



TD 6

Analyse de l'équation de Kaya

Le but de ce TD est de vous faire analyser quelques relations entre différentes métriques dont le lien commun est *in fine* la consommation de gaz à effet de serre (GES). Ces relations permettront de vous forger votre avis sur la politique à mener pour réduire ces émissions de gaz.

Pour cela, nous allons décomposer les émissions des GES selon l'équation de Kaya (*Kaya identity* en anglais)

$$GES = \frac{GES}{E} \times \frac{E}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP \quad (1)$$

avec

- *GES* : émissions annuelles de gaz à effet de serre (en tCO₂eq/an)
- *E* : consommation d'énergie annuelle (en TWh/an, avec 1GW = 8,76TWh/an)
- *PIB* : produit intérieur brut annuel (en \$ ou €)
- *POP* : population (nombre de personnes)

Dans la suite nous allons nous intéresser à une analyse de chacun des termes constituant l'équation de Kaya.

Bilan des émissions de gaz à effet de serre (*GES*) :

- 1.1 Grâce au tableau 1 et en supposant consommer 60GtCO₂eq par an (chiffres actuels), combien faut-il d'années pour atteindre la consommation totale du budget restant suivant la cible de réchauffement considérée.

Cible de réchauffement	Budget carbone (GtCO ₂ eq)
1,5°C	150
1,7°C	460
2°C	900

TABLE 1 – Budget carbone restant à émettre à partir de 2024 pour ne pas dépasser une cible de réchauffement avec probabilité au moins de 66%.

- 1.2 Pour chaque cible, combien d'années cela mettra-t-il pour consommer tout le budget carbone sous l'hypothèse qu'on réduit les émissions de GES linéairement jusqu'à les annuler? Quel taux de décroissance d'émission cela représenterait-il la première année? Comparer à la décroissance durant la pandémie de Covid-19.
- 1.3 *Débat* : dans le tableau 2, évaluer les facteurs de l'équation de Kaya sous l'hypothèse d'une diminution rapide de ces dits facteurs. Par rapide, on peut entendre une division par 2 en 30 ans.

	$\frac{GES}{E}$	$\frac{E}{PIB}$	$\frac{PIB}{POP}$	<i>POP</i>	<i>E</i>
envisageable avec des technologies existantes ou à venir					
faisable mais avec un coût financier et/ou sociétal élevé voire très élevé					
quasi-impossible à accepter					

TABLE 2 – Caractérisation des facteurs de l'équation de Kaya sous l'hypothèse de leur diminution.

Facteur 1 : décarbonation de l'énergie (GES/E) :

- 2.1 Sachant qu'en 2021, la consommation énergétique mondiale était de 20TW, et qu'elle était couverte à 85% par des combustibles fossiles :
- o quelle puissance d'énergie décarbonée doit-on installer (en pratique principalement via de l'électricité) ?
 - o en supposant qu'on veuille installer cette puissance en 30 ans, combien doit-on en installer par an ?
 - o en supposant qu'on veuille installer cette puissance en 60 ans, combien doit-on en installer par an ?
- 2.2 *Débat* : comparer à la tendance historique donnée au tableau 3.

Année	Nucléaire	Hydroélectrique	Solaire et Eolien
1960	≈ 0	100	≈ 0
2020	300	500	500
Installation max. par an	27 (en 1985)	21 (à partir de 2000)	80 (à partir de 2023)

TABLE 3 – Puissance fournie et hausse maximale annuelle en GW.

- 2.3 A partir des données du tableau 4, estimer la superficie nécessaire pour satisfaire les besoins actuels en énergie avec les filières renouvelables solaire et éolien.

		Europe	Monde
Rendement photovoltaïque	(W/m ² au sol)	10	8–66
Rendement éolien terrestre	(W/m ² au sol)		2
Rendement éolien off-shore	(W/m ² au sol)		3

TABLE 4 – Production par unité de surface au sol des filières renouvelables en Europe et dans le Monde.

- 2.4 *Débat* : ces chiffres vous semblent-ils réalistes ? Commenter.

Facteur 2 : intensité énergétique du PIB (E/PIB) :

- 3.1 Sur la base de la figure 1 (dont les données viennent du site ourworldindata.org), quel ordre de grandeur de réduction peut-on raisonnablement espérer pour E/PIB dans 30 ans et dans 60 ans ? Comparer aux chiffres compilés par le GIEC (rapport complet du groupe de travail 3 dans l'AR5).

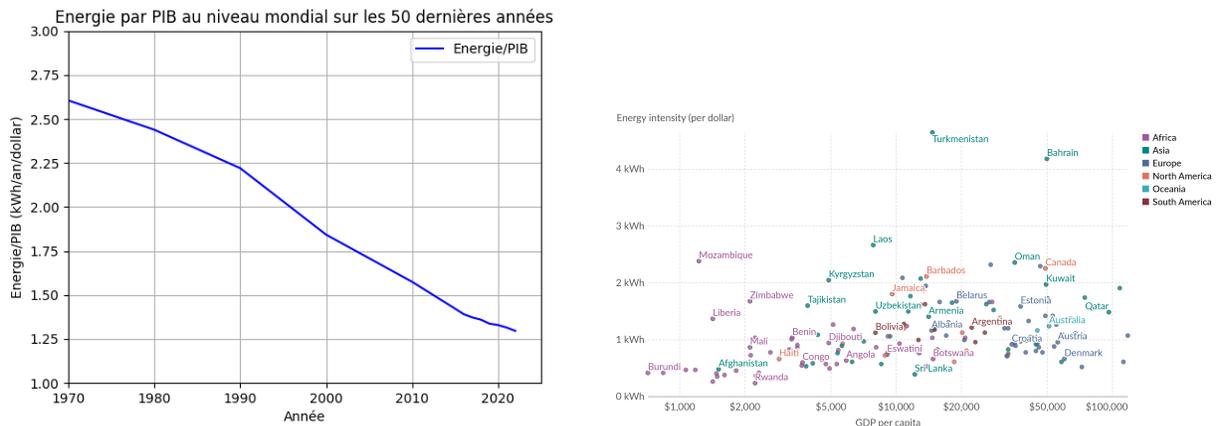


FIGURE 1 – Intensité énergétique du PIB mondialement (à gauche) et localement (à droite).

- 3.2 *Débat* : cette intensité énergétique est a priori inversement proportionnelle à l'efficacité énergétique apportée par les progrès technologiques. Pouvez-vous imaginer des raisons pour lesquelles ce progrès ne se traduirait pas nécessairement en réduction de E ? Pouvez-vous aussi imaginer ce qui bloquerait la baisse de E/PIB ?

Facteur 3 : PIB par personne (PIB/POP) :

- 4.1 En supposant que le facteur 1 diminue de $100 \times (1 - x)\%$ et que le facteur 2 diminue de $100 \times (1 - y)\%$ (on prendra par défaut $y = 0,5$), si l'on veut réduire le GES actuel de 90% en 60 ans, que doit subir PIB/POP ? On supposera que POP est constant. Tracer notamment la diminution de PIB/POP nécessaire en fonction de x .
- 4.2 *Débat* : en reliant les chiffres trouvés en 4.1, aux valeurs du tableau 5, que voit-on? Commenter par rapport à la notion de découplage ainsi qu'au regard de la question 1.3.

	France	Europe (UE)	Monde
PIB total (\$)	$2,7 \cdot 10^{12}$	$15,6 \cdot 10^{12}$	$87,6 \cdot 10^{12}$
POP (millions)	67	447	7714
PIB/POP (\$/personne)	42000	35000	11000
(ajusté en parité de pouvoir d'achat)	49000	46000	18000

TABLE 5 – PIB total et par personne en 2019.

Facteur 4 : nombre de personnes (POP) :

- 5.1 On va modéliser l'évolution de la population mondiale (de manière très grossière ce qui conduira à quelques approximations osées) comme suit : l'indice n sera associé à une génération. Chaque génération dure 30 ans. On va diviser la population entre trois catégories (chacune de durée 30 ans pour avoir un modèle très simple) : J_n les jeunes de moins de 30 ans, A_n les adultes en âge de procréer (de 30 à 60 ans) et V_n les personnes âgées au delà de 60 ans (en pratique, cela va rarement au-delà de 90 ans). On notera la population totale par $P_n = J_n + A_n + V_n$.

En se basant sur la figure 2, donner les proportions de chacune des catégories pour 2020. Donner le nombre brut également sachant qu'il y avait 7,9 milliards d'individus sur la Terre.

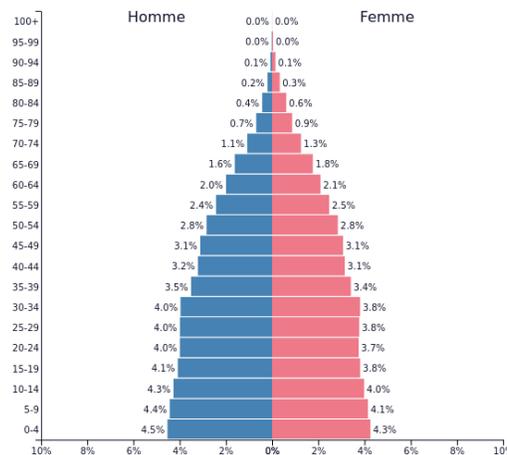


FIGURE 2 – Pyramide mondiale des âges en 2020.

- 5.2 En construisant un modèle mathématique de passage d'une génération $\mathbf{X}_n = [J_n, A_n, V_n]$ à \mathbf{X}_{n+1} , trouver les taux de fécondité permettant la décroissance d'un facteur 2 de la population en *i*) une génération, *ii*) deux générations et *iii*) trois générations. Qu'en pensez-vous par rapport à ce que vous aviez écrit au tableau 2?
- 5.3 *Débat* : quelle configuration de baisse de la population vous paraît raisonnable?
- 5.4 *Débat* : enfin, l'équation de Kaya met comme facteur final la population brute POP ? Quel biais de raisonnement introduit-elle ainsi? Ne pourrait-on pas mettre un autre facteur final brut? Lequel et de quelle décroissance parlerait-on alors?