

Les leviers de réduction des émissions



Table des matières

Objectifs	4
1. Le budget carbone	5
1.1 Les scénarios d'émission	5
1.2 Changer de trajectoire	5
2. État des lieux : les secteurs d'émission	7
1. Répartition par secteur	7
2. La production d'énergie	7
3. La production d'énergie : le pétrole	8
4. La production d'énergie : l'électricité et l'hydrogène	8
3. La réduction des émissions de GES : quels leviers actionner ?	9
1. Est-il possible de réduire nos émissions de gaz à effet de serre ?	9
2. Résumé	9
4. La transition énergétique	10
1. Les énergies de substitution	10
2. Les défis de l'éolien et du solaire	11
3. Substitution ou addition ?	12
5. L'amélioration des rendements	15
1. La fausse bonne idée ?	15
2. L'effet rebond	15
3. Exercice : 5.3 Exercice d'application : l'incitation par les prix	16
4. Résumé	16
6. L'usage des sols	18
1. Satisfaire des besoins alimentaires exponentiels	18
2. L'industrialisation de l'agriculture	18
3. Élevage, déboisement, transformation des sols	19
4. Résumé	19
7. L'économie verte, ou comment agir sur la consommation ?	21
1. Agir sur la demande	21

2. Application : le cas de l'élevage et des régimes végétariens	21
3. Application : le cas de l'élevage et des régimes végétariens (suite)	22
4. Transformer la société	22
Conclusion	23
Bravo ! Vous avez terminé la leçon.	24
Solutions des exercices	25
Glossaire	26

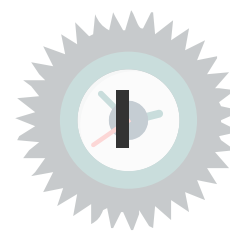
Objectifs



À l'issue de ce cours, vous serez capables de :

- Donner la part de l'agriculture, foresterie et autres usages des sols dans les émissions totales ; celle de la production d'électricité et de chaleur ; celle des transports ; celle de la production industrielle hors électricité
- Identifier les cinq leviers possibles par lesquels on peut réduire les émissions de carbone le long de la chaîne de production
- Nommer les sources d'énergie alternatives aux énergies fossiles, leurs avantages et leurs limites respectives
- Décrire l'effet historique de la découverte d'une nouvelle source d'énergie sur l'usage des existantes
- Expliquer pourquoi les rendements de production agricole ont pu augmenter alors que les rendements énergétiques baissaient
- Donner trois avantages distincts de la réduction de la consommation de viande
- Donner un exemple illustrant la complémentarité entre choix individuels et choix collectifs dans les modes de consommation

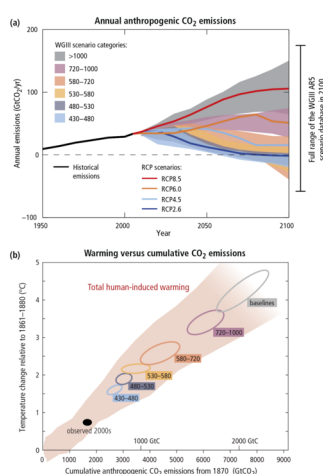
1. Le budget carbone



1.1 Les scénarios d'émission

L'accord de Paris de 2015 fixe comme objectif de contenir d'ici à 2100 le réchauffement climatique « nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et de poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5°C ».

C'est le moment de rappeler les quatre scénarios d'émission du GIEC :



1.2 Changer de trajectoire

Une manière simpliste, mais efficace, de se rappeler ces contraintes est de raisonner en budget carbone. Pour avoir deux chances sur trois de tenir les objectifs de l'accord de Paris, c'est-à-dire de maintenir l'augmentation des températures moyennes en dessous de 2°C, il faudrait que les émissions d'origine humaine accumulées depuis 1870 soient inférieures à 2 900 milliards de tonnes de carbone. Nous en sommes à 2 260 en 2020, ce qui signifie qu'il nous reste un budget carbone global de 640 milliards de tonnes pour tenir jusqu'en 2100. Si l'on continue sur le rythme actuel de 40 par an, ce budget sera épuisé en 2036.

Notez qu'en outre, la quantité de carbone présente dans les combustibles fossiles est beaucoup plus élevée, ce qui veut dire qu'on ne pourra pas compter sur la nature pour nous restreindre, en tout cas en ce qui concerne le charbon. Si l'on veut respecter l'objectif des 2°C, il faudra laisser dans le sol 80 % du charbon qu'il contient encore ! La question est donc d'adopter volontairement une nouvelle stratégie, qui puisse nous placer sur une nouvelle trajectoire climatique.

Vous pouvez penser que c'est totalement irréaliste, et vous demander pourquoi le GIEC envisage sérieusement des scénarios à 2°C, et pourquoi les gouvernements continuent à affirmer cet objectif alors que le scénario « Business as usual » en est si loin.

C'est que le GIEC intègre dans ses scénarios des émissions négatives, c'est-à-dire en fait des absorptions ou des extractions de CO₂ ! L'idée est que les progrès techniques permettront de supprimer les émissions industrielles de GES en installant des capteurs à la sortie des cheminées et en stockant le carbone sous une forme ou sous une autre. On envisage aussi d'extraire directement le CO₂ de l'atmosphère, par exemple en plantant systématiquement des forêts. Il faut bien dire qu'à l'heure

actuelle, ni la solution « technique » ni la solution « biologique » ne sont bien avancées : capter le carbone est coûteux, le stocker est difficile, et il ne reste pas beaucoup de place pour planter des forêts ! Ce serait déjà bien beau de préserver celles qui existent...

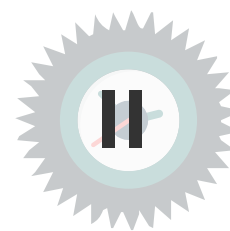
Plutôt que de discuter les solutions qui essaient de régler le problème en bout de chaîne, on va donc se concentrer dans cette leçon sur l'amont. D'où viennent les émissions ? Est-il possible de les réduire, voire de les supprimer intégralement ?



Fondamental

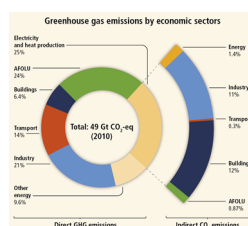
- Si l'on continue sur le rythme actuel d'émissions annuelles, le budget permis pour respecter les Accords de Paris sera épuisé en 2036.
- À un tel horizon, on ne pourra pas compter sur l'épuisement des réserves d'énergies fossiles pour changer de trajectoire, ni vraisemblablement sur les techniques de captation de carbone déployées à suffisamment grande échelle.

2. État des lieux : les secteurs d'émission



2.1 Répartition par secteur

Voici, extraite du rapport 2014 du GIEC, la répartition des émissions de GES par secteur d'activité. Tous les GES sont inclus, mais la somme est exprimée en *équivalent CO₂**.



Quels sont les 2 secteurs qui émettent le plus ?

(1) **Le sigle AFOLU** signifie Agriculture, Forestry and Other Land Use. Il comprend l'agriculture, culture d'une part, élevage d'autre part, gros émetteurs l'un et l'autre et nous allons mieux comprendre pourquoi dans la suite de la leçon. Il comprend aussi la déforestation et l'utilisation des terres agricoles à d'autres fins, qui suppriment des puits de carbone. L'ensemble représente un quart des émissions de GES.

(2) **La production de chaleur ou de froid.** Chauffage et climatisation sont répertoriés dans les secteurs « buildings », suivant qu'ils sont ou non électriques. Malheureusement le graphique ne sépare pas les différents usages de l'électricité, mais on voit bien que 10 % au moins des émissions de GES proviennent du chauffage ou de la climatisation, d'où l'intérêt d'isoler les bâtiments.

Et que signifie le secteur « Other energy » ?

2.2 La production d'énergie

Nous voyons apparaître un secteur un peu mystérieux, responsable de 10 % des émissions : le secteur « other energy ». Vérification faite, il s'agit de « la production d'énergie, hors électricité ». La production d'énergie ? Est-ce qu'on ne vient pas de voir que l'énergie ne se produit pas, elle se transforme ?

Eh bien justement, il faut souvent la transformer. Les énergies que nous puisons dans la nature sont des énergies primaires, et ne peuvent pas toujours être utilisées directement. Ce n'est pas du pétrole que l'on met dans les moteurs, c'est de l'essence, du diesel, du fuel ou du kérosène. L'énergie à la source est appelée **primaire**. L'énergie mise à disposition de l'utilisateur est appelée **finale**. Entre les deux, il y a une industrie, qui peut être très importante : dans les économies modernes, elle représente en gros 7 % du PIB.

2.3 La production d'énergie : le pétrole

(1) **Le pétrole** est une énergie primaire. Entre lui et le plein à la pompe, il y a l'industrie pétrolière, qui se charge de la prospection, de l'extraction, du raffinage et de la distribution.

Activité

Ces mots vous semblent sans doute un peu abstraits. Alors arrêtons-nous une minute pour mettre des images sur ces industries, qui vous donnent une idée de leurs dimensions, de leur puissance.

Pour cela, suivez les pas du photographe Edward Burtynski en allant sur ce site¹ et retrouvez :

1. Une photo d'une exploitation de gaz de schiste en Alberta,
2. Une photo d'une station de pétrole off-shore (c'est-à-dire en mer) en Azerbaïdjan,
3. Une photo de raffinerie au Texas,
4. Une photo avec un signe McDonald's,
5. Une photo avec un mot d'amour pour Dana.

Quelles impressions vous font ces photos ? Comment l'artiste explique avoir voulu associer des photos de sites industriels à des photos de voitures ou de rallyes ?

2.4 La production d'énergie : l'électricité et l'hydrogène

(2) **L'électricité** est une énergie finale. Si on savait la capter directement dans les orages, ce serait une énergie primaire, mais ce n'est pas le cas. À l'heure actuelle, et probablement pour longtemps, elle est produite par des centrales thermiques, des éoliennes ou des panneaux solaires, qui transforment une énergie primaire : combustibles fossiles, vent ou rayonnement solaire. Il faut ensuite la transporter vers l'utilisateur, ce qui implique la construction et l'entretien d'un réseau, aérien ou enterré.

(3) Enfin, **l'hydrogène** est l'élément le plus abondant de l'univers, mais il n'existe pas à l'état libre* sur la planète Terre. C'est donc pour nous une énergie finale : quand on parle de moteur à hydrogène, il faut d'abord produire cet hydrogène, soit par électrolyse de l'eau, soit par dissociation du méthane CH₄.

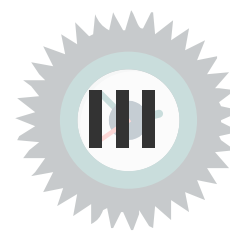


Fondamental

- On peut regrouper les émissions de GES par secteurs d'émission, en rapportant tout à un équivalent en tonne de CO₂, et en distinguant les émissions directes des émissions dues à la production d'électricité et la chaleur nécessaires à ces secteurs.
- Les deux premiers secteurs d'émission sont ceux de la production d'électricité et de chaleur et le secteur regroupant les usages du sol (un quart des émissions chacun).
- On note que la production (extraction, transformation) des énergies primaires compte à elle seule pour 10 % des émissions totales. C'est vrai pour le pétrole transformé dans d'immenses sites industriels, comme pour l'énergie que nous recevons sous forme électrique, dont on oublie souvent qu'elle est toujours transformée.

¹ <https://www.edwardburtynsky.com/projects/photographs/oil>

3. La réduction des émissions de GES : quels leviers actionner ?



1. Est-il possible de réduire nos émissions de gaz à effet de serre ?

Nous en arrivons donc à la question centrale : est-il possible de réduire nos émissions de GES ? Où concentrer nos efforts ?

Les leviers de réduction des GES [cf. reduction_ges.mp4]

2. Résumé



Reprenons ces différents éléments dans un tableau récapitulatif, que nous allons compléter au fur et à mesure de la leçon :

[cf. Tableau récapitulatif_Leçon leviers de réduction des émissions.docx]

Téléchargez ce tableau. Vous pouvez certainement déjà ajouter des éléments à la 2^e colonne, et compléter la dernière ligne sur la captation.



4. La transition énergétique

4.1 Les énergies de substitution

Il s'agit tout simplement de remplacer les combustibles fossiles par d'autres sources d'énergie, qui n'émettent pas de GES ou en émettent moins. Si nous reprenons la liste des énergies primaires donnée au début de la leçon et que nous conservons les énergies peu émettrices, nous trouvons comme candidates :

- la biomasse,
- le vent,
- l'eau courante,
- le rayonnement solaire,
- l'uranium.

Nous allons faire le tour des énergies proposées comme alternatives aux fossiles et discuter de leurs limites.

Commençons par l'**industrie nucléaire**. Elle assure environ 10 % de la production d'électricité dans le monde, mais 75 % en France*. C'est, comme l'industrie du charbon, du pétrole, ou du gaz, une industrie extractive, qui repose sur l'exploitation d'une ressource finie, en l'occurrence un *isotope rare** de l'uranium, appelé U 235. Son épuisement est prévu pour les 50 à 100 prochaines années. Il existe des solutions techniques permettant de faire appel à l'isotope le plus commun, U 238, qui représente 99 % de l'uranium terrestre grâce aux « surgénérateurs », mis en service en France (Superphenix) et dans d'autres pays (Russie, Chine) avec des succès mitigés. L'avantage énorme de l'énergie nucléaire est de ne pas émettre de CO₂ en fonctionnement. Mais elle pose d'autres problèmes, de nature technique et politique, notamment liés aux conséquences possibles d'un accident, au stockage des déchets radioactifs et à l'extraction de l'uranium. À titre d'exemple, l'Allemagne a décidé en 2011 de fermer toutes ses centrales nucléaires d'ici 2022. À l'heure actuelle, il n'en reste que six en fonctionnement. Dans le même temps, la France mettra en service un réacteur de nouvelle génération type EPR en 2024. Le débat est donc ouvert et à creuser.

Venons-en à **la biomasse**. Que l'on brûle de l'*éthanol** ou de l'essence, on émet à peu près la même quantité de GES. Comment donc peut-on prétendre que remplacer l'essence par de l'éthanol diminuerait les émissions ? La réponse ne va pas de soi et nous apparaît discutable. Le raisonnement consiste à considérer que l'éthanol en question est produit à partir de cannes à sucres, de palmiers à huile ou de maïs, c'est-à-dire de végétaux qui auraient été consommés par des humains ou des animaux, à moins de pourrir sur place. Dans tous les cas ils émettront des GES. Il s'agit donc de déplacer des émissions qui auraient eu lieu de toutes façons du secteur de l'alimentation vers le secteur de l'énergie. Ceci dit, la consommation alimentaire se reportera sur autre chose, et les biocarburants entrent en outre directement en concurrence avec l'alimentation, au risque d'un renchérissement des matières premières comme le riz.

L'**énergie hydraulique** est connue et utilisée depuis longtemps. Au Moyen-Âge, toutes les rivières étaient équipées de moulins. Plus récemment, on a construit des barrages pour produire de l'électricité. À l'heure actuelle, 12,5 % de l'électricité produite en France est d'origine hydraulique. On a

même découvert aux barrages un rôle particulièrement intéressant : ils permettent de stocker l'électricité ! Quand on en a trop, on actionne des pompes qui vont chercher l'eau en contrebas et qui la remontent dans le barrage. Ceci dit, à l'heure actuelle la plupart des sites dans le monde sont équipés, et l'hydroélectricité n'a plus guère de *capacité de développement**.

4.2 Les défis de l'éolien et du solaire

L'espoir repose donc beaucoup sur l'éolien et sur le solaire. Ce sont des énergies de **flux**, qui reposent sur un courant inépuisable : le vent dans un cas et le rayonnement solaire dans l'autre, par opposition au charbon, au pétrole, au gaz et à l'uranium, qui sont des **stocks** d'énergie. Ces stocks sont le produit de centaines de millions d'années de formation. Vu l'échelle de temps de vie humaine sur Terre, nous pouvons considérer que ces stocks sont donc finis et seront épuisés un jour.

Une énergie de flux a l'avantage d'être accessible indéfiniment. Mais il se pose d'autres problèmes : est-elle disponible où on veut quand on veut ? Et peut-on régler sa puissance ?

L'éolien et le solaire sont utilisés pour produire de l'électricité. Ce sont des énergies :

- **intermittentes** : elles ne sont pas disponibles tout le temps,
- **non pilotables** : on ne sait pas quand elles le seront. C'est particulièrement vrai pour le solaire n'est-ce pas ? Il est indisponible la nuit et on est donc certain au départ qu'il ne fonctionnera que la moitié du temps, au mieux,
- **non réglables** : quand il y en a, il peut y en avoir trop.

Leur insertion dans le réseau électrique pose des problèmes qui restreignent beaucoup leur efficacité. En tant qu'énergies intermittentes et non-pilotables, on peut parfaitement concevoir qu'elles fassent défaut ensemble au plus mauvais moment. Qu'est-ce qu'on fait si, par exemple, la nuit de Noël, il n'y a pas de vent sur l'Europe ?

Répondre à la demande d'énergie au cours d'une année ne signifie pas fournir au réseau la quantité totale consommée sur une année : il faut aussi accompagner les variations instantanées de la demande. Sauf si l'on a des capacités de stockage, on ne peut s'en remettre exclusivement à l'éolien et au solaire et il faut maintenir toute la puissance conventionnelle installée actuellement (centrales nucléaire, centrales thermiques,...) rien que pour suppléer aux intermittences ! Par ailleurs stocker l'électricité est un problème en soi, qui est loin d'avoir une solution satisfaisante (une batterie de voiture Tesla pèse 600 kilos, soit le tiers du poids de la voiture).

Imaginons par exemple que l'on veuille remplacer les centrales nucléaires françaises par des éoliennes et du solaire. Cela représente une puissance installée de 63 GW pour une puissance moyenne de 43 GW. Compte tenu de l'intermittence, il faudrait installer en renouvelable une puissance trois à quatre fois plus grande, de l'ordre de 200 GW. Et il faudrait en plus être capable de stocker l'électricité produite pour couvrir les périodes sans vent et sans soleil, la nuit notamment.

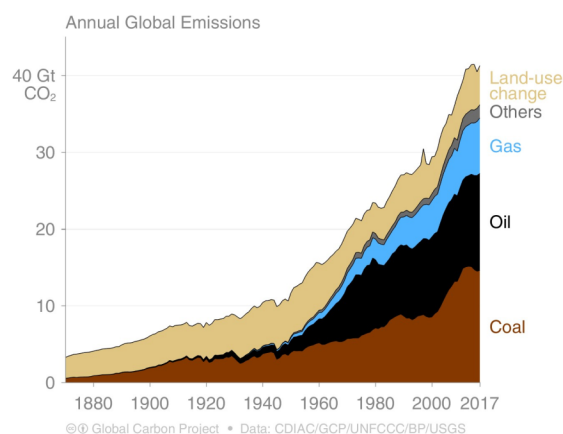
Il s'agit d'une surcapacité considérable, et qui n'est pas réalisable avec les technologies actuelles, ne serait-ce que par manque de place, sans parler des investissements nécessaires. C'est pourquoi d'autres technologies sont à l'étude, comme la production d'hydrogène qui permettrait de stocker l'électricité intermittente sous forme de carburant.

4.3 Substitution ou addition ?

Même si les problèmes techniques liés à l'utilisation d'énergies renouvelables étaient tous résolus, on se heurterait à un dernier problème de taille, de nature économique et politique : est-ce que les énergies renouvelables remplaceraient les énergies fossiles, ou est-ce qu'elles viendraient juste en complément ?

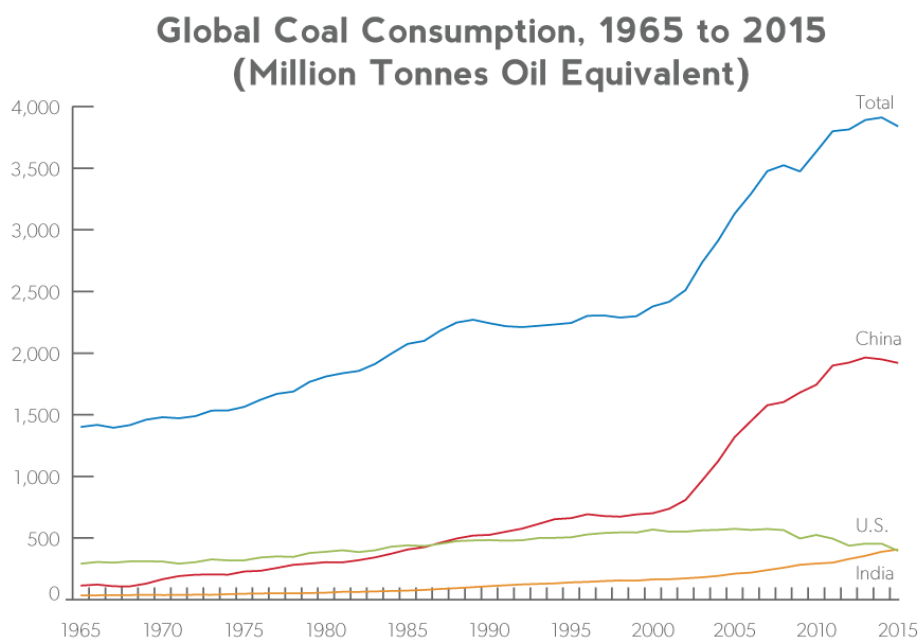
L'idée sous-jacente, bien entendu, c'est qu'elles les remplaceraient, et que les émissions de GES seraient diminuées d'autant. Mais ce n'est nullement assuré ! En pratique, l'histoire nous montre au contraire que chaque fois qu'une nouvelle source d'énergie a été découverte et exploitée, on a continué à exploiter les autres. C'est un exemple du paradoxe de Jevons dont nous allons discuter plus loin : l'énergie nouvelle crée de nouveaux besoins !

Visualisons cela dans un graphique que nous avons déjà vu : les émissions de GES dans le monde depuis 1850, réparties par source :



Oublions l'histoire et le réchauffement, et observons ce graphique de façon objective : quelle période pourrions-nous qualifier d'âge d'or du charbon ? C'est-à-dire pendant quelles décennies a-t-on émis le plus de GES par la combustion de charbon ? Et pour le pétrole et le gaz naturel ? La réponse est trois fois la même : 2000-2017 !

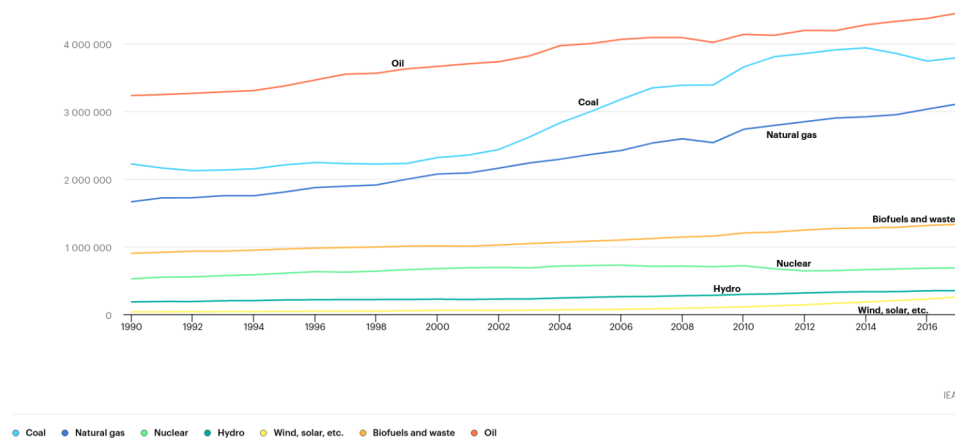
On voit que le pétrole ne remplace pas le charbon, et que le gaz ne remplace pas le pétrole. Au contraire, on pourrait même dire que le charbon (utilisé principalement pour la production d'électricité) est le combustible de l'avenir ! Sa consommation a plus que doublé ces cinquante dernières années, comme le confirme le graphique suivant :



IER

On voit que, si le charbon est en déclin modéré aux USA, il est loin de l'être sur le plan mondial, où il alimente l'essor des industries chinoises et indiennes. Bien que nos imaginaires européens l'associent plus volontiers à la première révolution industrielle, le charbon est une énergie très moderne !

Pour mesurer le chemin à parcourir et les efforts à faire si on veut supplanter les combustibles fossiles, voici, d'après l'Agence d'Énergie Internationale, l'évolution de la part prise par les énergies renouvelables dans l'énergie primaire au niveau mondial :



S'il vous faut zoomer sur l'image pour discerner les quantités d'énergie provenant du solaire et de l'éolien, c'est bien normal ! Il s'agit de la courbe la plus basse du graphique, représentant moins de 5 % de la consommation totale d'énergie.



- Plusieurs sources d'énergie sont des alternatives moins émissives que les fossiles mais elles possèdent toutes de fortes limites.
- Le nucléaire est en débat pour des raisons de gestion des déchets radioactifs, d'extraction durable d'uranium et de risque d'accidents de grande ampleur.

4. La transition énergétique

- L'hydraulique est une source déjà utilisée au maximum de son potentiel. La biomasse a un impact carbone discutable et des répercussions problématiques sur les marchés des denrées alimentaires.
- L'éolien et le solaire sont intermittentes, non-pilotables et non-réglables, et nous n'avons pas encore de solutions de stockage utilisables à grande échelle.
- En outre, la découverte de nouvelles sources d'énergie n'a, en pratique, jamais réduit l'usage des existantes : au contraire.
- Cela explique pourquoi la consommation d'énergie est encore (et aujourd'hui plus que jamais) très largement dominée par les énergies fossiles.

5. L'amélioration des rendements



5.1 La fausse bonne idée ?

C'est une solution qui semble évidente : une voiture qui fait 8 litres aux 100* consomme moins qu'une voiture qui fait 12 litres aux 100, et si on pouvait, d'un coup de baguette magique, remplacer toutes les voitures actuelles par des voitures moins gourmandes en carburant, on diminuerait d'autant la consommation de ce secteur.

Malheureusement en pratique ce n'est pas vrai car d'autres effets entrent en jeu. Du point de vue de l'utilisateur, une voiture plus sobre est aussi une voiture plus économique. Si le prix du carburant est à 1 euro le litre, une voiture qui fait 12 litres aux 100 coûte 12 centimes au kilomètre, et une voiture qui en fait 8 en coûte 8. Le propriétaire sera donc incité à l'utiliser davantage (et il s'en privera sans doute d'autant moins qu'il le fera avec bonne conscience, puisqu'il a une voiture « propre »). En outre, de nouveaux utilisateurs peuvent être intéressés, qui n'envisageaient pas d'acheter de voiture car le coût d'usage était trop élevé.

Enfin l'amélioration des rendements relatifs à la consommation de carburant va souvent de pair avec une amélioration de la fabrication des voitures : c'est alors le prix d'achat qui va baisser, et on aura des voitures plus économiques à l'usage et moins chères à l'achat, qui vont conquérir un public plus large.

In fine, on aura davantage de voitures roulant davantage, et la consommation globale va augmenter.

5.2 L'effet rebond

C'est ce qu'on appelle l'**effet rebond**, et historiquement il est parfaitement attesté. Rappelez-vous les premières machines à vapeur, qui consommaient tellement de charbon qu'on ne pouvait les installer que dans les mines. Combien en existait-il ? Quelques dizaines ou quelques centaines. Plusieurs dizaines d'années plus tard, les machines à vapeur font tourner toute l'industrie textile britannique, des locomotives sillonnent le pays par milliers, et des navires à vapeur traversent les océans. Les rendements se sont améliorés, chaque machine consomme bien moins, mais la consommation globale de charbon explose.

Prenons un autre exemple. Une des conséquences de la révolution industrielle a été la révolution de l'éclairage. Avant 1800, il n'était pas question d'éclairage public : qui s'aventurait dans les rues de Paris ou de Londres la nuit le faisait à ses risques et périls, portant son flambeau avec lui et de préférence avec une bonne escorte. Au tournant du siècle on découvre le gaz d'éclairage, extrait de la houille, et on installe des réverbères dans les rues, avec des allumeurs qui passent tous les soirs et tous les matins. Bruxelles, en 1833, est la première grande ville à inaugurer ce système. Après, bien sûr, il y aura l'électricité, l'ampoule à incandescence, puis les néons et les LED d'aujourd'hui. Les rendements énergétiques ont explosé, et corrélativement, les prix ont baissé. Entre 1800 et 2000, le prix de l'unité de lumière (le lumen) a été divisé par 3000, mais la consommation de lumen a été multipliée par 40 000.



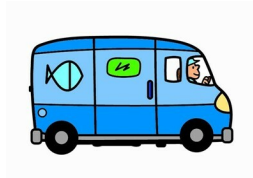
Paris, 1905, un allumeur de réverbères

Le fait que l'amélioration des rendements, et le progrès technique en général, augmente la consommation d'énergie plutôt que de la diminuer, est également connu sous le nom de **paradoxe de Jevons**, du nom d'un économiste britannique, William Jevons (1836-1882), qui l'avait le premier démontré dans un livre précurseur, *The coal question*, publié en 1865, en plein dans la révolution industrielle.

5.3 Exercice d'application : l'incitation par les prix

Mettons ces raisonnements en application, dans un exercice qui vous rappellera vos cours de micro-économie.

Responsable du service de la Transition Énergétique au Ministère de l'Écologie, vous êtes chargé.e d'évaluer les différents modèles de camionnettes disponibles sur le marché pour identifier ceux qui présentent le meilleur gain en termes de rendement énergétique.



Question 1

[solution n°1 p. 25]

Quel ratio allez-vous regarder pour évaluer ces modèles ?

Question 2

[solution n°2 p. 25]

Est-ce le même ratio qui fait se décider les artisans, qui généralement achètent ce type de camionnettes pour s'approvisionner ou livrer leur production ?

Question 3

[solution n°3 p. 25]

Un constructeur automobile vous sollicite pour une subvention, avançant l'argument que son nouveau modèle a un nettement meilleur rendement énergétique. Est-ce qu'attribuer cette subvention amènera de façon certaine à une réduction des émissions dues à l'usage des camionnettes ?

Question 4

[solution n°4 p. 25]

Quels sont les deux effets qui peuvent entrer en jeu, qui amèneraient au contraire les émissions à augmenter ?

5.4. Résumé



- Améliorer les rendements énergétiques d'une machine ne suffit pas à garantir que la consommation d'énergie liée à l'usage de cette machine va baisser.
- En pratique on observe très fréquemment deux effets rebonds : les meilleurs rendements incitent à un plus grand usage des usagers existants, et attirent plus d'usagers.

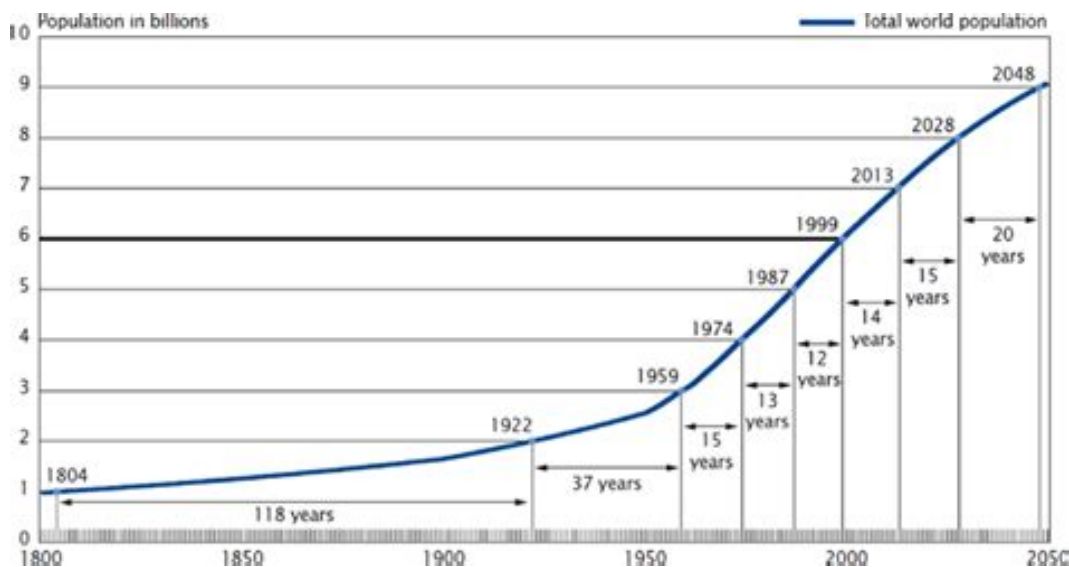
- Dans une économie de marché, les décisions d'usage et d'achat sont en effet déterminées par des rapports de prix et non par des rapports énergétiques.



6. L'usage des sols

6.1 Satisfaire des besoins alimentaires exponentiels

En 1800, la population mondiale atteint un milliard d'individus. Il lui a fallu des dizaines de milliers d'années pour atteindre ce chiffre. Mais à partir de là l'évolution s'accélère : le deuxième milliard est atteint 120 ans après, et en 2020 nous sommes 7,8 milliards sur cette planète. Comme les tendances démographiques sont très lourdes (les taux de naissance et de décès ne varient que très lentement), on peut extrapoler et affirmer que, sauf catastrophe majeure, nous serons 9 milliards au milieu du siècle.



La révolution industrielle est indubitablement la cause de cette explosion de la population, grâce aux progrès de la médecine certes, mais surtout grâce à l'amélioration des conditions de vie (accès à l'eau courante, hygiène publique). Mais comment l'alimentation a-t-elle pu suivre ? Entre 1800 et 1900, il y a eu la mise en exploitation de nouvelles terres agricoles, en Amérique du Nord et en Australie, mais après ? On voit bien qu'il y a une accélération à partir de 1950 : comment a-t-on pu la soutenir ?

6.2 L'industrialisation de l'agriculture

Pour résumer, la réponse tient en deux temps : d'une part, il y a l'extension des terres agricoles, d'autre part, l'industrialisation de l'agriculture. Les prairies de l'Amérique du Nord et d'Australie ont été transformées en champs de céréales à mesure que la colonisation s'étendait vers l'intérieur des terres. Ce processus atteint ses limites vers 1900, et c'est l'industrialisation qui vient prendre le relais. La première guerre mondiale donne un coup de fouet à l'industrie mécanique (production de camions et de tanks) et à l'industrie chimique (production de gaz de combat) : les travaux des champs seront dorénavant effectués par des machines agricoles, les engrais organiques fournis par l'élevage seront remplacés par des engrais industriels, on exterminera les insectes prédateurs et les champignons parasites par des pesticides. On voit naître l'industrie agroalimentaire, qui fournit les exploitants en machines, en semences, en engrais, en pesticides, et qui achète leur production pour l'écouler sur les marchés internationaux.

Vers 1950, au moment où la croissance de la population s'accélère, intervient un deuxième bouleversement : la « révolution verte », à laquelle est associée le nom d'un agronome américain, Norman Borlaug. Il reçut le prix Nobel de la paix en 1970, pour avoir développé de nouvelles variétés de céréales, d'un rendement supérieur aux variétés traditionnelles. Les progrès de la génétique ouvrent un nouveau territoire à l'industrie agro-alimentaire, capable de modifier le génome des variétés de façon ciblée pour leur associer des caractéristiques désirables : mieux résister à la sécheresse, aux pesticides, etc. Ce sont les fameux OGM, Organismes Génétiquement Modifiés, conçus pour répondre à un cahier des charges précis, comme par exemple de résister à un herbicide donné.

Cette évolution de l'agriculture pose aujourd'hui des problèmes considérables : épuisement et artificialisation des sols, perte de la biodiversité naturelle d'une part et création d'organismes génétiquement modifiés d'autre part, destruction des cycles naturels (les semences commercialisées sont stériles, les engrais industriels interfèrent avec les cycles du phosphore et de l'azote), pollution chimique et perturbateurs endocriniens (pesticides)...

Nous allons nous concentrer ici sur ses conséquences pour le réchauffement climatique : pourquoi le secteur agricole est-il un si grand émetteur de GES ? Comment se fait-il d'ailleurs que l'agriculture émette des GES ?

6.3 Élevage, déboisement, transformation des sols

Il y a bien sûr les émissions directes de CO₂, liées à l'industrialisation : utilisation de machines, d'engrais et de pesticides, qu'il faut fabriquer, transport des récoltes vers les lieux de consommation, souvent distants de milliers de kilomètres. Mais le principal responsable est **l'élevage** : les ruminants, dont les bovins et les moutons, émettent du méthane ! C'est dû à leur physiologie : ils ne digèrent pas directement l'herbe qu'ils broutent, ce sont des bactéries qui la décomposent pour eux, et qui émettent du méthane durant le processus. Cela représente 40 % des émissions de méthane dans le monde, et ne fait que s'amplifier à mesure que la demande de viande augmente. Or nous avons vu que le méthane est un GES 25 fois plus puissant que le CO₂, quoique moins persistant.

À cela il faut rajouter les émissions indirectes. Il faut nourrir 8 milliards de personnes, bientôt 9. Pour cela, on **déboise** : la forêt amazonienne, qui est un gigantesque puits de carbone, disparaît pour faire place aux plantations de soja. Les terres arables existantes disparaissent au profit de l'urbanisation, et celles qui restent s'épuisent progressivement et deviennent *moins fertiles**. Enfin, à mesure que la végétation disparaît ou s'appauvrit, **les sols cessent d'absorber** du CO₂.

Concluons sur un bilan. 38 % de la surface terrestre est consacrée à l'agriculture, dont les deux tiers en pâtures pour le bétail et le tiers en culture. Le secteur agricole représente plus du quart des émissions de GES d'origine humaine, et l'élevage à lui seul en fait la moitié. Ce sont autant de terres qui ne captent pas de carbone par des végétaux pérennes. En outre, rappelez-vous que les émissions dues à l'élevage se font sous forme de méthane, et celui-ci disparaît de l'atmosphère en une dizaine d'années (réabsorbé sur Terre). Si l'on diminue fortement l'élevage, on va donc non seulement libérer des espaces cesser d'ajouter du méthane dans l'air mais au bout d'une dizaine d'années on va voir la quantité de méthane atmosphérique diminuer ! Et cela dégagerait aussi des ressources alimentaires : un bœuf absorbe au cours de sa vie 25 fois plus de calories qu'il n'en restitue sous forme de viande.

6.4. Résumé



- La population mondiale a augmenté de façon exponentielle : nous étions 200 millions en l'an 400, 1,5 milliard en 1900, nous sommes 7,7 milliards en 2020. Nous serons probablement 9,5 milliards en 2050.
- L'industrialisation de la production agricole a largement soutenu cette croissance.

- Aujourd'hui, la principale source d'émissions dans le secteur agricole est l'élevage : par les émissions de méthane des ruminants et par l'importance des terres cultivées pour l'alimentation du bétail.
- Les autres sources sont le déboisement, et l'artificialisation et les traitements des sols.

7. L'économie verte, ou comment agir sur la consommation ?



7.1 Agir sur la demande

On n'élève pas des ruminants pour le plaisir, mais pour répondre à une demande alimentaire. Si on diminue la demande de viande ou de lait, la population de ruminants baissera en proportion, ainsi que les émissions de GES. C'est une loi générale : les industries polluantes produisent pour répondre à une demande.

Nous avons vu que les leviers de l'amélioration des rendements et l'exploitation de nouvelles sources d'énergie étaient fortement limités si l'on voulait respecter les objectifs de l'accord de Paris, moins de 2°C de réchauffement en 2100, sauf si l'on invente d'ici là des procédés permettant d'extraire le carbone de l'atmosphère à une échelle suffisante - ce dont on est encore très loin. Si l'on prend ces objectifs au sérieux, on sera donc inéluctablement contraint d'agir sur la production industrielle et agricole, en la déplaçant vers des produits non polluants, c'est-à-dire d'agir sur la demande, et donc de **modifier notre consommation**.

7.2 Application : le cas de l'élevage et des régimes végétariens

Prenons le cas de l'élevage, qui est exemplaire. Comme nous l'avons vu, manger moins de viande et de laitages, et donc déplacer la consommation vers un régime végétarien, permettrait de réduire considérablement les émissions de GES. Mais est-ce si simple ? Qu'est-ce que cela nécessite exactement ?

Pour vous en faire une idée, pensez à des cas connus autour de vous : vous-mêmes, des amis ou des connaissances, qui ont diminué leur consommation de viande. Par quoi cela est-il passé ? En particulier, répondez aux questions suivantes :

- Comment ce changement de comportement a été perçu par leur entourage ?
- Ont-ils dû élaborer eux-mêmes un nouveau régime ou bien avaient-ils déjà observé ailleurs des menus végétariens imitables ?
- Est-ce que le critère financier a joué ?
- Existait-il des restaurants ou des magasins alimentaires à proximité qui avaient une offre adaptée ? Cela a-t-il facilité leur choix ?
- Comment justifient-ils leur décision ? Est-ce qu'elle revêt pour eux une dimension morale ?
- Comment ont-ils été sensibilisés au sujet ? Est-ce que d'autres personnes de leur entourage ou de leur groupe social ont suivi les mêmes évolutions ?

7.2 Application : le cas de l'élevage et des régimes végétariens (suite)

Une telle analyse nous révèle qu'il ne s'agit jamais de décision purement individuelle, sur des critères moraux individuels. Beaucoup de paramètres affectant nos choix sont l'objet de **décisions collectives**, au sein de différents types d'organisation et à différentes échelles.

Ainsi, vous ne décidez pas seul d'avoir un magasin alimentaire proche de chez vous qui contienne des produits végétariens. L'alimentation a également une dimension sociale et culturelle très forte. Pas simple de refuser le gigot ou le couscous au poulet aux repas familiaux du dimanche ! Dans beaucoup de sociétés, manger de la viande est un signe de réussite, dont on cherche à faire profiter ses proches. Cela explique pourquoi l'on constate que la consommation de viande, qui baisse actuellement dans les pays riches, augmente dans les pays pauvres.

Par ailleurs, l'alimentation est une industrie, qui ne subit pas la demande passivement, et qui est capable d'investir pour l'orienter dans une direction qui lui est avantageuse. La publicité, et plus généralement l'information que l'on capte sur ce que nous pouvons manger, sont des leviers puissants pour influencer les comportements.

Enfin, le tout se passe dans un cadre légal et réglementaire qui peut être modifié suivant les procédures et les aléas de l'action politique. Par exemple en 2018 en France, la loi Egalim a fixé un objectif de « 50 % de produits durables ou sous signes d'origine et de qualité (dont des produits bio) dans la restauration collective publique à partir du 1er janvier 2022 ». Les enfants allant manger à la cantine en 2022 n'auront certainement pas les mêmes repères et habitudes alimentaires que vous, qui les avez précédés vingt ans plus tôt.

7.3 Transformer la société

En conclusion, au-delà de l'exemple de l'alimentation, on voit qu'agir sur la consommation est un problème complexe, qui requiert une **action à plusieurs niveaux** : sur les individus, sur les entreprises, et sur l'État. Les moyens pour cela sont divers : les incitations économiques, les interdictions juridiques, les modes de gouvernance des entreprises et de l'État.

Encore faut-il savoir **quel but on se donne**. Plusieurs types d'organisation sociale sont compatibles avec les objectifs de l'accord de Paris, certains très inégalitaires, d'autres moins : vers lequel souhaite-t-on se diriger ? Rappelez-vous du récent mouvement politique des Gilets Jaunes en France : l'argument de justice sociale dans la répartition du coût des politiques environnementales était au centre des revendications.

Toutes ces questions feront l'objet du cours de l'an prochain. Il ne sera plus question de physique ni de biologie, mais de l'individu, de la personne, de la société, de l'entreprise et de l'État.



- Un levier puissant pour réorienter la production consiste à changer la demande.
- Cela nécessite d'agir à différents niveaux, et la plupart des leviers d'action relèvent de décisions collectives.
- Ces décisions transcrivent de véritables choix de société, qui soulèvent des questions de justice et d'éthique.

Conclusion



Nous avons identifié différents leviers sur lesquels on peut agir pour diminuer les émissions de GES. Il y a la transition agricole, qui offre le double avantage de pouvoir agir rapidement, puisqu'elle agirait sur le méthane dont la durée de vie est bien inférieure à celle du dioxyde de carbone, et de venir au secours de la biodiversité. Il y a l'amélioration des rendements et la transition énergétique, mais l'histoire nous enseigne qu'elles se traduisent plutôt par une augmentation de la consommation globale. Pour renverser cette tendance, il faudra changer nos habitudes. Bref, pour lutter contre le réchauffement climatique, il faut agir sur les modes de consommation tout autant que sur les modes de production.

Mais pour agir, il faut d'abord savoir ce que l'on veut. Si l'on veut sortir du « Business as usual », qui nous conduit inéluctablement à un réchauffement de 3°5 à 5°C en 2100, il faut se demander ce que l'on veut à la place. Il ne s'agit pas seulement de savoir quel climat on veut en 2100, il faut aussi savoir quelle société on veut pour 2100 et jusque-là.

Bravo ! Vous avez terminé la leçon.



Avant de passer à la leçon suivante, nous vous proposons de vous auto-positionner sur les objectifs clés de la leçon afin de faire le point sur votre apprentissage. Ce sondage n'est ni noté, ni obligatoire. Il est pour vous.

[cf.]

Solutions des exercices



Solution n°1

[exercice p. 16]

Le numérateur est un travail, au sens que nous avons défini dans la leçon précédente : c'est le déplacement de matière sur une distance.

Solution n°2

[exercice p. 16]

Non. Le client se décide (en général) en termes de prix. Lorsque le vendeur dit au client qu'une voiture est plus « rentable » qu'une autre, il se réfère au rendement économique de la voiture en question :

Solution n°3

[exercice p. 16]

Non, il peut y avoir des effets rebonds.

Solution n°4

[exercice p. 16]

D'une part : une camionnette plus économe peut inciter ses usagers à plus l'utiliser. D'autre part, si le prix au kilomètre incluant le coût initial de la camionnette coûte in fine moins cher, elle pourrait être achetée par des artisans qui auparavant n'avaient pas de véhicules de locomotion.

Glossaire



8 litres aux 100

On dit « 8 litres aux 100 » pour signifier qu'avec une charge normale, la voiture consomme 8 litres d'essence pour parcourir 100 km.

capacité de développement

Sauf quelques projets pharaoniques qui n'avaient pas été entrepris jusqu'ici faute de moyens techniques à la hauteur des chantiers : haut barrage d'Assouan, barrage des Trois-Gorges...

en France

Les autres pays européens qui utilisent le plus l'énergie nucléaire dans leur mix électrique sont la Slovaquie (54 % du mix), la Belgique (52 %), la Hongrie (51 %) et la Suède (40 %). La moyenne s'établit à 26 %.

Source : <https://www.forumnucleaire.be/theme/dans-le-monde/lunion-europeenne>

équivalent CO2

Par exemple on évalue le forçage radiatif dû à une tonne de méthane, et on compte la quantité de CO2 qui créerait un forçage instantané équivalent.

état libre

Libre, cela signifie qu'on peut récupérer des atomes ou des molécules d'hydrogène seul. Dans le méthane CH₄ par exemple, il y a des atomes d'hydrogènes, mais cela demande de l'énergie de les isoler de l'atome de carbone auquel ils sont liés.

éthanol

L'éthanol est une molécule composée de carbone, d'hydrogène et d'oxygène qu'on catégorise parmi les « alcools », et dont la combustion permet de libérer de l'énergie. On peut l'obtenir en faisant fermenter des plantes comme les betteraves ou la canne à sucre.

isotope rare

Les atomes sont tous constitués de trois types de particules élémentaires : positons et neutrons dans le noyau, et électrons qui « gravitent » autour. L'atome d'hydrogène est l'atome qui a exactement 1 électron et 1 positon. L'oxygène a 8 positons, 8 neutrons et 8 électrons. Mais il existe aussi d'autres « versions » plus rares de l'oxygène qui ont 9 neutrons, voire 10. Ces différentes versions sont appelées les « isotopes » de l'oxygène.

moins fertiles

En termes d'artificialisation, la France est dans la moyenne européenne. Pour construire des logements, des routes ou des infrastructures commerciales, l'équivalent de la superficie d'un département est bétonné tous les 10 ans, soit un terrain de foot toutes les 5 minutes.

Source : Rapport France Stratégie « Zéro artificialisation nette » ; Site Planestoscope <https://www.planestoscope.com/sols/2024-l-artificialisation-des-sols-en-france.html>