# Comprendre l'équation de Kaya

ECOLOGIE

PAR SIMON YASPO
PUBLIÉ LE 26 AOÛT 2022

*Dans la quête aux réductions d'émissions de CO2, on parle régulièrement de différents leviers : démographie, décroissance, sobriété, efficacité énergétique ou encore mix énergétique. Pour comprendre l'impact de chacun de ces termes, il est commode de se servir de l'équation de Kaya. Cette équation, que l'on doit à l'économiste japonais Yoichi Kaya, décompose les émissions de CO2 énergétiques (donc qui proviennent de la consommation d'énergie) selon une formule mathématique qui n'est qu'une tautologie, mais qui donne un axe de lecture intéressant. Dans Environment, Energy, and Economy : strategies for sustainability, il écrit en 1997 que la quantité de CO2 énergétique émise dans l'atmosphère est égale à l'intensité carbone de l'énergie, multipliée par l'intensité énergétique du PIB, multipliée par le PIB par habitant, multiplié par la population.*

$$CO_2 = \frac{CO_2}{NRJ} \cdot \frac{NRJ}{PIB} \cdot \frac{PIB}{POP} \cdot POP$$

La démonstration de cette formule est directe : en partant de $CO_2$=$CO_2$, on multiplie et on divise le membre de droite par le PIB, puis par la quantité d'énergie, puis par la population, soit $CO_2$ = $CO_2$ * PIB/PIB * NRJ/NRJ * POP/POP. Il suffit ensuite de réordonner les termes pour obtenir l'équation proprement dite. Dans cette fiche, nous allons détailler les observations que l'on peut faire à partir de cette formule, tout en étayant ses limites et les questions qu'elle soulève.

### On considère exclusivement le CO2 énergétique

Il convient de repréciser qu'on ne s'intéresse ici qu'aux émissions de $CO_2$ énergétiques, c'est-à-dire qui proviennent de la combustion d'énergies fossiles.

En effet, il existe d'autres gaz à effet de serre (GES). En tenant compte des effets sur 100 ans, le **$CO_2$ représente 75% des émissions de GES** en 2019 selon le GIEC, tandis que le **méthane compte pour 18%** (Le $CH_4$ provient notamment de la digestion des ruminants) et le **protoxyde d'azote pour 4%** des émissions (Le $N_2O$ se forme lors de l'utilisation d'engrais azotés)

Ensuite, tout le $CO_2$ émis ne provient pas des mêmes sources physiques :
- Le charbon, le pétrole et le gaz sont des hydrocarbures qui, lorsqu'ils rentrent en combustion au contact de l'oxygène, libèrent de la vapeur d'eau, de la chaleur et du $CO_2$. **Cette combustion d'énergies fossiles représente 87%** des émissions anthropiques de $CO_2$.
- Le sol et les végétaux sont des puits de carbone, c'est-à-dire qu'ils stockent naturellement du $CO_2$. Lorsqu'on déforeste ou qu'on artificialise des sols, on libère ce $CO_2$ stocké. **Ce changement d'usage des sols contribue à hauteur de 9%** aux émissions anthropiques de $CO_2$.
- Enfin, restent **4% qui proviennent des procédés industriels**. Par exemple, fabriquer du ciment requiert de décarboner du calcaire pour récupérer un oxyde de calcium, et cette réaction chimique produit du $CO_2$.

Au total, le $CO_2$ énergétique constitue 87% des émissions anthropiques de $CO_2$, qui lui-même représente 75% des émissions de GES. L'équation de Kaya ne « **regarde donc que 68% du problème climatique** ».

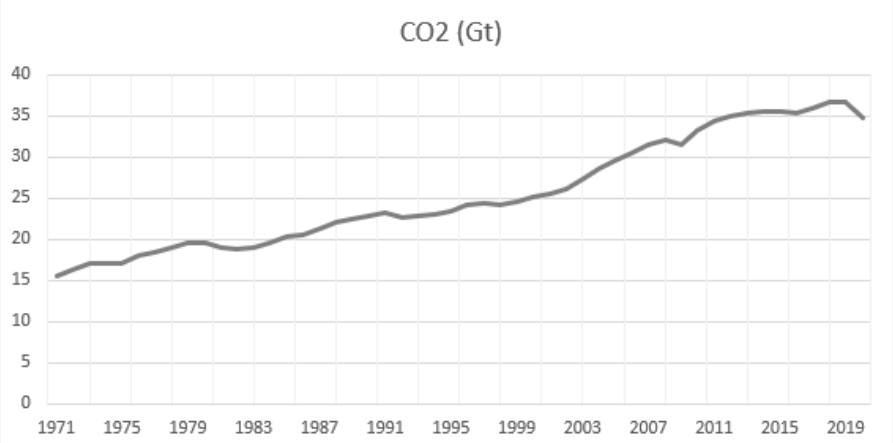
01

## Ce que Kaya nous dit du passé

#### DÉCOMPOSITION DES ÉMISSIONS DE CO2 À L'ÉCHELLE PLANÉTAIRE

L'équation de Kaya propose une grille de lecture pour comprendre les émissions de $CO_2$ énergétiques passées. Le site du Global Carbon Project met à disposition les données de population, de PIB à parité de pouvoir d'achat, de consommation d'énergie et d'émissions de $CO_2$, à différentes échelles et pour plusieurs années.

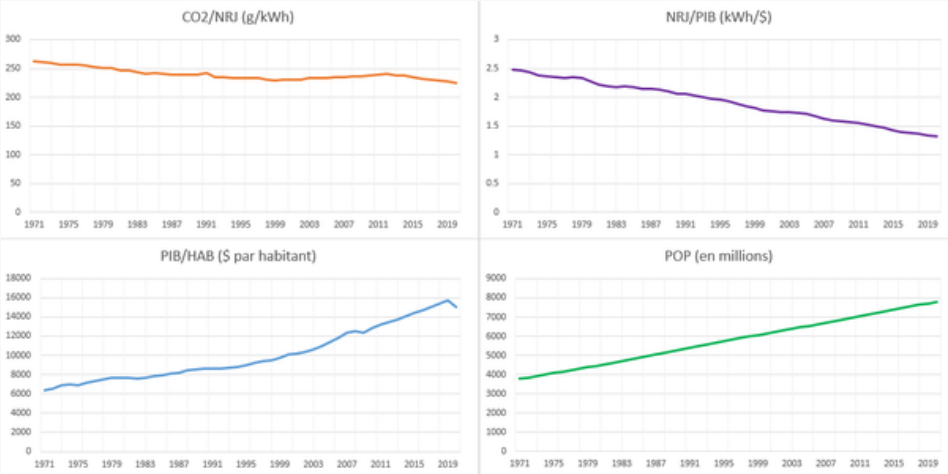
**Emissions mondiales de CO2 énergétique**




SOURCE Global Carbone Project 2021

On voit que les émissions mondiales de $CO_2$ ont fortement augmenté depuis 50 ans, passant de 15 Gt en 1971 à plus de 35 Gt en 2019. Regardons désormais la décomposition de ces émissions sur les facteurs de l'équation de Kaya.

**Contenu carbone de l'énergie, intensité énergétique du PIB, PIB par habitant et population à l'échelle mondiale**




SOURCE Global Carbone Project 2021

Le contenu carbone de l'énergie ($CO_2$/NRJ) n'a que légèrement baissé en 48 ans, passant de 260g/kWh en 1971 à 230g/kWh aujourd'hui, soit une diminution de 11,5% en 50 ans (ce qui équivaut à 0,25% de réduction par an).

L'intensité énergétique du PIB a elle diminué plus rapidement, passant de 2,5 kWh/$ en 1971 à 1,3 kWh/$ en 2019, soit 48% de réduction (donc 1,3% par an), et ce de manière relativement stable.

La population est elle passée de 3,7 milliards en 1971 à 7,8 en 2019, soit une augmentation de 110% (et donc 1,5% par an).

Dans le même temps, le PIB/POP a augmenté de 137% sur la période (soit 1,8% par an).

Ainsi, la baisse de l'intensité énergétique du PIB, combiné à une légère amélioration du contenu carbone de l'énergie n'a pas réussi à absorber la croissance de la population, du PIB/POP et donc *in fine* du PIB total.

Les facteurs de l'équation de Kaya ont évolué avec des taux relativement faibles, et sur une trajectoire stable. Cela traduit l'inertie du système économique, et la difficulté à faire dérailler certaines variables.

## DÉFINITION DU CONTENU CARBONE DE L'ÉNERGIE

Le premier terme de l'équation de Kaya est CO2/NRJ. On appelle ce rapport le contenu carbone (ou intensité carbone) de l'énergie. Il s'agit de la quantité de CO2 émise pour une unité d'énergie produite. Elle est différente selon les sources d'énergie utilisées.

A strictement parler, seules les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) émettent du CO2 au moment de leur combustion.

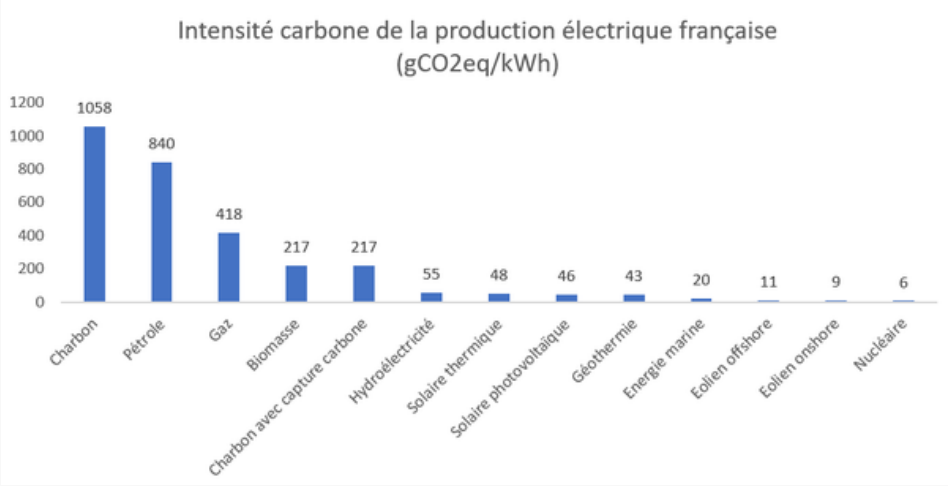
Cependant, quand on réfléchit en tenant compte de l'ensemble du cycle de production / consommation d'une énergie toutes les sources d'énergie génèrent aujourd'hui des émissions.

En effet, l'énergie que nous consommons au quotidien pour nous déplacer, nous chauffer, nous éclairer, alimenter nos machines, cuire nos aliments n'est pas directement disponible dans la nature. Avant d'arriver jusqu'à nous, des sources d'énergie dite primaires doivent être extraites du sous-sol (pétrole, gaz, charbon, uranium, bois) ou du vivant (bois) ou

captées dans la nature (l'énergie du vent, du soleil, la force de la gravité, des marées) puis transformées en énergies utilisables (chaleur, électricité, essence, fioul etc.), et enfin transportée jusqu'aux utilisateurs finaux. On parle alors d'énergie finale.

Quand on mesure le contenu carbone d'une énergie on tient alors compte de l'ensemble du cycle de vie ce qui comprend en particulier toute la partie amont : extraction (pour les combustibles), transport, mise en forme (traitement, raffinage, transformation de l'énergie primaire) et enfin distribution au consommateur final. S'il y a lieu, il faut également tenir compte des émissions générées par la construction (et le démantèlement) des installations de production. C'est notamment le cas pour l'électricité avec la construction des centrales électriques (à gaz, à charbon, nucléaire) ou des panneaux solaires, des éoliennes etc. Enfin, pour les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) il faut également compter les émissions générées par leur combustion lors de leur utilisation par les usagers ou pour produire d'autres sources d'énergie (l'électricité en particulier).

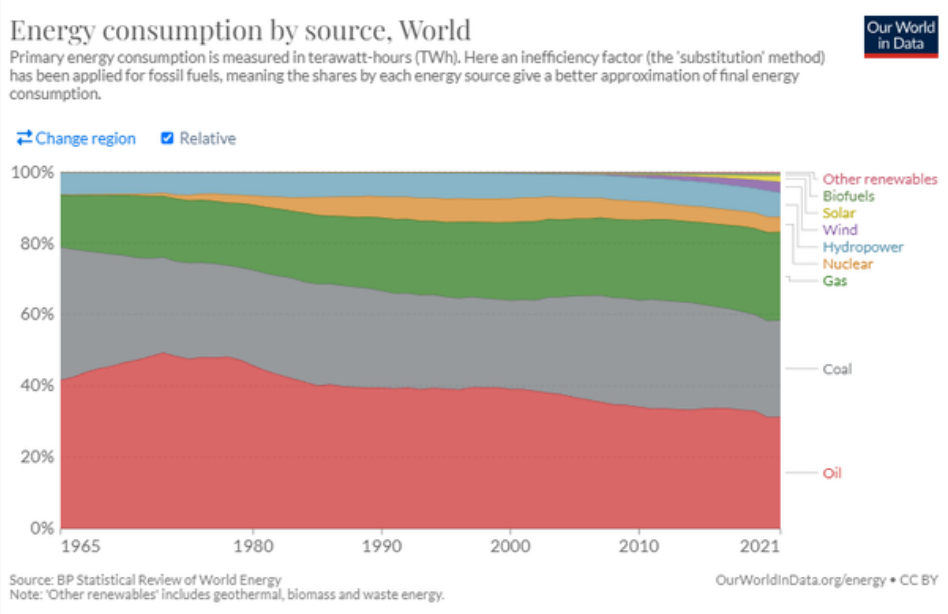
**Intensité carbone de la production électrique française selon les sources d'énergie utilisées.**




SOURCE Base carbone de l'Ademe

Le mix énergétique est la répartition de notre consommation d'énergie sur les différentes sources [1]. Aujourd'hui, le pétrole, le charbon et le gaz dominent à plus de 80% la consommation d'énergie primaire dans le monde.

**Mix énergétique primaire mondial**




SOURCE Our World in Data

En multipliant la part de consommation de chaque source d'énergie avec son contenu carbone, on obtient le contenu carbone moyen d'un mix énergétique (donc le terme $CO_2$/NRJ de l'équation). On peut le diminuer soit en développant des technologies pour limiter le contenu carbone des sources d'énergies prépondérantes en gardant un mix constant [2], soit en augmentant la part des énergies d'ores et déjà bas-carbone dans notre mix.

Or, choisir un mix plus « vertueux » est largement conditionné par la quantité d'énergie totale que l'on souhaite avoir. En effet, les énergies bas-carbone ont un potentiel limité à horizon 2050 : il existe une « rareté de l'énergie verte ». Le potentiel du nucléaire est restreint par la capacité de la filière à construire de nouveaux réacteurs et le potentiel hydraulique est quasiment atteint dans plusieurs pays [3]. Si on ne consommait qu'un dixième de notre consommation énergétique totale, les barrages suffiraient et notre mix serait bas-carbone sans trop d'efforts. A l'inverse, décarboner le mix énergétique tout en augmentant la quantité d'énergie primaire totale est une tâche doublement complexe. Plus la quantité d'énergie consommée est grande, plus il est difficile de la décarboner.

**POUR EN SAVOIR PLUS**

Sur la rareté de l'énergie bas-carbone

Un article d'Alain Grandjean

## DÉFINITION DE L'INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

Le 2ème terme de l'équation de Kaya est NRJ/PIB, qui représente l'intensité énergétique, c'est-à-dire la quantité d'énergie qu'il est nécessaire de produire pour obtenir une unité monétaire. L'économie actuelle a besoin d'énergie pour produire des biens et offrir des services. Cette énergie sert à transformer des matières premières, à amorcer des réactions chimiques, à transporter des objets et des personnes sur de longues distances, et tous ces actes sont indissociables de la création de richesses.

Comme pour le contenu carbone moyen de l'énergie qu'on peut obtenir en multipliant le contenu carbone de chaque type d'énergie avec sa part dans le mix énergétique, l'intensité énergétique globale pourrait s'obtenir en multipliant l'intensité énergétique de chaque secteur économique par son poids dans l'économie, ce qui fait donc apparaître 2 moyens de rendre le PIB proportionnellement plus sobre en énergie : améliorer l'intensité énergétique des secteurs prépondérants, ou privilégier les secteurs peu intenses dans notre économie.

Premièrement, certains secteurs sont intrinsèquement plus énergivores que d'autres : l'industrie chimique, papetière et métallière nécessitent beaucoup d'énergie pour chaque euro « produit », tandis que les services ou l'électronique sont peu demandeurs d'énergie. Généralement, plus la part de main d'œuvre humaine est grande par rapport à l'utilisation de machines, moins le service ou le bien produit sera gourmand en énergie. On peut donc jouer sur l'intensité énergétique d'une économie en priorisant certains secteurs par rapport à d'autre, et plus particulièrement en valorisant les secteurs intenses en « temps humain ».

Deuxièmement, au sein d'un même secteur, on peut aussi jouer sur l'efficacité énergétique des biens ou services associés. De nombreuses politiques existent pour favoriser les produits énergétiquement efficaces, comme l'obligation d'information du consommateur via les étiquette-énergie sur l'électroménager, ou celle de communiquer le DPE (Diagnostic de Performance Energétique [4]) pour un logement. Les acteurs économiques ont aussi intérêt à améliorer eux-mêmes l'efficacité énergétique de leurs procédés et des biens qu'ils vendent, puisqu'une meilleure efficacité implique des coûts énergétiques plus faibles pour l'entreprise. C'est ainsi que l'industrie aéronautique a réussi à multiplier l'efficacité énergétique des avions par 2 depuis 1970.

Enfin, on peut aussi améliorer l'intensité énergétique du PIB par une forme de sobriété, en limitant la consommation d'énergie sur les activités très peu corrélées avec la mesure du PIB. Par exemple, diminuer la température de consigne pour le chauffage d'un logement ou abaisser la vitesse maximale à 110 km/h sur les autoroutes permet de consommer beaucoup moins d'énergie pour un impact limité sur le PIB.

### DÉFINITION DU PIB PAR HABITANT

Le PIB est une mesure de la production nouvellement réalisée sur une année par une économie. C'est un indicateur symbolique (il permet de comparer les puissances entre elles), qui sert d'étalon (on compare souvent les dépenses d'un pays à son PIB), qui est opérationnel (les fonds internationaux sont souvent distribués au prorata du PIB), et politique (le PIB est utilisé pour encadrer la dépense publique).

Le PIB par habitant permet de mesurer le niveau de vie d'un pays et estime la consommation moyenne des ménages au cours d'une année. Sa croissance est souvent recherchée par les politiques publiques, notamment car plus de PIB par habitant est identifiée à un « mieux-être social » ce qui se discute à partir d'un certain niveau (voir ce module sur le PIB).

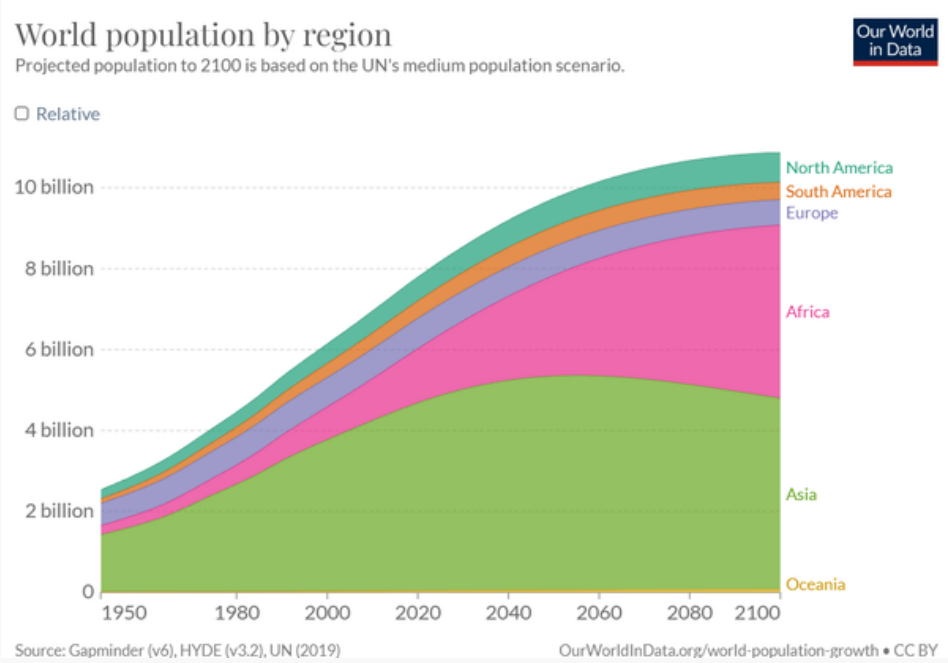
Une des manières de faire baisser le PIB par habitant est d'opter pour de la sobriété, c'est-à-dire de choisir sciemment d'arrêter une partie de la production ou de la consommation en tentant de limiter l'impact sur le bien-être des habitants. On peut par exemple choisir d'interdire la production de voiture de plus de 3 tonnes : on tranche directement dans le PIB, sans pour autant diminuer grandement le confort de vie de la population qui pourra toujours se reporter sur des voitures plus légères. Il convient néanmoins dans ce cas d'empêcher que le budget « voiture » qui a été économisé par un ménage en achetant une plus petite voiture ne se reporte sur d'autres biens et service, nous parlerons de cet « effet rebond » un peu plus bas.

### POPULATION ET DÉMOGRAPHIE

L'humanité compte aujourd'hui 7,7 milliards de personnes. Sur la période 2015-2020, il y a eu en moyenne 140 millions de naissances et 57 millions de morts par an (d'après le World Population Prospects 2019). Le solde démographique net est donc d'environ 80 millions par an. A titre de comparaison, le Covid-19 a tué directement moins de 3 millions de personnes par an depuis son apparition en février 2020 selon l'OMS.

La démographie est très inertielle et son évolution est quasiment fixée pour les 30 prochaines années, on ne peut que très marginalement contrôler son évolution. Selon l'ONU, nous devrions être près de 10 milliards d'humain en 2050.

**Projection de la démographie selon les régions du monde d'après l'ONU**




SOURCE Our World in Data

Ce dernier paramètre est le seul qui soit extensif. L'équation de Kaya fait le choix de décomposer les émissions de $CO_2$ sur des paramètres intensifs (l'intensité énergétique du PIB, le contenu carbone de l'énergie et le PIB par habitant) et sur un paramètre extensif : la population. On fait donc directement dépendre les émissions de $CO_2$ énergétique de la taille de la population, modulo nos choix de société et notre potentiel de progrès technologique.

02

## Ce que nous dit Kaya du futur

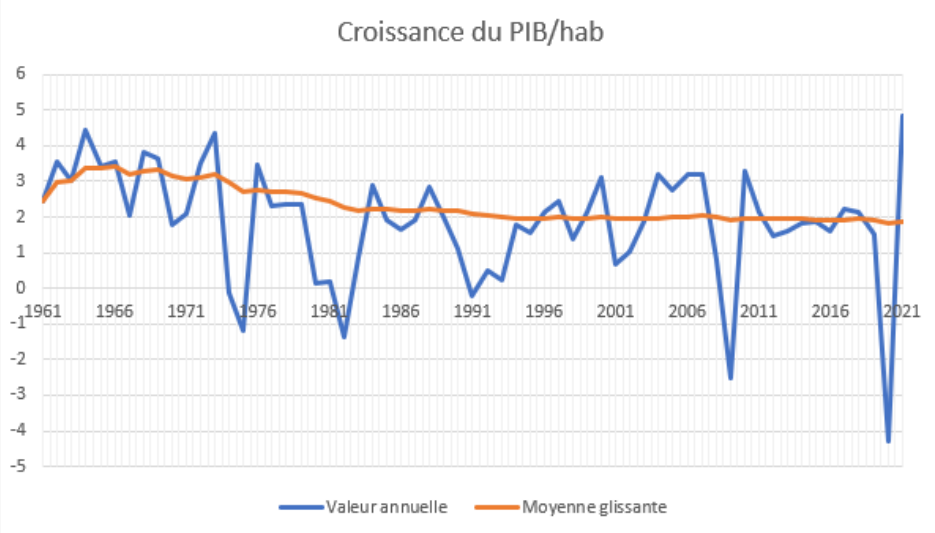
### COMMENT FAIRE POUR LIMITER LE RÉCHAUFFEMENT À 2°C

Pour espérer rester sous la barre des 2°C de réchauffement global, le GIEC nous dit qu'il faut réduire d'environ 5% par an nos émissions de GES jusqu'à 2050, soit une division par 4 au total.

Dans le même temps, l'ONU estime que la population mondiale augmentera d'environ 0,7% par an pour atteindre 10 milliards d'habitants en 2050, soit 25% d'augmentation au total.

Le PIB/POP croît d'à-peu-près 2% par an depuis quelques années, hors période de crises (surprimes ou covid-19). Supposons que cette tendance se poursuive : sur les 28 années qui nous séparent de 2050, cela ferait 74% d'augmentation.

**Croissance du PIB/hab à l'échelle monde**




SOURCE Banque mondiale

A ce stade, le membre de gauche de l'équation de Kaya augmente de 5% par an tandis que celui de droite augmente de 2.71%. Il faut donc une diminution du $CO_2$/PIB de 7,5% par an pour y arriver. En répartissant cet objectif équitablement sur le contenu carbone de l'énergie ($CO_2$/NRJ) et l'intensité énergétique du PIB (NRJ/PIB), cela demande de réduire ces termes de 3,8% chacun, tous les ans.

Pour rappel, nous avons réussi à diminuer l'intensité énergétique du PIB de 1,3% par an sur les 50 dernières années, et le contenu carbone de 0,25%. Passer de 1,3% à 3,8% (et *a fortiori* de 0,25% à 3,8%) est un objectif très ambitieux et demande un changement de rythme conséquent.

Si nous n'y arrivons pas, nous avons le choix entre : faire face aux conséquences désastreuses du dérèglement climatique, ou jouer sur les autres facteurs (comme personne ne souhaite organiser de génocide et que la démographie est très inertielle, il ne reste que le PIB par habitant).

Refuser d'abandonner la croissance du PIB, c'est implicitement faire le pari que nous allons atteindre un objectif très loin de ce que nous avons su faire pendant les 50 dernières années.

## SCÉNARIOS DE L'AIE

L'Agence Internationale de l'Energie propose, dans son *World Energy Outlook*, des prévisions énergétiques pour les années à venir. Ces dernières font référence dans le monde entier et donnent une trajectoire de décarbonation à l'horizon 2050. Les scénarios énergie-climat font intervenir un grand nombre de variables physiques et socio-économiques. Certaines de ces variables sont structurantes, et on doit leur porter une attention particulière si l'on veut tester la vraisemblance d'un scénario.

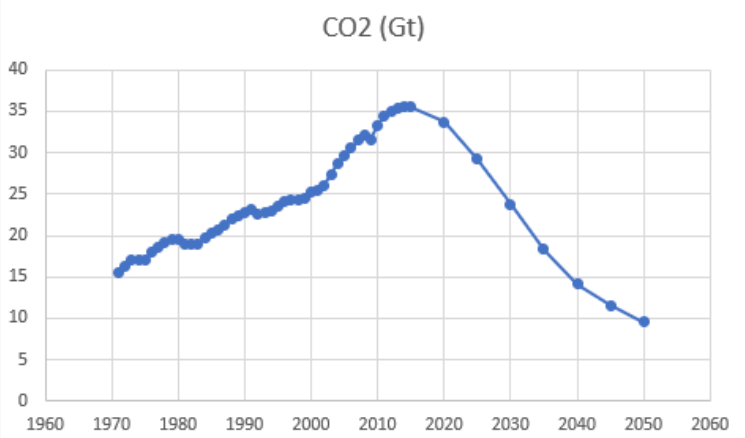
### L'Agence Internationale de l'Energie

L'Agence Internationale de l'Energie (AIE, ou IEA en anglais pour *International Energy Agency*) est une organisation internationale fondée par l'OCDE en 1974. Elle a été créée en réponse au choc pétrolier de 1973 avec pour mission de sécuriser, superviser et coordonner l'approvisionnement de pétrole. Aujourd'hui, l'AIE propose des analyses, prévisions et des données concernant la production et la consommation d'énergie. Les travaux de l'AIE intègrent de plus en plus les enjeux climatiques et la nécessité d'une transition énergétique.

Le *World Energy Outlook* (WEO) est une famille de scénarios, publiée chaque année, et qui fait référence dans le monde. Les scénarios sont construits à l'aide du *World Energy Model* (WEM), qui utilise des données exogènes (le PIB, la démographie etc...) et calcul un équilibre d'offre et de demande énergétique pour produire une projection de données endogènes (la part des énergies renouvelables, la consommation totale d'énergie etc...). Le WEO 2017 intègre pour la première fois un scénario « durable » qui a comme contrainte de limiter le réchauffement à 2°C.

On peut récupérer les données du scénario World Energy Outlook et les comparer aux données historiques en les décomposant sur l'équation de Kaya.

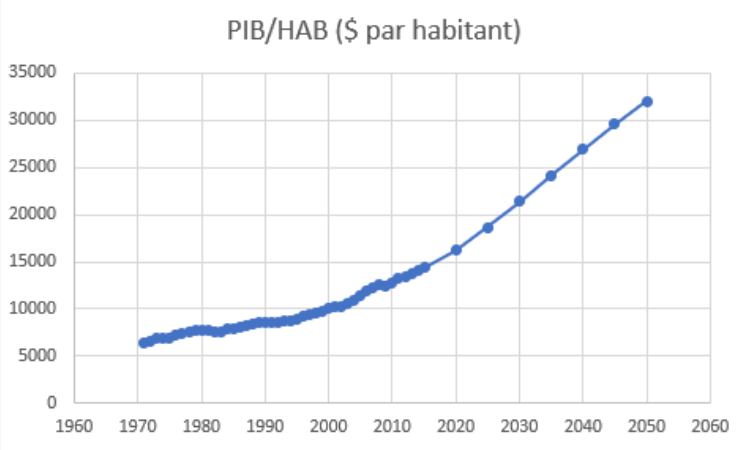
**Historique et projection des émissions de CO2 selon le scénario du WEO**




SOURCE Données du scénario World Energy Outlook et Global Carbone Project 2021

Le scénario de l'AIE suppose une diminution très rapide des émissions de $CO_2$, qui rompt totalement avec la tendance actuelle. L'AIE fait aussi la supposition que le PIB/POP va croître fortement. Ce vœu, peut-être souhaitable, implique une diminution extrêmement forte du contenu carbone du PIB.

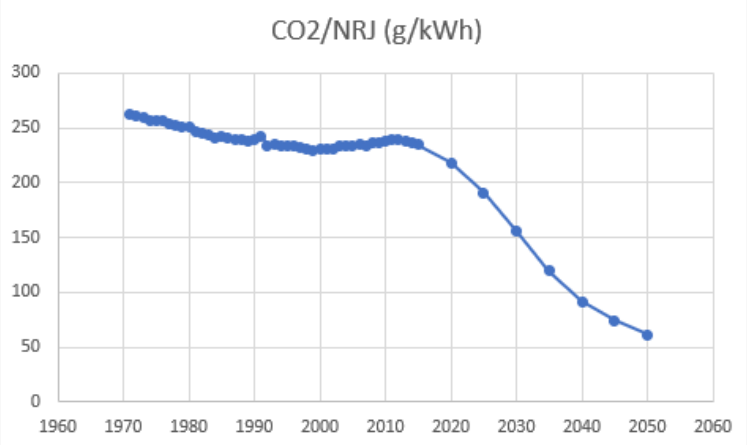
**Historique et projections du PIB par habitant selon le scénario du WEO**

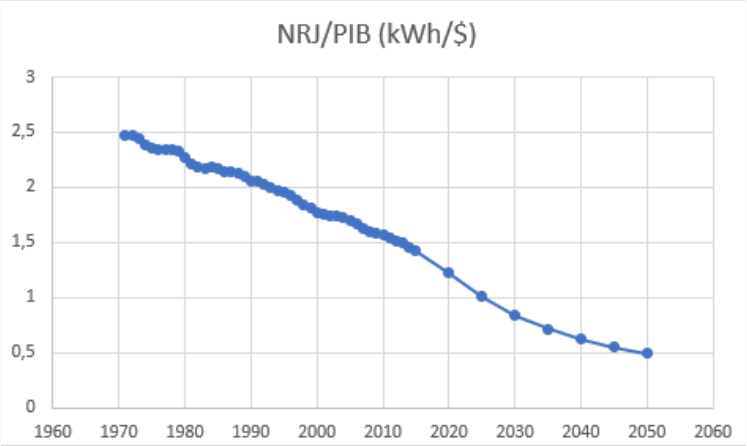



SOURCE Données du scénario World Energy Outlook et Global Carbone Project 2021

Cela se traduit d'une part sur le contenu carbone de l'énergie, qui décroît dans ce scénario à une vitesse jamais connue par le passé, et sur l'intensité énergétique du PIB, qui doit décroître plus fortement qu'elle ne le fait déjà. Ces ruptures de pentes entre ce qu'on observe historiquement et ce qui doit advenir pour supporter une « croissance verte » fait peser sur ce scénario une certaine invraisemblance. Le cas de l'AIE n'est pas isolé : de nombreux autres scénarios produits par diverses instances supposent une croissance forte du PIB, de même qu'une baisse drastique des émissions de $CO_2$. Cela implique mathématiquement des hypothèses invérifiées sur la vitesse de décarbonation du PIB, qui ne sont pour l'instant pas corroborées par l'histoire.

**Historique et projections du contenu carbone de l'énergie et de l'intensité énergétique selon le scénario du WEO**




SOURCE Données du scénario World Energy Outlook et Global Carbone Project 2021

**POUR EN SAVOIR PLUS**

Sur les scénarios énergie-climat

**le rapport « Scénarios Energie-Climat » de The Shift Project**

## DANGER DES MÉTRIQUES RELATIVES

L'équation de Kaya a le mérite de montrer qu'il faut jouer sur tous les termes de l'équation pour espérer diminuer les émissions énergétiques de $CO_2$. Décarboner son mix énergétique ou améliorer l'efficacité énergétique des procédés industriels ne nous sauvera pas si le PIB continue son ascension.

Il est donc dangereux de ne communiquer qu'autour des mesures relatives de décarbonation : la Terre n'a que faire du pourcentage d'énergies renouvelables dans notre mix, ce qui l'intéresse est la quantité d'énergies fossiles que l'on consomme et le $CO_2$ émis en contrepartie.

Cette observation relativement simple se heurte très fréquemment aux communications RSE d'un grand nombre d'entreprises. Par exemple, le « Sutainability & Climate Progress 2022 Report » de Total indique que la part des renouvelables dans leurs ventes énergétiques sera de 15% en 2030, contre 5% en 2020. Dans le même temps, Total prévoit aussi une

augmentation des ventes de pétrole et de gaz d'ici 2030. Les 2 informations ne sont pas incompatibles. Seulement, la mesure relative qu'est le mix énergétique de vente de Total cache la réalité physique : Total compte en réalité vendre plus d'énergies fossiles en 2030 qu'en 2020.

03

## Kaya dans différents secteurs

### KAYA DANS LES TRANSPORTS

L'équation de Kaya présente l'intérêt de pouvoir s'appliquer à un secteur particulier, à condition qu'on adapte la méthodologie aux spécificités du périmètre étudié.

**Equation de Kaya appliquée aux transports**

SOURCE Rapport de Carbone4

Sans rentrer dans les détails du calcul, l'équation de Kaya des transports permet de décomposer les émissions de $CO_2$ du secteur selon : le trafic total, les modes de transport (c'est-à-dire la répartition de la demande sur chaque mode de transport : voiture, avion vélo etc...), le taux de remplissage (le nombre de voyageur par véhicule), l'efficacité énergétique (la quantité d'énergie consommée pour déplacer un poids sur une distance), et l'intensité carbone de l'énergie (la masse de $CO_2$ émise par quantité d'énergie consommée par chaque mode).

L'avantage de cette formulation est de mettre en lumière les différents leviers qui permettent de réduire les émissions de $CO_2$ du transport, tout en étant clair sur les impacts possibles de chacun. Par exemple, un gain d'efficacité énergétique de 10% sur un mode de transport qui représente 80% des usages est largement préférable à un gain de 50% sur un mode de transport qui ne représente que 5% des usages.

Cette décomposition permet aussi de comprendre *a posteriori* ce qui a structuré l'évolution des émissions de $CO_2$ des transports, et nous dit donc sur quoi agir en premier.

**Variations des émissions des transports décomposés sur différents facteurs**

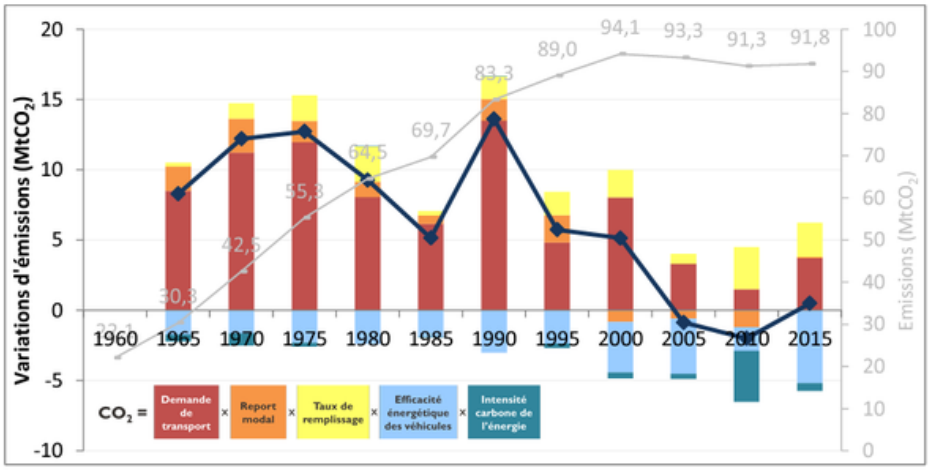



Figure 13 : Décomposition additive de l'évolution des émissions de $CO_2$ du transport de voyageurs de 1960 à 2015 (courbe grisée pour les émissions sur la période, leur variation tous les 5 ans en bleu marine)

SOURCE Les transports face au défi de la transition énergétique, thèse d'Aurélien Bigo (2020)

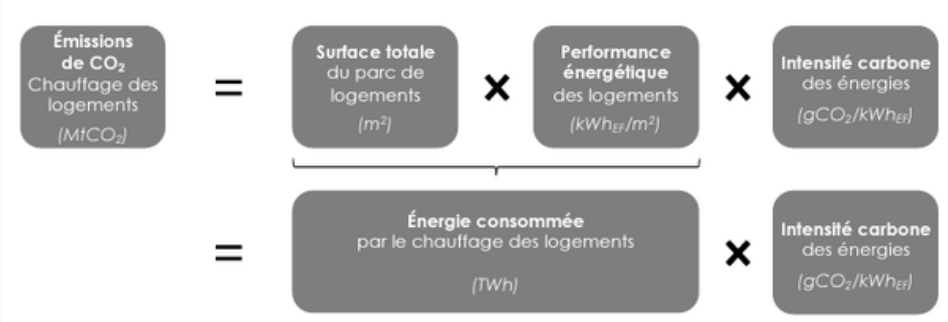
**POUR EN SAVOIR PLUS**

Sur Kaya dans les transports

- Les transports face au défi de la transition énergétique, thèse d'Aurélien Bigo (2020)
- La partie « Transport » du rapport « L'État français se donne-t-il les moyens de son ambition climat ? » de Carbone4
- Transport emissions trends in the EU, Enerdata (2022)

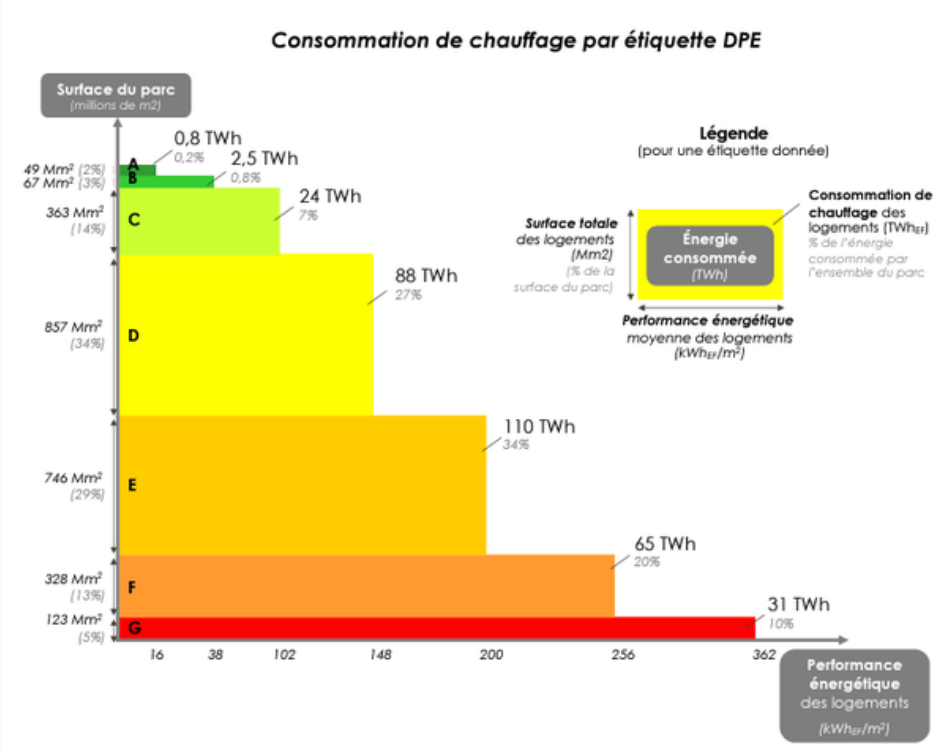
## KAYA DANS LE LOGEMENT

Le secteur des logements peut aussi faire l'objet d'une approche « Kaya ». On décompose alors les émissions liées au chauffage sur la surface à chauffée, la quantité d'énergie nécessaire par m² de surface et l'intensité carbone de l'énergie consommée. On pourrait même aller un cran plus loin et décomposer la performance énergétique du logement sur les performances d'isolation et la température de consigne du logement.



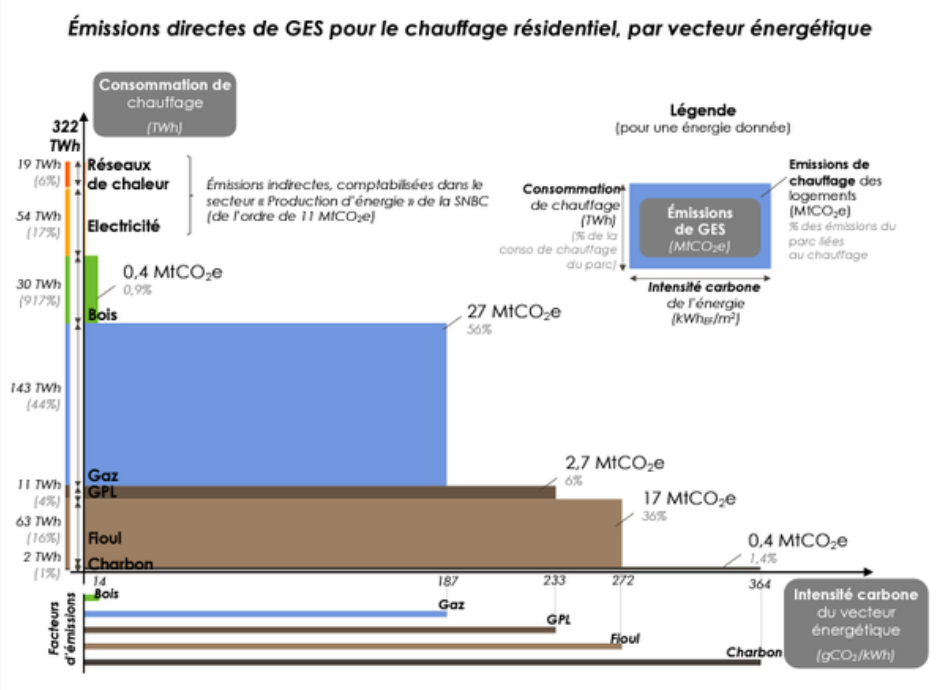

SOURCE L'État français se donne-t-il les moyens de son ambition climat ?, Carbone4

La quantité d'énergie consommée, produit de la surface par la performance énergétique, peut d'ailleurs se représenter en fonction de l'étiquette DPE [4]. Cette représentation met clairement en évidence les catégories de logements qui consomment le plus d'énergie, soit parce qu'ils sont peu isolés, soit parce que leur classe énergétique est fortement représentée dans la totalité des logements.




SOURCE L'État français se donne-t-il les moyens de son ambition climat ?, Carbone4

Le même exercice peut être fait en représentant cette fois-ci directement les émissions totales de GES selon le type de vecteur énergétique pour chauffer les logements, et la quantité totale d'énergie consommée par classe de vecteur (qui dépend donc de la performance énergétique pondérée par la surface).




SOURCE L'État français se donne-t-il les moyens de son ambition climat ?, Carbone4

## POUR EN SAVOIR PLUS

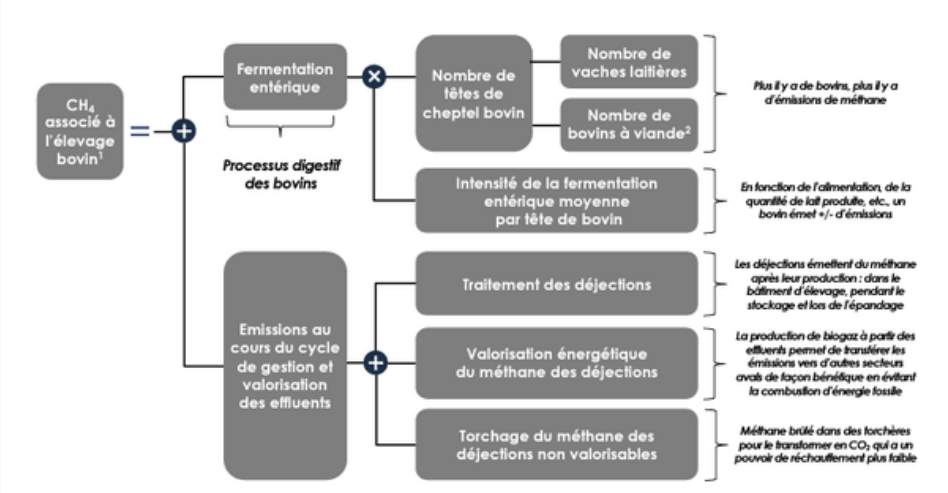
Sur Kaya dans le logement

La partie « Logement » du rapport « L'État français se donne-t-il les moyens de son ambition climat ? » de Carbone4

## KAYA DANS L'AGRICULTURE

Décomposer les émissions de méthane de l'agriculture selon une approche « Kaya » est toujours possible mais un peu moins direct.

Le $CH_4$ bovin provient de différentes sources qui agissent en parallèle. Le méthane est émis par la digestion des vaches laitières et des bovins à viande, mais aussi via le stockage et l'épandage des déjections. Il faut aussi tenir compte du méthane « torché » (c'est-à-dire brûlé sur l'exploitation agricole) et transformé en $CO_2$, et retrancher le méthane produit et vendu à d'autres secteurs qui l'utilisent comme biogaz en remplacement d'une énergie fossile.




SOURCE L'État français se donne-t-il les moyens de son ambition climat ?, Carbone4

**POUR EN SAVOIR PLUS**

Sur Kaya dans l'agriculture

La partie « Agriculture » du rapport « L'État français se donne-t-il les moyens de son ambition climat ? » de Carbone4

04

## Les limites de Kaya

### DÉPENDANCE DES FACTEURS

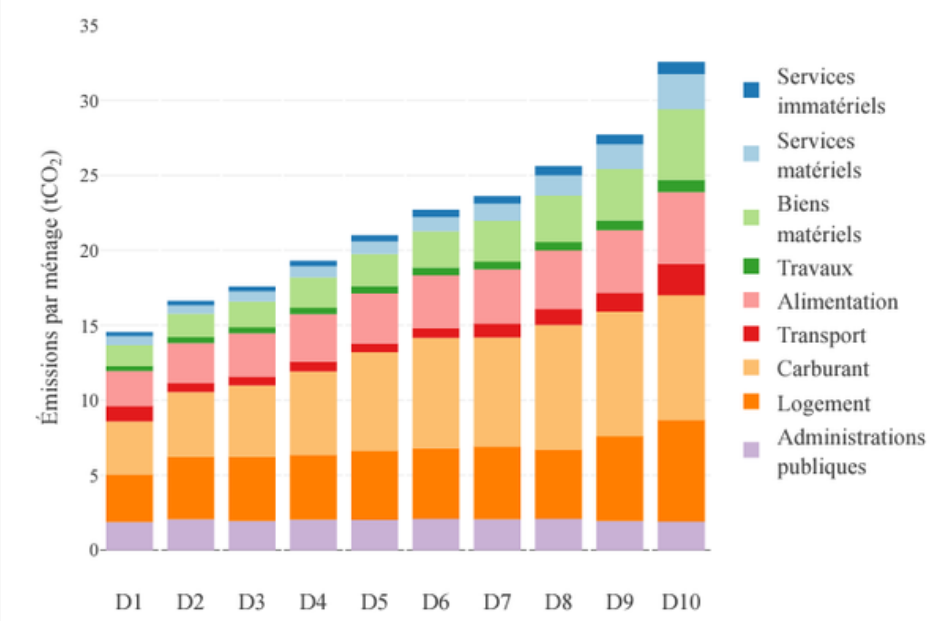
La première limite de Kaya est l'apparente indépendance des facteurs. L'équation donne l'impression de décomposer les émissions de $CO_2$ sur des leviers qu'on peut contrôler séparément. Or, ça n'est absolument pas le cas et il existe de multiples contre-exemples.

Nous l'avons vu plus haut, espérer augmenter la quantité totale d'énergie consommée tout en gardant le contenu carbone de celle-ci constante, voire la faire diminuer, n'est pas aisée. Il existe une rareté de l'énergie bas carbone qui la rend davantage inaccessible à mesure qu'on épuise les sources « faciles » à portée de main comme les barrages ou les centrales nucléaires existantes.

Concernant la démographie, ce sont principalement les riches qui émettent le plus de $CO_2$ aujourd'hui. Limiter la démographie dans les pays en développement fera certes diminuer POP, mais PIB/POP augmentera de quasiment autant.

En France par exemple, les émissions par ménage varient du simple au double selon le décile du niveau de vie dans lequel on se trouve. Ainsi les ménages appartenant au 10% les plus pauvres émettent moins de 15t de $CO_2$ par an lorsque les ménages appartenant aux 10% les plus riches émettent 32t par an.

**Emissions moyennes des ménages français en fonction du décile des revenus**




**SOURCE** Qui émet du CO2 ? Panorama critique des inégalités écologiques en France, Revue de l'OFCE (2020)

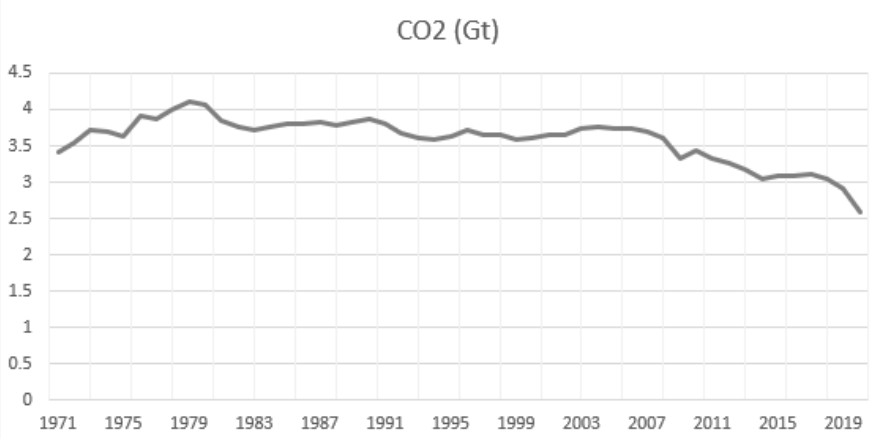
Enfin, améliorer l'intensité énergétique du PIB peut conduire à un rebond du PIB, c'est ce qu'on appelle l'effet rebond. Ce dernier se produit lorsque les gains de consommation énergétique sont moins que proportionnels aux gains d'efficacité individuels. Par exemple, les ampoules n'ont cessé de consommer moins d'énergie pour chaque produit lumen [5]. Or, ce gain d'efficacité énergétique a rendu possible la diffusion des ampoules dans tous les ménages, l'éclairage public et l'absence de scrupule lorsqu'on quitte une pièce sans éteindre la lumière. L'effet rebond est largement expliqué dans cette fiche mais il faut retenir qu'améliorer l'efficacité énergétique de nos procédés industriels ne conduira pas nécessairement à la diminution de la consommation énergétique de ces derniers. De même, si la législation contraint la production d'énergie par une taxe ou des quotas sur les émissions de $CO_2$, la diminution du contenu carbone de l'énergie pourra très bien conduire à un rebond sur la consommation totale d'énergie.

### ATTENTION AU PÉRIMÈTRE D'ANALYSE

L'équation de Kaya peut aussi s'appliquer à un périmètre géographique restreint. Les données de $CO_2$, PIB, NRJ et POP à l'échelle de différents pays sont disponibles ici. Nous pouvons ainsi décomposer les émissions européennes de $CO_2$ sur les facteurs de Kaya.

Le $CO_2$ énergétique émis par l'Europe diminue depuis une vingtaine d'année, passant d'un peu plus de 3.5 Gt en 2000 à presque 3 Gt en 2018.

**Emissions de CO2 énergétiques à l'échelle européenne**

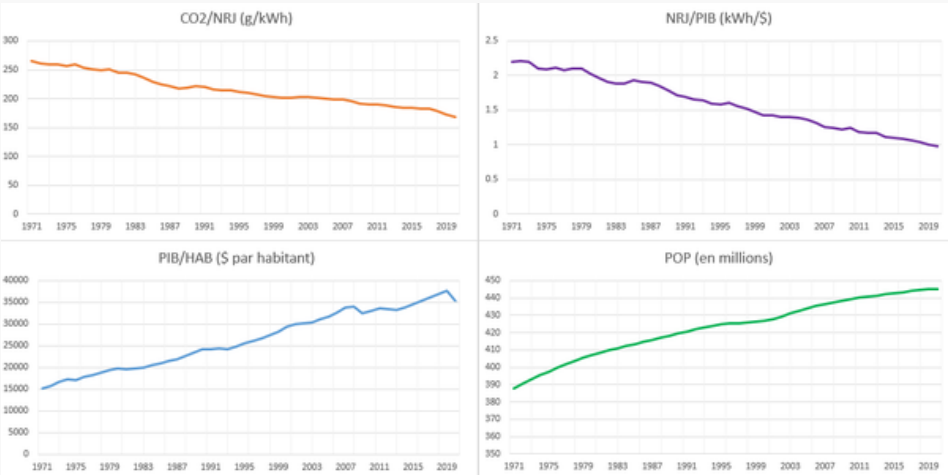



SOURCE Global Carbone Project 2021

Cette diminution s'explique par la baisse du contenu carbone de l'énergie, passant de 200g/kWh en 2000 à 170g/kWh en 2018, mais surtout par la baisse de l'intensité énergétique du PIB européen, passant de 1.5 kWh/$ à seulement 1 kWh/$.

A l'inverse, la démographie, toujours à la hausse, et la croissance du PIB par habitant ont freiné la baisse des émissions carbone.

**Contenu carbone de l'énergie, intensité énergétique du PIB, PIB par habitant et population de l'Europe**




SOURCE Global Carbone Project 2021

Le cas de l'Europe est certes encourageant, mais il ne constitue pas une preuve qu'il est possible de marier diminution des émissions de $CO_2$ et croissance du PIB. Tout d'abord, les émissions de $CO_2$ sont toujours à un niveau beaucoup trop élevé pour limiter le dérèglement climatique. Mais surtout, la baisse de l'intensité énergétique du PIB s'explique en partie par les délocalisations progressives hors d'Europe des activités industrielles, consommatrices d'énergie et pollueuses. Notre cas s'est amélioré au détriment de celui des autres. La Chine, l'Inde ou encore le Brésil ont par exemple des intensités énergétiques bien plus fortes que celle de l'Europe.

### ELLE DONNE UNE VISION POLITIQUE

Enfin, il ne s'agit certes que d'une équation, mais d'une équation qui donne une vision politique.

$$I = P \cdot A \cdot T$$

IPAT est une autre équation dont s'est probablement inspiré Kaya, mais elle s'étend à toute forme de dommages environnementaux : Impact = Population * Affluence * Technology. « Affluence », c'est la richesse par personne, et « Technology», c'est le dommage causé par la fabrication d'une unité de richesse (chez Kaya, c'est le produit de l'efficacité énergétique et du contenu carbone de l'énergie, soit le contenu carbone du PIB).

Le problème, selon Donella Meadows qui s'exprime dans ce court article, est que l'équation désigne des coupables de l'impact environnemental : les pays en développement qui ne peuvent pas contrôler leurs démographie (via le P), les pays occidentaux qui consomment sans limite (via le A) et les pays producteurs qui tournent au charbon (via le T). Or, selon elle, rien ne dit que ce sont les bons coupables : la consommation, la technologie et la démographie n'évoluent pas magiquement. Il y a des acteurs qui les influencent et en tirent des profits.

L'équation de Kaya n'est qu'une vision, une façon de voir les émissions énergétiques de $CO_2$. Elle ne fait ni apparaître la consommation des riches et les besoins primaires, ni les trajets en jet privé et les déplacements pour travailler, ni les luxueuses villas et les HLM chauffés au gaz.

**POUR EN SAVOIR PLUS**

Sur l'équation de Kaya

- Qu'est ce que l'équation de Kaya, Jean-Marc Jancovici
- Une conférence qui aborde l'équation de Kaya

**Merci de nous avoir lus jusqu'au bout !**
**Si vous appréciez le contenu de The Other Economy, inscrivez-vous à notre newsletter.**

Vos données ne seront jamais ni données, ni prêtées, ni vendues à des tiers

S'INSCRIRE À LA NEWSLETTER

# Notes

5 Le lumen est une unité du système international qui permet de mesurer un flux lumineux dans un angle solide : c'est une sorte de quantité de lumière.
Retour

4 Le diagnostic de performance énergétique (DPE) renseigne sur la performance énergétique d'un logement ou d'un bâtiment (étiquettes A pour les plus isolants à G pour les moins isolants), en évaluant sa consommation d'énergie et son impact en terme d'émissions de gaz à effet de serre. Le DPE doit être présenté lors de la vente ou de la location des logements et des bâtiments tertiaires. La mise en location des logements classés G, F et E, familièrement qualifiés de « passoires thermiques », sera interdite respectivement à partir de 2025 (classe G), 2028 (classe F) et 2034 (classe E). Depuis 2022, les logements de classes F et G font également l'objet d'un gel des loyers.
Retour

3 La France exploite 90% du potentiel hydraulique économiquement viable, voir https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan electrique 2020_0.pdf
Retour

2 Le captage stockage de CO2 est souvent mis en avant comme une solution incontournable (il est pris en considération dans les scénarios compatibles avec l'accord de Paris). Cette technologie n'est cependant pas encore déployée au niveau industriel pour les volumes envisagés.
Retour

1 Attention, il convient de ne pas confondre le mix énergétique (qui regroupe toutes les sources d'énergie) avec le mix électrique (qui ne concerne que les sources d'énergie qui permettent de produire de l'électricité).
Retour