO2) il faudrait donc aussi le faire de l’autre côté afin de respecter l’égalité, ce qui signifie diviser ces différents rapports. Maintenant tout l’intérêt de cette équation réside dans un jeu d’équilibrage afin de faire respecter l’égalité.

Mais par quelle valeur nous devons diviser cette équation pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C ? Pour cela, on a décidé de se baser sur le rapport le plus récent du GIEC (1) et on apprend que les émissions de CO2 doivent diminuer de 45 % d'ici 2030 par rapport à leur niveau de 2010 et que la quantité émise de CO2 dans l’atmosphère doit drastiquement chuter jusqu’à atteindre un niveau zéro à partir de 2050.

Avant de pouvoir utiliser cette équation, chaque membre du groupe a pris en charge un paramètre à modéliser et a utilisé une notion fondamentale pour le faire.

**III.A. CO2 (Tahar)**

Pour pourvoir modéliser ce paramètre, nous allons nous baser sur le cycle du carbone(3) et le simplifier. En effet, pour connaitre la quantité de CO2 allant dans l’atmosphère sur une année, il suffit de calculer les rejets anthropiques durant une année et de soustraire à cette valeur ce que la nature peut absorber. On néglige donc tout autre émission tel que ceux des volcans ou bien les échanges entre les différentes couches de l’atmosphère.

**III.B. TEP (Thanh)**

Pour pouvoir modéliser le TEP, il faut connaître les consommations d’énergie par région(4), ainsi que les consommations d’énergie par personne par région(5) pour créer deux modèles. Le premier étant une régression linéaire des consommations d’énergie par région avec un ajout d’un paramètre permettant de diminuer d’un certain pourcentage l’évolution de la consommation chaque année et le second étant la combinaison d’une régression linéaire des consommations par habitants et le modèle d’évolution de la population de Catherine.

**III.C. PIB (Cyrielle)**

**III.D. POP (Catherine)**

Afin de modéliser la population, plusieurs modèles existent, mais l’évolution l’exponentielle(20) est la plus réaliste. Pour pouvoir l’utiliser, il faut aussi savoir calculer le solde naturel(21), défini grâce au taux de natalité(22) et de mortalité(23). Plusieurs situations ont été créées, ainsi le coefficient k de l’évolution exponentielle peut varier, ou alors rester fixe. Les valeurs attribuées au préalable à k dans le code sont les différents taux de croissance des régions en 2019.

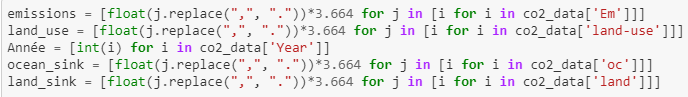
1. **Contributions**

**IV.A. CO2 (Tahar)**

En nous basant sur cette activité(3) qui permet d’avoir une première approche du cycle du carbone, on arrive à trouver une équation simple permettant de modéliser l’évolution du CO2 chaque année :

CO2 émis pour annéen = CO2 anthropiques à l’annéen – CO2 absorbés par la nature à l’annéen

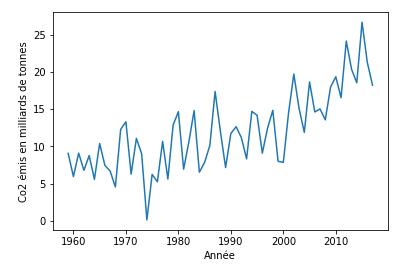
Afin de pouvoir utiliser cette équation, il nous fallait une base de données listant sur plusieurs années des valeurs pour chacun de ces paramètres. Le Global Carbon Project fournit chaque année un registre très riches contenant ce qu’il nous faut pour continuer notre modélisation(4). Après avoir utilisé la librairie pandas pour pouvoir manipuler ces données sous Python, nous voilà avec 5 listes de valeurs prêtent à être utiliser :



Avec :

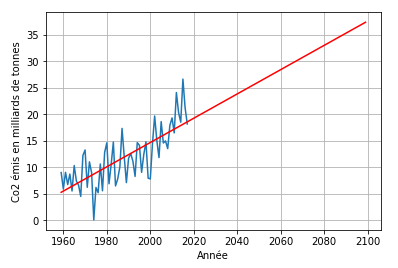
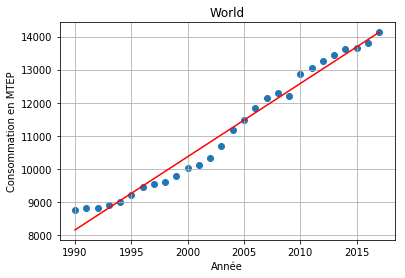
* emissions et land\_use représentant les émissions de CO2 anthropiques,
* ocean\_sink et land\_sink représentant l’absorption du CO2 par la nature.

Voici ce qu’on obtient après l’utilisation de l’équation avec notre programme :



Après cette première approche, nous pouvons maintenant essayer de prédire les émissions de CO2 dans les années à venir, grâce à un autre outil de Python : la courbe de tendance. Pour cela nous allons utiliser un modèle de régression linéaire pour chacun de nos paramètres. Néanmoins certains paramètres tels que le land\_use ou bien le land\_sink sont difficilement prédictible par cette approche du fait qu’ils sont très aléatoires, mais nous verrons que malgré cela nous obtenons des résultats très proches des prévisions.

Après la linéarisation des paramètres, voici ce qu’on obtient :



Comparons maintenant les prévisions de notre modèle :

**IV.B. TEP (Thanh)**

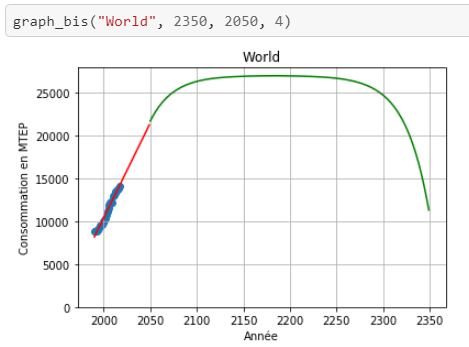
Pour cette partie, nous allons prendre en compte toute l'énergie consommée sans faire distinction entre les différentes énergies existantes ce qui simplifie grandement la recherche et l’acquisition de données.

Nous avons fait deux choix de modélisation pour ce paramètre:

1) Régression linéaire de données existantes

Nous avons récupéré les données sur 27 années pour différentes régions du monde pour notre régression linéaire. Le nombre de données étaient important pour juger la fiabilité de ce modèle.

Sur notre premier modèle de régression linéaire, j’ai choisi de laisser les données sur le graphique en plus de notre régression linéaire afin que l’on puisse juger à l’œil de la fiabilité de notre régression.



On peut maintenant prédire la valeur de n’importe quelle région du monde.

Pour aller plus loin dans ce modèle, trois paramètres ont été ajoutés :

* Une année où se fini notre graphique (2350 dans l’exemple)
* Une année où le taux de croissance de la consommation d’énergie varie (2050 dans l’exemple)
* Un certain pourcentage qui diminue la pente de notre fonction

On peut alors apercevoir la courbe ci-dessus : sachant que notre prise de donnée commence à partir de 1990 si nous réduisons notre consommation d’électricité de 4% chaque année par rapport à l’année précédente à partir de 2050, nous arrivons à notre consommation d’énergie actuelle 300 ans après. Il faut donc agir vite si nous voulons réduire nos consommations d’énergies même minimes.

## 2) Modélisation selon le nombre d’habitant

Nous nous intéressons cette fois-ci à la combinaison de deux modèles. Notre modèle devait alors s’adapter selon le modèle de Catherine. Nous avons tout d’abord fait une régression linéaire et également créé une fonction permettant de prédire la valeur de la consommation d’énergie par personne pour une année et une région voulu.

## Nous devions également coordonner nos régions avec les régions du modèle de population.

## Nous nous sommes alors restreint à quatre régions : l’Europe, l’Amérique du Nord, l’Afrique et l’Asie.

## Sans titre 1.jpg

## En manipulant les paramètres possibles, on peut obtenir un graphique comme ci-contre qui représente la consommation de la région au fil des années.

**IV.C. PIB (Cyrielle)**

Pour le PIB, Cyrielle a fait 3 approches différentes dont 2 se basant sur la formule suivante : PIB=CF+FBCF+VS+X-M.

Avec, CF le capital fixe, FBCF la formation brute de capital fixe, VS la variation des stocks, X les exportations et M les importations.

La première consistait à modéliser le PIB en se basant uniquement sur les données de la France. Celle-ci était assez mauvaise et n’a donc pas été retenue.

La deuxième approche consistait à modéliser le PIB mondial par le PIB moyen de chaque continent. Ainsi, le PIB mondial était plus proche de la réalité que celui de la précédente modélisation.

La troisième approche était celle effectuée par la régression linéaire, elle s’approchait de la réalité comme la seconde mais elle n’a pas été retenue pour autant. En effet, la seconde approche se basait sur la population par continents et donc mondiale et a été jugé plus réaliste. Si la population d’un continent vient à chuter ou à stagner alors le PIB se comporte comme la population le fait.

Pour finir, nous avons modélisé le PIB continental par la population et le PIB mondial séparément.

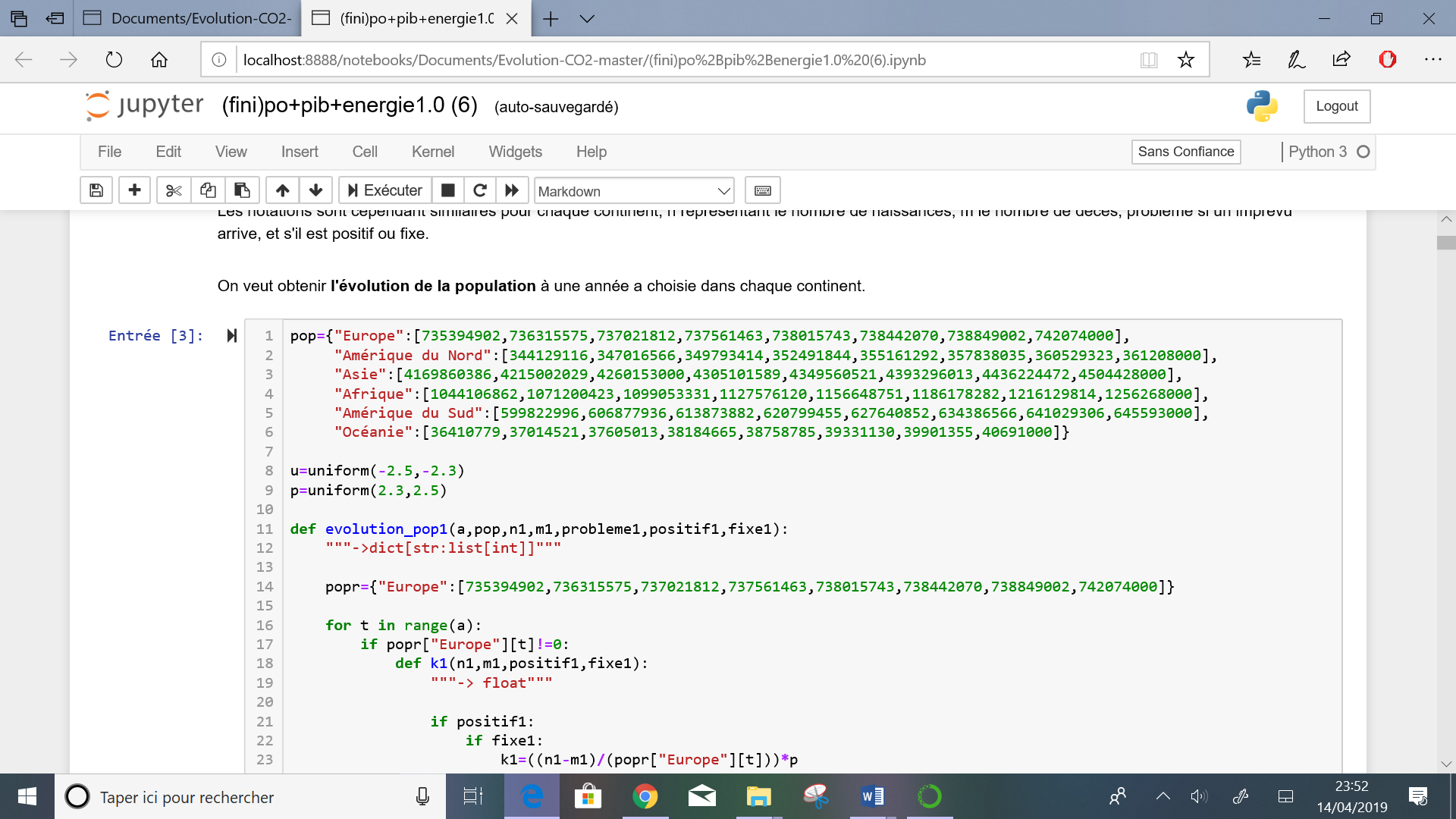
**IV.D. POP (Catherine)**

Pour modéliser l’évolution de la population, l’évolution exponentielle était le modèle le plus réaliste. On la définit de la manière suivante : N(t)=N0\*exp(k\*t), où N(t) est la population à l’année t, N0 la population de départ et k le solde naturel. Il a fallu prendre en compte les populations de 2010 à 2017 afin de pouvoir comparer les résultats du programme final avec les résultats attendus. Cependant, seules les populations de 2017 sont utilisées dans notre programme.

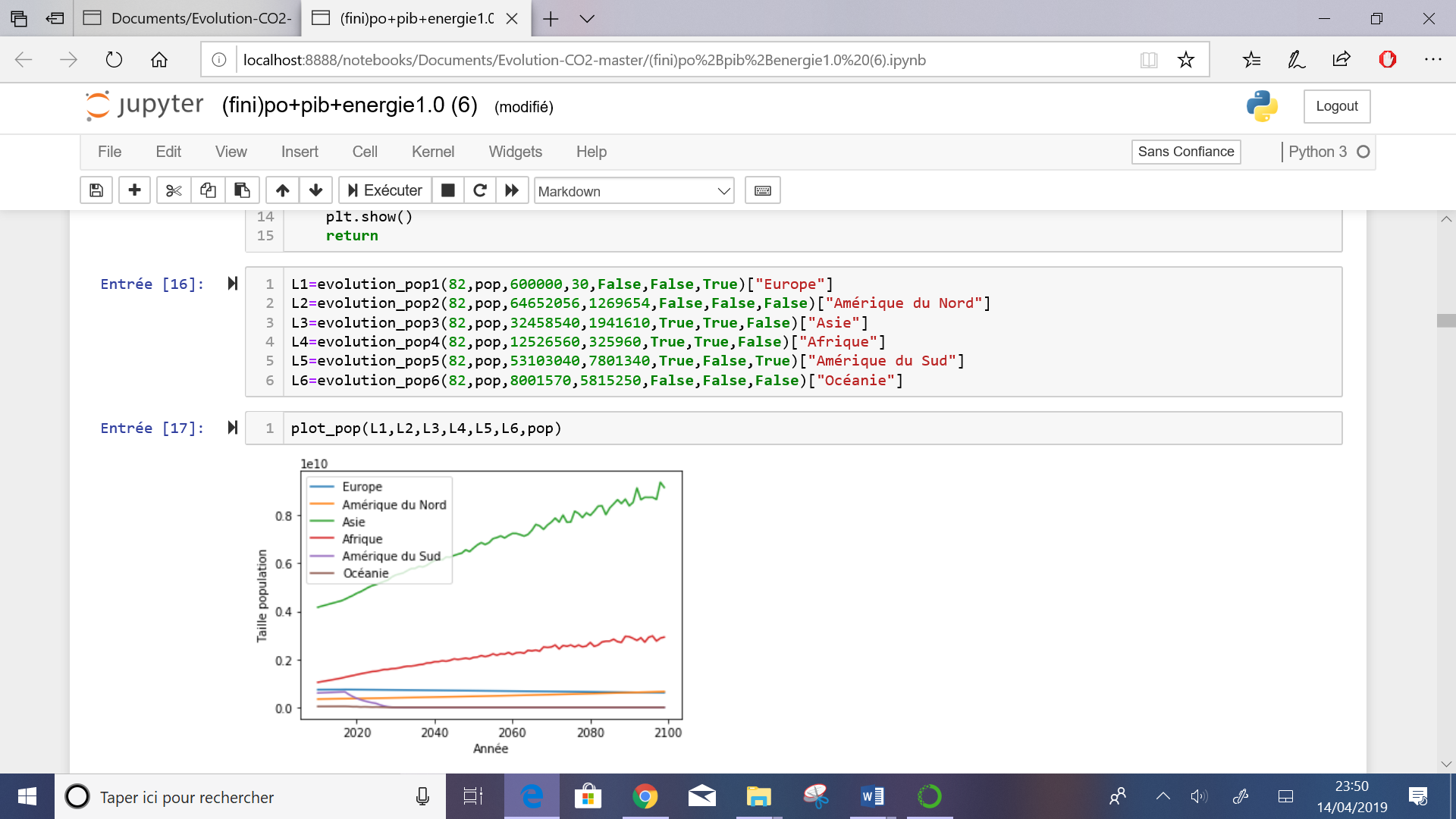
Pour pouvoir utiliser l’évolution exponentielle, il a fallu définir au préalable le solde naturel, qui est la différence entre le taux de natalité et le taux de mortalité. Le taux de natalité est le rapport entre le nombre de naissances et la population totale à l’année t, et le taux de mortalité est le rapport entre le nombre de décès et la population totale à l’année t.

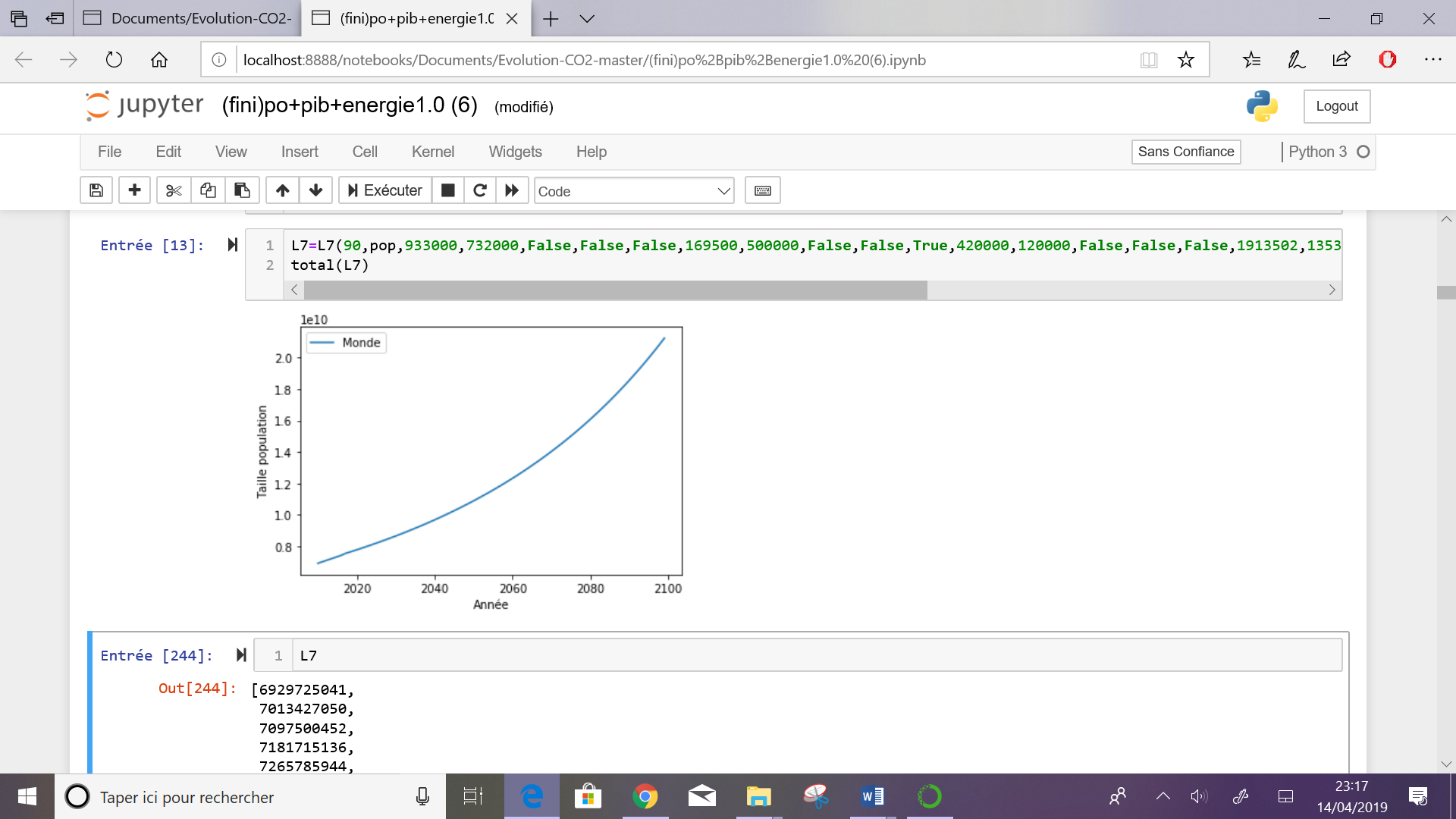
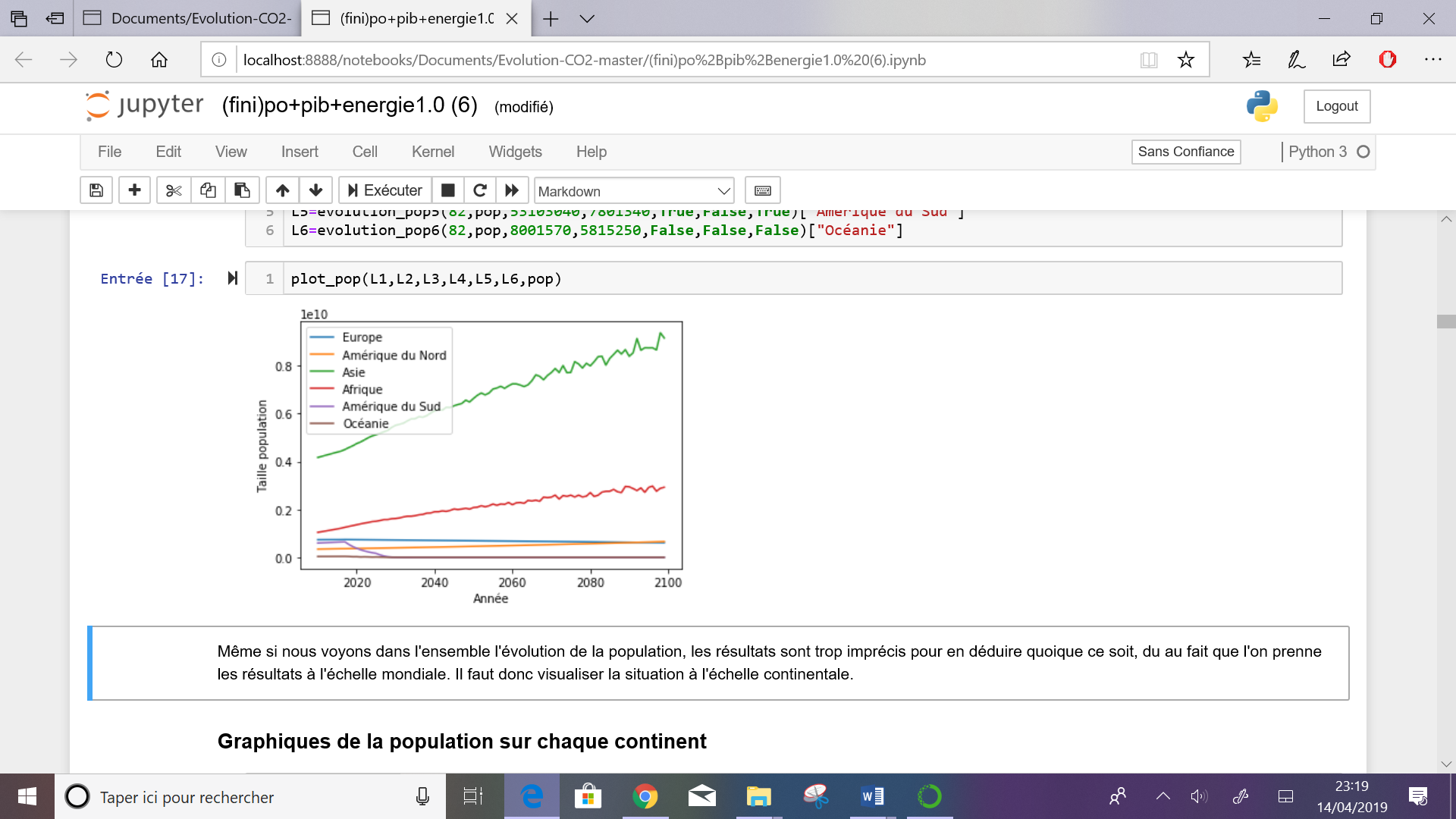
Plusieurs situations ont été mises en place afin de complexifier le problème. Ceci permet d’ailleurs d’éviter le cas où aucun changement n’intervient, la population ne ferait qu’augmenter selon un taux défini grâce aux données de l’INED.

On observe ainsi l’évolution de la population à plusieurs échelles : d’abord mondiale puis continental. Dans les situations ci-dessous, l’Asie, l’Afrique et l’Amérique du Sud suivent le cas où k est différent de celui défini.



Les six fonctions sont consitituées de la même manière, cependant les paramètres ont un nom différent selon le continent.



=

La fonction principale (evolution\_pop\*) peut être résumée avec le schéma suivant :

Situation de départ

Changement

Aucun changement

Négatif

Positif

K fixe

K fixe

K non fixe

K non fixe

**IV.E. Assemblage des modèles**

Une fois que chaque membre de l’équipe finit sa partie de programmation, il a fallu assembler nos codes pour obtenir à la fonction finale, qui vise à modéliser les rapports de l’équation de Kaya. Alors, il suffit de trouver manuellement les coefficients pour atteindre nos objectifs, c’est-à-dire réussir à diminuer les émissions de CO2 de 2010 de 45% d’ici 2030, puis de supprimer totalement ces émissions, qui seront absorbées par la nature.

Plusieurs situations ont été visualisé : **COEFFICIENTS A METTRE POUR CHAQUE CAS**

|  |
| --- |
|  |

* La population augmente de manière régulière et exponentielle. Le facteur PIB/POP agit de la même manière, (le PIB étant proportionnel à la population), il faut donc diminuer les 2 autres facteurs (CO2/TEP, TEP/PIB). Autrement dit, la production de biens et de services doit être plus rentable et doit moins polluer.
* Les énergies renouvelables remplacent une grande partie des énergies fossiles pour émettre moins de CO2, ou on réussit à émettre moins d’énergie pour produire autant.
* La production de biens et de services est plus rentable. On réussit à produire plus mais pour moins cher.
* La population diminue, donc tous les autres paramètres vont eux aussi diminuer.

1. **Conclusion**
2. **Résumé en anglais (Catherine)**

The aim of our project is to find different scenarios that are both logical and realistic, to allow us to maintain global warming under the limit of the 1.5°C, a limit that, according to the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), would help avoid disastrous consequences. To do so, we used an equation that connects several economic and energetic parameters to CO2 emissions : it is the KAYA equation. Therefore, to model this equation, we chose to use Python 3, along with Jupyter Notebook, an environment that provides us a panel of essential libraries for our program.

1. **Références**

**Equation de Kaya :**

1. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/03/ST1.5\_final\_310119.pdf

2. https://sustainabilitydictionary.com/2011/03/13/the-kaya-identity/

**CO2 :**

3. <http://cycleducarbone.ipsl.jussieu.fr/images/cyclecarbone/enseignants/premiermodele.pdf>

4. <https://www.icos-cp.eu/GCP/2018>

**Energie :**

Consommation d’énergie par région :

5.<https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>

Consommation d’énergie par personne par région : 6.<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EG.USE.ELEC.KH.PC>

**PIB :**

Site de l'Insee pour les données françaises:

7.https://www.insee.fr/fr/statistiques/2832656?sommaire=2832834

8.https://www.insee.fr/fr/statistiques/2832670?sommaire=2832834

9.https://www.cnle.gouv.fr/IMG/pdf/fiche\_de\_synthese-Rapport\_ONPES.pdf

Site de la banque mondiale pour trouver le PIB, le FBCF, le VS:

10.https://donnees.banquemondiale.org/indicator/NE.GDI.TOTL.KD?end=2017&name\_desc=false&start=2016

11.https://donnees.banquemondiale.org/indicator/NE.CON.PRVT.PC.KD

12.https://donnees.banquemondiale.org/indicator/NE.GDI.STKB.CD?end=2017&start=2002

13.https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NY.GDP.MKTP.CD?end=2017&start=1960&view=chart

Site de Perspective Monde pour trouver les données 2016 manquantes sur le site de la banque mondiale:

14.http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/stats/0/2017/fr/2/carte/NE.GDI.FTOT.CD/x.html

15.http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?codeTheme=2&codeStat=NE.GDI.STKB.CD&codePays=JPN&optionsPeriodes=Aucune&codeTheme2=2&codeStat2=x&codePays2=JPN&optionsDetPeriodes=avecNomP&langue=fr

16.http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?codeTheme=2&codeStat=NE.GDI.STKB.CD&codePays=NZL&optionsPeriodes=Aucune&codeTheme2=2&codeStat2=x&codePays2=JPN&optionsDetPeriodes=avecNomP&langue=fr

17.http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BilanEssai?codetheme=7&codeStat=NE.EXP.GNFS.CD&grandesRegions=0&anneeStat1=2016&codeStat2=x&mode=carte&afficheNom=aucun&langue=fr

18.http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BilanEssai?codetheme=7&codeStat=NE.IMP.GNFS.CD&anneeStat1=2016&optionGraphique1=sans&logsUni=sansLogUni&codetheme2=2&codeStat2=x&couleurGraphique=Vert&taillePolices=11px&langue=fr&noStat=10

19. Population de chaque pays en 2017:

Exemple: https://www.populationpyramid.net/fr/am%C3%A9rique-latine-et-caraibes/2017/

Généralement : https://www.populationpyramid.net/fr/PAYS/2017/

**Population :**

20.Evolution exponentielle de la population : <http://www.sciences.ch/htmlfr/mathssociales/mathssdynapop01.php>

21.Solde naturel : https://www.ined.fr/fr/lexique/solde-naturel/

22.Taux de natalité : https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1766

23.Taux de mortalité : https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1695

24.Taux de croissance : https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/chiffres/tous-les-pays-du-monde/

1. **Annexes**

* **CO2 (Tahar)**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nom** | | **Type** | **Intervalle** | **Fixe (oui/non)** |
| Le | | list[float] |  |  |
| Lu | | list[float] |  |  |
| L\_oc | | list[float] |  |  |
| X | | int |  |  |
| Y | | \*\*\*\* |  |  |
| annee\_final | | int |  |  |
| X\_annee | | int |  |  |
| predict\_em, predict\_land\_u, | predict\_oc, predict\_land\_s |  |  |  |
| list\_final | | list[] |  |  |

* **Population (Catherine)**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nom** | | | **Type** | **Intervalle** | **Fixe (oui/non)** |
| a | | | int | [1, +∞] | oui |
| k | | | int | [-1,1] | oui si aucun changement |
| n1,m1  n2,m2 | n3,m3  n4,m4 | n6,m6  n5,m5 | int | [1, +∞] | oui si aucun changement |
| positif1  positif2 | positif3  positif4 | positif5  positif6 | bool | True, False | oui |
| fixe1  fixe2 | fixe3  fixe4 | fixe5  fixe6 | bool | True, False | oui |

* **PIB (Cyrielle)**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Nom** | **Type** | **Intervalle** | **Fixe (oui/non)** |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

* **TEP (Thanh)**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Nom** | **Type** | **Intervalle** | **Fixe (oui/non)** |
| P | str | energy\_sonsumption.index | oui |
| year | int | ] -∞, +∞ [ | oui |
| annee\_chute | int | ] -∞, +∞ [ | oui |
| pourcentage | int | [0, 100] | oui |
| annee\_final | int | ] -∞, +∞ [  annee\_final > annee\_debut | oui |
| annee\_debut | int | ] -∞, +∞ [  annee\_debut < annee\_final | oui |
| X | list[int] | ] -∞, +∞ [ | oui |