

Énergie – Climat – Société
– LU2PY125 –

3 ECTS

Poly de cours

2024-2025

Dans ce polycopié, vous trouverez des cadres permettant de distinguer les différents niveaux d'informations afin d'identifier ce qui est absolument à savoir, ce qui fait partie du raisonnement, et les à-côtés.

signalées en vert :

les définitions importantes : elles ne sont pas à connaître mot-à-mot, mais elles sont à connaître puisque cruciales pour la compréhension du cours,
les formules à retenir.

en rouge :

des remarques très importantes, des ordres de grandeur essentiels.

Ce polycopié contient de très nombreuses valeurs numériques ; les valeurs numériques indiquées dans un encadré rouge, et uniquement celles-ci, seront à connaître pour l'examen.

Par ailleurs, certains aspects ne sont développés qu'à titre de complément, et leur lecture est absolument facultative - ils ne seront d'ailleurs pas nécessairement abordés en amphi. Ils sont indiqués

- soit par des caractères très petits
- soit par un astérisque (*).

Application

Enfin, des exercices très courts d'application des formules vous sont aussi proposés dans des encadrés. Vous pouvez les faire chez vous de manière facultative.

Ce manuscrit est écrit par Laurent Coolen et Guillaume Ferlat. Il a bénéficié de nombreuses sources d'inspiration, parmi lesquels les ouvrages et documents publics listés en Bibliographie, ainsi que les supports pédagogiques des enseignantes et enseignants mentionnés ci-dessous.

Remerciements : Gaëlle Charron et Guillaume Blanc (Paris Cité), Guillaume Roux (Paris-Saclay), Roland Lehoucq (CEA), Alexandre Le Tiec (CNRS), Alexis Tantet (Polytechnique), Gatien Verley (Paris-Saclay), Daniel Suchet (Polytechnique), Mathieu Bouffard (Université de Nantes), Romain Jarrier (Sorbonne Université), Christian Simon (Sorbonne Université), Arnaud Raoux (Sorbonne Université).



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License. This license lets others remix, adapt, and build upon your work non-commercially, as long as they credit you and license their new creations under the identical terms.

Table des matières

1	Introduction : limites planétaires	4
1	Introduction : des activités humaines en forte croissance	4
2	Limites planétaires	5
3	Changement climatique et empreinte carbone	10
4	Érosion de la biodiversité	17
5	Annexes	19
2	Énergie	20
1	Introduction	21
2	Énergie. Les concepts physiques	22
3	Focus sur la conversion d'énergie thermique	28
4	Énergie et société. Concepts et définitions complémentaires	35
5	Sources d'énergie	42
6	Caractéristiques des différentes sources d'énergie	52
7	Conclusion	58
8	Annexes	60

Chapitre 1

Introduction : limites planétaires

Sommaire

1	Introduction : des activités humaines en forte croissance	4
2	Limites planétaires	5
2.1	Définition générale	5
2.2	Perturbation des cycles biogéochimiques	6
2.3	Liste des limites planétaires	8
2.4	Seuils de franchissement	9
2.5	Raréfaction des ressources non renouvelables	9
3	Changement climatique et empreinte carbone	10
3.1	La Terre se réchauffe	10
3.2	Les conséquences du changement climatique	11
3.3	Les différents gaz à effet de serre et leur origine	11
3.4	Trajectoires de réduction des émissions de GES	13
3.5	Empreinte carbone	15
3.6	Cas de la France	16
4	Érosion de la biodiversité	17
5	Annexes	19
5.1	Notion de croissance exponentielle (*)	19

Ce cours porte sur le réchauffement climatique et sur des moyens de l'atténuer au niveau de la production d'énergie : c'est un problème grave et urgent, et dont de nombreux aspects sont bien décrits par une approche physique. Il importe cependant de garder à l'esprit les limitations du point de vue adopté : d'une part, le réchauffement climatique ne doit pas faire oublier les autres risques environnementaux ; d'autre part, un raisonnement limité à la physique ne doit pas amener à une vision purement technique du problème qui ferait l'impasse sur les aspects humains et sociaux.

L'objet de ce premier chapitre introductif est donc (1) de donner très brièvement quelques éléments de compréhension en-dehors du champ de la physique, et (2) de quantifier les émissions de gaz à effet de serre actuelles et leurs objectifs de réduction.

1 Introduction : des activités humaines en forte croissance

L'impact de l'espèce humaine sur son environnement est très ancien : il devient fort dès le développement de l'agriculture et s'intensifie avec la révolution industrielle en Occident et le recours systématique aux énergies fossiles. À partir de 1950, tous les indicateurs démographiques et économiques mondiaux connaissent une croissance très rapide, de même que les indicateurs d'atteintes à l'environnement (figure 1.1) – on parle parfois de « grande accélération » pour désigner ce mouvement.

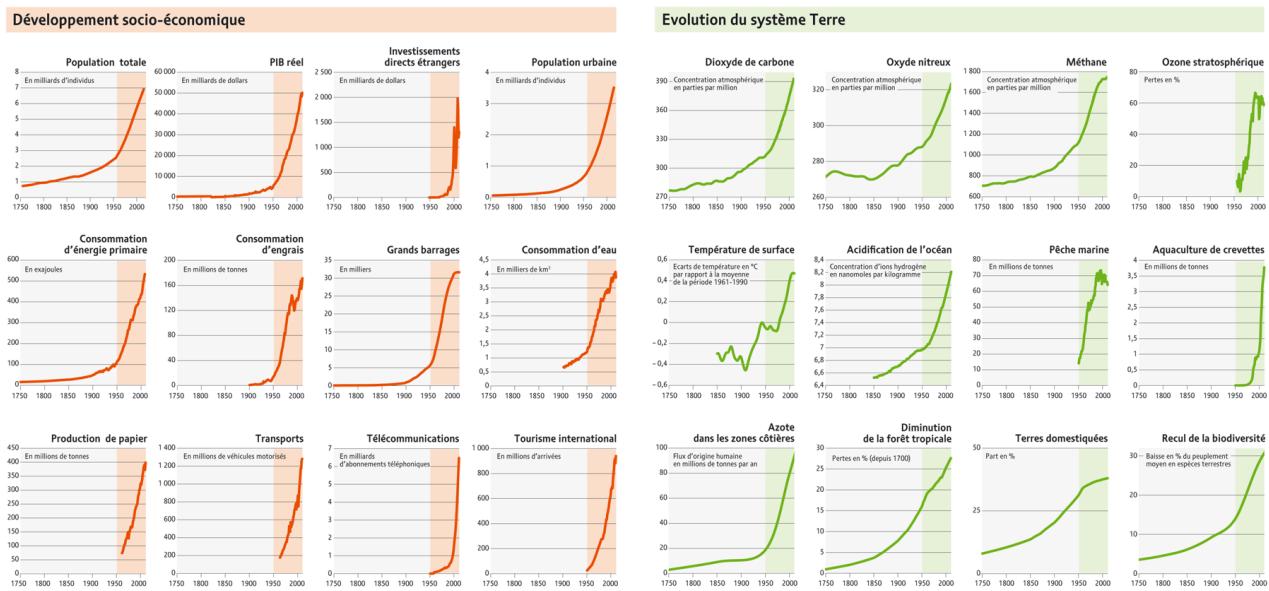


FIGURE 1.1 – Quelques données démographiques, économiques et environnementales illustrant la notion de « grande accélération » (zone foncée des graphiques, après 1950). Adapté de la référence [15].

Ainsi, en 2010, la consommation énergétique avait été multipliée par 5 par rapport à 1950 [15] (et par 20 par rapport à 1850), à la fois en raison

- de la croissance démographique : la population mondiale a été multipliée par 2,8 ;
- et de la croissance de la consommation par personne : d’après les données précédentes, elle a augmenté d’un facteur 1,8.

Pour désigner cette nouvelle époque où les caractéristiques géologiques terrestres ont été massivement modifiées par l’activité humaine, le terme **Anthropocène** (« ère de l’être humain ») est souvent employé¹.

2 Limites planétaires

2.1 Définition générale

Les risques posés par les atteintes à l’environnement sont de natures et de gravités très diverses. Afin de constituer, à partir des très nombreuses données disponibles, une sorte de « tableau de bord » synthétique, des chercheurs², ont proposé en 2009 un ensemble de « limites planétaires ».

Définition Les limites planétaires sont des seuils quantitatifs à ne pas dépasser pour que l’humanité puisse vivre durablement dans un écosystème sûr (sans modifications imprévisibles et potentiellement catastrophiques de l’environnement).

Cette notion de limites planétaires a rencontré un écho important mais reste une construction récente, toujours objet de recherches et de discussions. La fixation de valeurs seuils n’est pas à comprendre de façon binaire (elle pourrait suggérer qu’au-dessus du seuil "tout est perdu" - avec le risque de décourager - et qu’en-dessous du seuil

1. Le suffixe « cène », qui désigne une époque à l’échelle des temps géologiques, a été choisi pour signaler l’ampleur colossale des changements en cours. Ceci génère cependant des discussions méthodologiques : la définition formelle d’une époque géologique nécessite de choisir une date de début et un critère géologique (trace détectable dans les sols). De ce point de vue, la notion d’Anthropocène n’a pas été validée par l’Union internationale des sciences géologiques. Ceci n’enlève rien à l’utilité de cette notion dans les domaines où elle est employée - en sciences de la Terre, en sciences sociales, histoire, économie, urbanisme, dans le discours politique ou encore dans la création artistique.

2. J. Rockström et collègues, A safe operating space for humanity, Nature 461, 472 (2009)

"tout va bien") : les travaux plus récents évoquent une *plage* de valeurs dans laquelle les risques augmentent progressivement (fig. 1.2). Plus en détail, cette plage est définie par une limite basse (en-dessous de laquelle l'humain vit dans un espace sûr, car bien connu) et une limite haute au-delà de laquelle des changements majeurs et imprévisibles deviennent très probables. Entre les deux, le danger dépendra également du temps passé dans cette situation (plus on tarde à en sortir, plus on prend de risques).

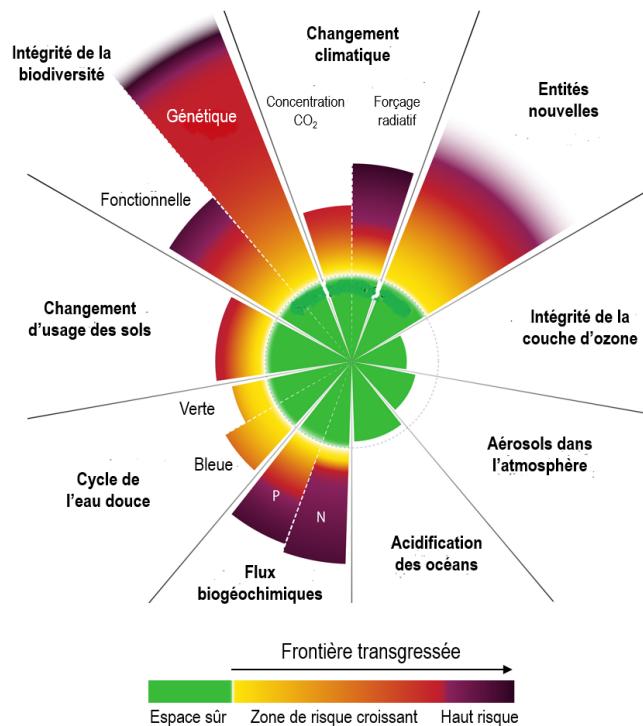


FIGURE 1.2 – Situation actuelle des neuf limites planétaires. Pour chaque limite, le rayon maximal correspond aux plages de valeurs de l'indicateur (défini dans l'article) utilisé pour la décrire quantitativement ; le dégradé de couleur (jaune-rouge) définit une zone de risque croissant. Certaines valeurs sont connues avec une forte incertitude, ce qui est indiqué par un flouté (ex. : entités nouvelles). Figure traduite à partir de K. Richardson *et al.*, Science Advances 9, eadh2458 (2023).

2.2 Perturbation des cycles biogéochimiques

Avant de lister les limites planétaires, nous allons évoquer les **Cycles biogéochimiques des éléments**, c'est-à-dire la répartition des éléments (carbone, azote, oxygène, etc.) et leurs échanges entre les grands réservoirs (géosphère, atmosphère, hydrosphère, biosphère). En effet, la perturbation de ces cycles est à l'origine du franchissement de plusieurs limites planétaires majeures.

- **Le carbone** est un composant principal des organismes vivants (matière organique), il est présent dans l'atmosphère principalement sous forme de CO₂ (et aussi CH₄, CO, etc.), dans les océans sous forme de différentes molécules, et dans différentes composantes géologiques riches en carbone : les roches comme le calcaire (CaCO₃) issues de la sédimentation, et les combustibles fossiles (solides, liquides ou gazeux) issus de la fossilisation de la biomasse (fig. 1.3(a)). Les transferts entre ces compartiments (atmosphère, océans, sols, biomasse) constituent le cycle du carbone. La perturbation de ce cycle est principalement due à l'extraction des combustibles fossiles dont la combustion rejette du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, à un rythme beaucoup plus rapide que le mécanisme inverse de photosynthèse puis fossilisation qui reconstitue les réserves de ces combustibles ³.
- **L'azote** est indispensable à la croissance des plantes et aux animaux. Il est très abondant dans l'atmosphère mais sous une forme que les plantes ne peuvent pas directement assimiler (la molécule de diazote N₂

3. Les gisements actuels ont mis des millions d'années à se former et ils auront été épuisés en quelques siècles.

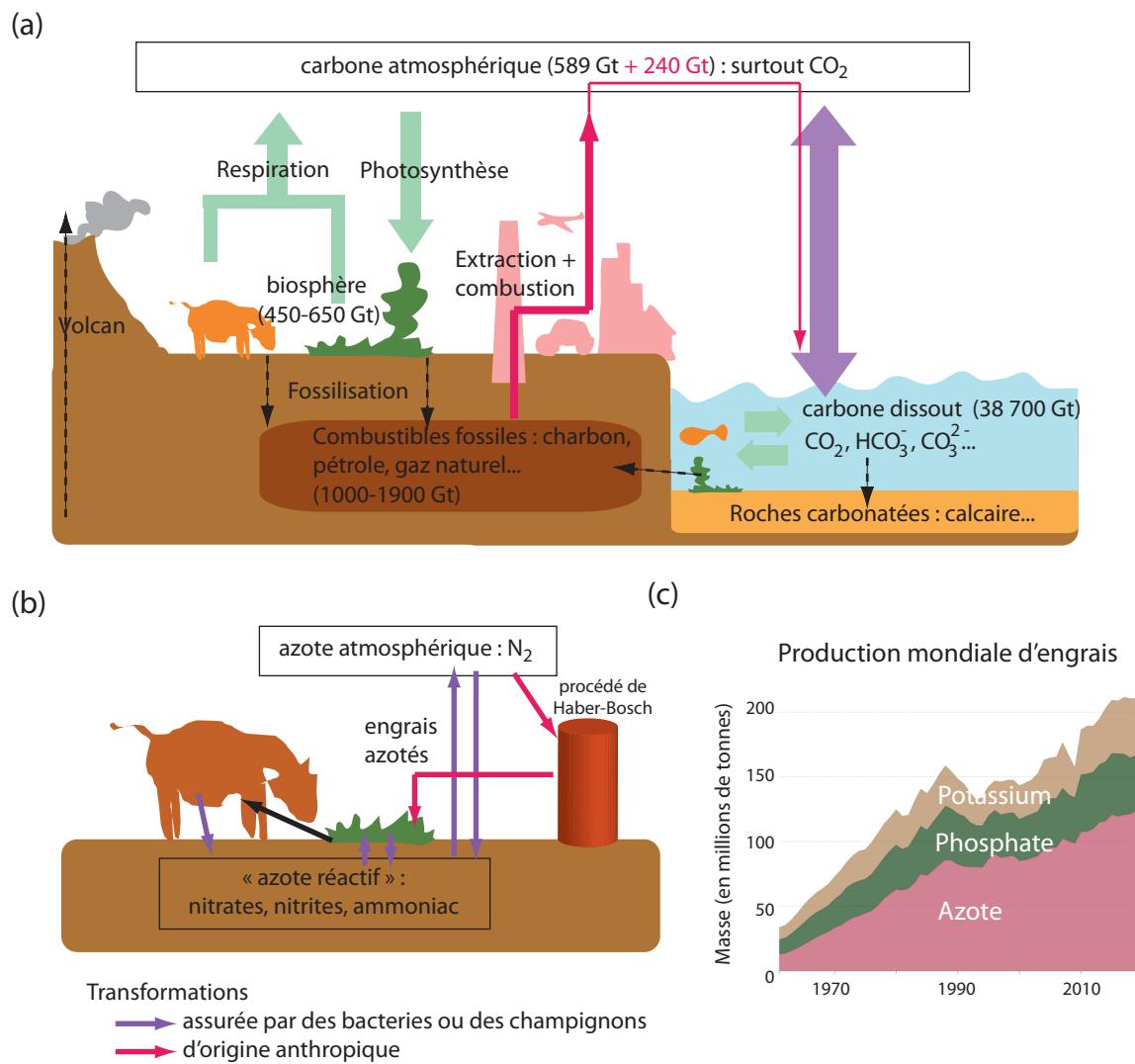


FIGURE 1.3 – Représentations simplifiées des cycles biogéochimiques (a) du carbone (les échanges sont représentés par des flèches plus ou moins épaisses selon leur intensité, les flèches en pointillés correspondent à des transferts particulièrement lents ; les stocks de carbone de certains réservoirs sont indiqués en Gt de carbone) et (b) de l'azote terrestre. (c) Production mondiale d'engrais (1961-2020) [11].

présente une liaison triple dont la rupture demanderait trop d'énergie). En revanche, elles peuvent assimiler l'azote dit « réactif » présent dans les sols (nitrates NO₃⁻, nitrites NO₂⁻, ammoniac NH₃) (fig. 1.3(b)).

Il est possible d'**enrichir les sols par des engrains azotés**, obtenus à partir d'ammoniac synthétisé à partir de l'azote atmosphérique via le procédé de Haber-Bosch (1909) ($N_2 + 3H_2 \rightarrow 2 NH_3$), dont l'utilisation, très consommatrice en énergie (haute température, haute pression), a été rendue possible par le recours massif aux combustibles fossiles.

- **Le phosphore** est lui aussi indispensable aux plantes, qui l'extraient du sol sous forme de phosphates, et aux animaux. À la différence de l'azote, les engrains phosphatés ne sont pas extraits de l'atmosphère (car elle ne contient pas naturellement de phosphore) mais de mines de phosphates.
- Les cycles des autres éléments sont aussi affectés par l'activité humaine : celui de l'oxygène avec l'augmentation de la concentration en CO₂ et la diminution de l'ozone dans la stratosphère, celui du potassium par l'apport d'engrais, etc.

2.3 Liste des limites planétaires

Les neuf limites planétaires actuellement identifiées sont énumérées ci-dessous. Parmi ces limites, les six premières sont maintenant considérées comme transgressées.

- **changement climatique**

Causé par l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , etc.) dans l'atmosphère, le changement climatique fera l'objet de la partie 3 puis du chapitre Climat.

- **intégrité de la biodiversité**

Ce point sera décrit brièvement dans la partie 4.

- **perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore**

L'apport massif d'engrais azotés et phosphatés a différentes conséquences : pollution des réservoirs d'eau potable ; *eutrophisation* des écosystèmes aquatiques (excès de nutriments favorisant l'apparition d'algues, qui privent les autres organismes de lumière ou d'oxygène) ⁴ ; relargage de N_2O (puissant gaz à effet de serre).

- **changement d'usage des sols**

De manière générale, les zones sauvages ou semi-naturelles sont en recul constant (fig. 1.4). Plus spécifiquement, l'indicateur considéré pour cette limite est la proportion restante de forêts originelles (avant défrichage humain).

- **introduction d'entités nouvelles dans l'environnement**

Ces « entités nouvelles » incluent différents déchets comme les plastiques, les métaux lourds, les perturbateurs endocriniens, etc. qui peuvent être nocifs aux organismes vivants.

- **concentration d'aérosols dans l'atmosphère**

Les aérosols sont de fines particules, de dimensions micrométriques ou sub-micrométriques en suspension dans l'atmosphère.

- **consommation d'eau douce**

Eaux de surface, nappes phréatiques, eau présente dans les végétaux et dans les sols.

- **acidification des océans**

C'est l'autre conséquence de la modification du cycle biogéochimique du carbone : le dioxyde de carbone relâché dans l'atmosphère est absorbé à 30 % dans les océans (et à 20 % dans les sols), ce qui a pour avantage de réduire l'effet de serre mais comme conséquence très inquiétante de rendre les océans plus acides ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$, ce qui augmente $[\text{H}^+]$ donc diminue le pH). Cette acidité attaque les coquilles et squelettes des organismes marins, ce qui pourrait à terme avoir des conséquences massives pour la biodiversité marine.

- **diminution de l'ozone stratosphérique**

L'ozone (O_3) contenue dans la stratosphère (couche atmosphérique d'altitude 12-50 km) joue un rôle protecteur pour les êtres vivants ⁵ en absorbant la plus grande partie du rayonnement solaire ultraviolet. Dans les années 1970, une baisse de la concentration stratosphérique d'ozone, notamment au-dessus de l'Antarctique (« trou de la couche d'ozone »), a été mesurée, sous l'effet principalement des chlorofluorocarbures (CFC), utilisés par exemple en réfrigération, qui réagissaient avec O_3 . Cette observation a conduit à l'adoption du Protocole de Montréal bannissant les CFC (1987), premier exemple

4. En France, il s'agit notamment du fameux problème des « algues vertes ». On peut trouver sur ce [portail d'information gouvernemental](#) une discussion de l'état des sols français du point de vue des quantités d'azote et de phosphore ajoutées chaque année dans les sols. D'après les données de ce site, ces quantités sont en diminution mais dépassent toujours les limites planétaires dans la plupart des régions françaises, souvent d'un facteur 2 ou davantage.

5. Attention à ne pas se méprendre :

- si la présence d'ozone est souhaitable en haute altitude, dans la stratosphère, car elle absorbe les UV, elle ne l'est pas du tout à basse altitude puisque l'ozone est toxique pour l'être humain,
- par ailleurs, l'ozone est aussi un gaz à effet de serre, mais sa concentration est suffisamment faible pour qu'il ne joue quasiment aucun rôle dans le réchauffement climatique.

de mobilisation mondiale pour résoudre un problème environnemental majeur. La couche d'ozone reste fragile mais est actuellement en bonne voie de rétablissement (d'ici le milieu du siècle).

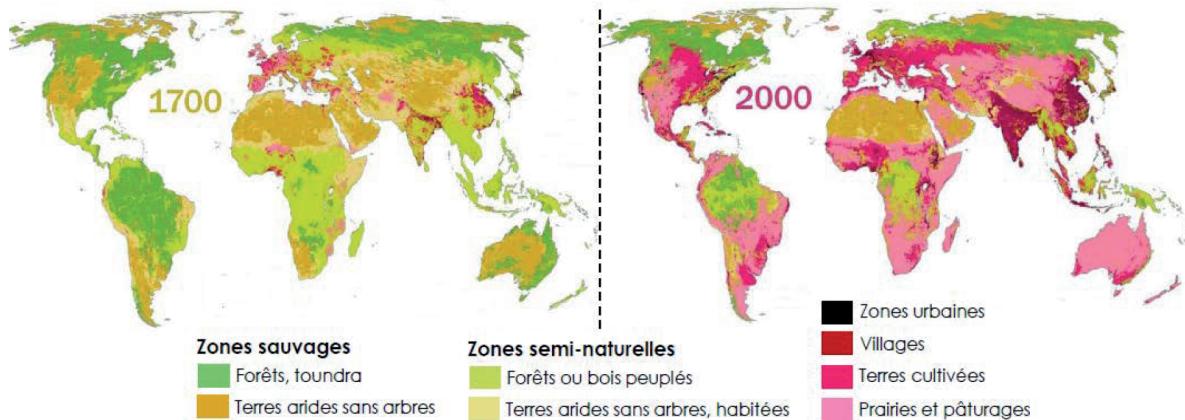


FIGURE 1.4 – Le recul des zones inhabitées et le déclin des forêts entre 1700 et 2000 [12].

Les limites planétaires sont interconnectées par différents mécanismes. Pouvez-vous en évoquer quelques-uns ?

2.4 Seuils de franchissement

Pour chaque limite planétaire, des **indicateurs chiffrés** sont définis et des **seuils de franchissement** de la limite sont identifiés.

Par exemple, pour le réchauffement climatique (nous ne présenterons pas les indicateurs associés aux autres limites), l'indicateur est la **concentration de CO₂** dans l'atmosphère⁶. Elle s'exprime en parties par million (ppm), c'est-à-dire en nombre de molécules de CO₂ pour un million de molécules dans l'air. Pendant la période 1850-1900 (période de référence parfois appelée « pré-industrielle »), la concentration de CO₂ était de 280 ppm [8]. **La concentration actuelle est de 420 ppm** (en augmentation de 2 ppm/an), nous plaçant dans une zone de risque.

La zone de risque a été définie par une valeur frontière (limite basse) à 350 ppm et une limite haute à 450 ppm. La limite basse correspond à la valeur qui a prévalu pendant les 11 000 dernières années (époque appelée *Holocène*), caractérisée par un climat stable et propice au développement humain. La limite haute correspond à une valeur au-delà de laquelle des changements majeurs et irréversibles sont attendus, et donc à l'entrée dans des conditions inconnues de l'humanité.

Limites planétaires et besoins humains : la difficulté est naturellement de respecter ces limites planétaires tout en respectant les besoins des populations et le droit au développement des pays pauvres. Par exemple, les 17 « objectifs de développement durable » (eau, éducation, santé, etc.), définis par l'ONU en 2015 et déclinés en 169 indicateurs, servent souvent de référence. La recherche de certains économistes porte sur la définition d'indicateurs quantitatifs plus adaptés que le produit intérieur brut (PIB) ou le taux de croissance et sur la conciliation des enjeux sociaux et des limites planétaires.

2.5 Raréfaction des ressources non renouvelables

La raréfaction des ressources n'a pas été intégrée dans les limites planétaires (à l'exception de l'eau douce qui est strictement indispensable à la vie) mais c'est une conséquence importante de la « grande accélération ».

La quantification des réserves minières est un exercice délicat : non seulement certaines sont mal connues, mais l'étendue des réserves économiquement viables dépend du prix de vente, et donc de la demande, ainsi que du prix de l'énergie utilisée pour l'extraction. Hubbert a développé un modèle (présenté au TD 1) visant à anticiper l'évolution de la production minière, qui prévoit une croissance exponentielle de la production stimulée par la croissance de la demande, puis un maximum (« pic de Hubbert ») suivi d'un lent déclin de la production. Malgré

6. Il existe aussi un autre indicateur, le forçage radiatif, qui a le mérite d'inclure l'ensemble des gaz à effet de serre, et pas uniquement le CO₂. Cette quantité sera définie dans le chapitre Climat.

certains succès de la méthode, il est difficile de réaliser des prédictions précises ; il faut aussi veiller à ne pas interpréter le pic (maximum de production) comme une date au-delà de laquelle les réserves seraient totalement épuisées. En tout cas, pour beaucoup de ressources, il semble que les meilleurs gisements aient déjà été exploités et l'extraction devient de plus en plus coûteuse, consommatrice en énergie et polluante, ce qui accroît l'impact humain – parfois dramatique - de cette activité et les risques géopolitiques, dépendances, conflits armés, etc.

Exemple : les matériaux pour le numérique. La production des équipements numériques est particulièrement consommatrice de ressources naturelles (et elle a aussi une empreinte carbone en très forte hausse). Ainsi, un smartphone se compose de 50 à 70 éléments chimiques différents [16], en quantités très faibles, si bien qu'il est très difficile de les récupérer sur un appareil usagé : leur taux de recyclage est quasi-nul et ils finissent parfois dans des décharges dangereuses, souvent situées dans des pays en développement.

Par exemple, les écrans à cristaux liquides, omniprésents dans les smartphones, téléviseurs, etc., présentent généralement une couche conductrice transparente d'ITO (indium tin oxide), ce qui a considérablement accru la demande d'indium. Ce métal était historiquement obtenu comme sous-produit du raffinage du zinc, à un coût limité mais dans des quantités limitées par l'activité d'extraction du zinc. L'augmentation rapide de la demande a mené à des affirmations telles que « il reste 5-10 ans d'indium » qui ne se sont pas vérifiées. En revanche, extraire davantage d'indium, pour lui-même et non comme co-produit du zinc, augmente considérablement son coût.

3 Changement climatique et empreinte carbone

3.1 La Terre se réchauffe

Le chapitre Climat de ce cours décrira le mécanisme par lequel **certains « gaz à effet de serre » (GES), principalement le CO₂, provoquent un réchauffement de l'atmosphère**. Le principe de base, l'effet de serre, a été décrit par Fourier dès 1824, et le réchauffement climatique anticipé par Arrhenius dès 1896. Cependant, démontrer la réalité du réchauffement climatique d'une part, et son caractère **anthropique** (= dû à l'activité humaine) d'autre part, a fait appel à des travaux titaniques de mesures, de collecte de données et de simulations dans de nombreuses disciplines.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)⁷ des Nations Unies a été créé en 1988 afin de faire l'état des lieux de la littérature scientifique et d'établir un consensus scientifique pouvant guider la communauté internationale⁸. Notez bien que, si la plupart des experts du GIEC sont des chercheurs spécialistes des domaines considérés, le rôle du GIEC n'est pas de *produire* des résultats de recherche, mais de *faire la synthèse* des résultats de recherche *déjà publiés*.

Après plusieurs décennies de controverses, il est maintenant établi avec certitude,

- que la température de l'atmosphère s'est réchauffée par rapport à la période 1850-1900 (période de référence parfois appelée « pré-industrielle »),
- et que ce réchauffement est bien d'origine anthropique.

Le réchauffement climatique s'est établi, sur la décennie 2011-2020, à +1,1°C par rapport à la période pré-industrielle (fig. 1.5) [7].

Il s'agit naturellement d'une moyenne temporelle ; ça ne signifie pas qu'il fait chaque jour de l'année exactement 1,1°C de plus qu'en 1850 – au contraire, le réchauffement climatique renforce la probabilité d'événements extrêmes, vagues de chaleur mais aussi inondations ou vagues de froid, selon la région et la période de l'année. Cette valeur de +1,1°C est aussi une moyenne spatiale sur l'ensemble de la surface terrestre ; le réchauffement local est plus élevé au niveau des pôles et moins au niveau de l'équateur⁹.

7. en anglais, IPCC pour *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

8. La rédaction des rapports du GIEC est un processus extrêmement codifié, mené par des experts scientifiques mais auquel les gouvernements sont associés. Le sixième rapport du GIEC, publié en 2021, comprend 9000 pages. Il a été rédigé par 787 experts et expertes scientifiques, en s'appuyant sur plusieurs dizaines de milliers d'articles scientifiques et plus de cent mille commentaires par des relecteurs extérieurs. La science du climat fait donc, à travers les rapports du GIEC, l'objet d'un travail de synthèse et de recherche du consensus dont l'envergure n'est égalée dans aucun autre domaine scientifique. Ce sixième rapport est résumé dans un « rapport de synthèse » [7] de 85 pages, destiné aux non-spécialistes, dont seront issus la plupart des chiffres et graphes ci-dessous.

9. Par exemple, le gouvernement français, lançant en 2023 une consultation prospective sur l'adaptation de la France au réchauffement climatique, faisait l'hypothèse du scénario « pessimiste » de +3°C au niveau mondial en 2100 et cela correspondait à +4°C en France métropolitaine.

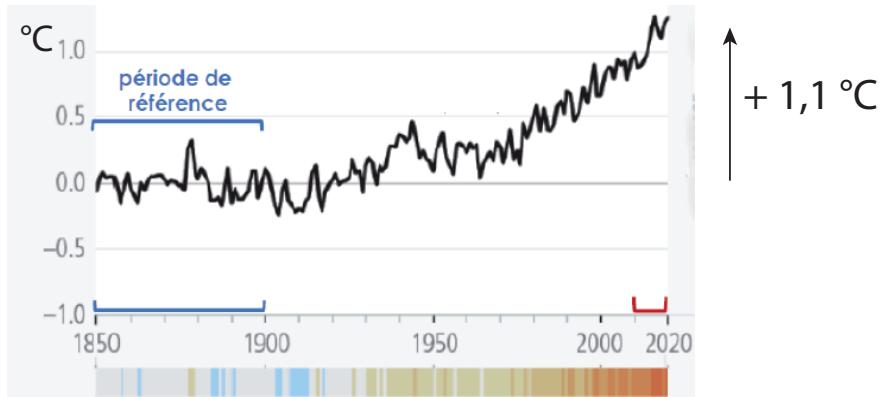


FIGURE 1.5 – Variation de la température moyenne à la surface du globe, par rapport à la période pré-industrielle 1850-1900 (figure traduite du sixième rapport du GIEC [7]). La moyenne est décanale (c'est-à-dire obtenue par une moyenne glissante sur 10 ans).

3.2 Les conséquences du changement climatique

Parmi les conséquences du réchauffement climatique, le rapport du GIEC évoque notamment l'acidification de la surface des océans, l'augmentation d'extrêmes en température et des périodes de sécheresse, l'élévation du niveau de la mer, la fonte des glaciers, l'augmentation de pluies extrêmes, la diminution des rendements agricoles. Celles-ci auront des impacts très significatifs sur la biodiversité mais aussi sur la santé humaine (fig. 1.6).

Une conséquence notable du réchauffement est l'élévation du niveau des océans, due à la dilatation de l'eau quand elle se réchauffe¹⁰. Selon les scénarios, elle sera de 0,3 à 1 m en 2100 [7]. Même si le réchauffement climatique s'atténue ensuite, comme les transferts de chaleur entre l'atmosphère et les océans se font sur des échelles de temps beaucoup plus lentes, le niveau des océans continuera d'augmenter pendant les siècles suivants, atteignant entre 2 et 6 m au bout de 2000 ans dans l'hypothèse +2°C [7].

Il est difficile d'anticiper exactement les répercussions humaines du changement climatique dans chaque région du globe. Les travaux prospectifs synthétisés dans le rapport du GIEC (fig. 1.6) laissent prévoir des conséquences très sérieuses pour un réchauffement global de +1,5°C, et de plus en plus catastrophiques à mesure que l'on augmente à +2, +3 ou +4°C : **une différence de « seulement » 0,5 ou 1°C aura un impact colossal.**

3.3 Les différents gaz à effet de serre et leur origine

Le principal contributeur au réchauffement climatique est le CO₂ dont les émissions proviennent à près de 90 % de la combustion des énergies fossiles et le reste principalement du changement d'usage des sols - déforestation en particulier.

Il faut garder en tête qu'en-dehors du CO₂, d'autres GES jouent un rôle notable :

- le méthane (CH₄) provoque un effet de serre plus fort que le CO₂, mais plus réduit dans le temps en raison de sa durée de présence plus faible dans l'atmosphère ; ses émissions proviennent à ≈ 40% des fuites lors de l'extraction des combustibles fossiles et de l'acheminement du gaz naturel, et à ≈ 40% de l'agriculture [14],
- le protoxyde d'azote (N₂O) est issu aux deux tiers de l'agriculture [11],
- certains halocarbures (comportant une liaison C-F : CF₄, CHF₃, SF₆), produits industriellement et utilisés pour différentes applications, sont très faiblement présents dans l'atmosphère mais sont des GES extrêmement puissants.

Remarque : le principal gaz qui contribue à l'effet de serre sur Terre est la vapeur d'eau présente en grande quantité. Néanmoins la vapeur d'eau n'est pas comptée dans la liste des gaz qui contribuent au réchauffement climatique (c'est-à-dire à l'augmentation de l'effet de serre) pour des raisons thermodynamiques : un gaz à une température donnée ne peut accueillir qu'une quantité finie de vapeur d'eau

10. Une autre contribution, moins importante, est la fonte des glaciers.

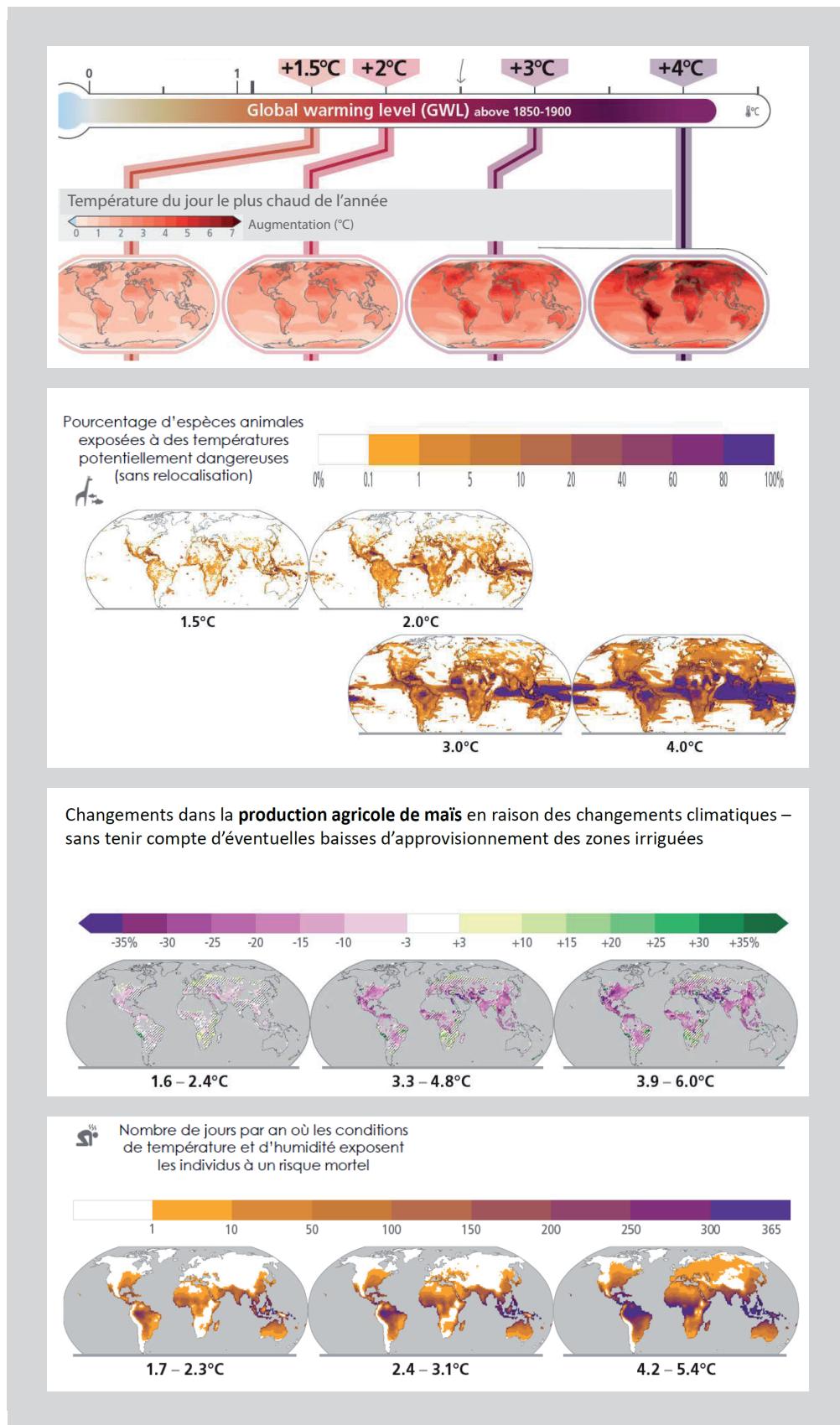


FIGURE 1.6 – Quelques conséquences du réchauffement climatique, en fonction de la hausse de température atteinte (figure adaptée du sixième rapport du GIEC [7]).

(c'est la pression de vapeur saturante). Au-delà, l'eau se liquéfie ou se condense en neige. À température donnée, la concentration de vapeur d'eau est donc bornée dans l'atmosphère. Si on atteint cette limite, toute la vapeur d'eau supplémentaire va retourner sur Terre sous forme liquide (pluie) ou solide (neige)¹¹.

Afin de pouvoir « sommer » l'effet de ces différents gaz, en pondérant leur pouvoir plus ou moins fort de contribution à l'effet de serre, on définit une unité commune :

Définition : masse d'équivalent CO₂

La masse d'équivalent CO₂ associée à l'émission d'une quantité donnée d'un GES (et, par extension, associée au bien ou à l'activité responsable de cette émission) est la masse de CO₂ émis qui aurait le même effet^a que ce GES.

L'unité est le kgCO₂e (notez le « e » pour « équivalent » - à ne pas confondre avec kgCO₂), parfois notée aussi kgCO₂eq ou eqkgCO₂c.

a. Par "aurait le même effet", on entend "entraînerait le même forçage radiatif". Comme tous ces gaz n'ont pas la même durée de vie dans l'atmosphère, la définition de l'équivalent CO₂ dépend de la durée sur laquelle on calcule l'effet du GES : en général, on choisit 100 ans.

Les valeurs pour les principaux GES sont tabulées dans le tableau 1.1.

masse d'équivalent CO ₂	
1 kg de CO ₂	1 kgCO ₂ e (par définition)
1 kg de CH ₄	27 kgCO ₂ e
1 kg de N ₂ O	265 kgCO ₂ e
1 kg de CF ₄	6,6 tCO ₂ e

TABLE 1.1 – Masses d'équivalent CO₂ des principaux gaz à effet de serre [9].

Les émissions mondiales de GES, une fois toutes exprimées dans cette même unité, se répartissent ainsi (2019) : 75 % CO₂, 18 % CH₄, 4 % N₂O, 2 % halocarbures [9].

3.4 Trajectoires de réduction des émissions de GES

Le changement climatique appelle des politiques de deux types :

- des politiques d'**atténuation**, qui visent à minimiser la hausse de température en réduisant les émissions de GES,
- et des politiques d'**adaptation**, qui visent à modifier les modes de vie et les infrastructures pour limiter les conséquences négatives du changement climatique.

Ces deux types de politiques sont indispensables, mais peuvent parfois entrer en concurrence : par exemple, la généralisation des dispositifs de climatisation tend à augmenter les émissions de gaz à effet de serre et peut constituer un exemple de « mal-adaptation ».

Nous n'aborderons ci-dessous que les enjeux d'*atténuation* du changement climatique, dans lesquels s'insèrent les aspects énergétiques qui font l'objet du prochain chapitre. La communauté internationale a établi différents textes de référence sur la stratégie globale d'atténuation du changement climatique, le principal étant les accords de Paris signés en 2015.

11. Néanmoins, la pression de vapeur saturante dépend de la température : plus la température est grande, plus il peut y avoir de vapeur d'eau. On a donc affaire ici à un effet indirect : le réchauffement climatique augmente la température de l'atmosphère, donc augmente la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère qui dans ce cas aura un effet réchauffant (c'est une boucle de *rétro-action*).

Les accords de Paris fixent l'objectif de rester en-dessous de +1,5°C (cette cible ambitieuse ne sera sans doute pas atteinte) et en tout cas « nettement en-dessous » de +2°C.

La mise en œuvre des accords de Paris repose sur des « contributions » (objectifs de baisse des émissions de GES) choisies volontairement par chaque État et dont le non-respect n'entraîne pas de sanction. Le sixième rapport du GIEC établit que (fig. 1.7(a))

- les contributions (cibles des États) actuelles sont insuffisantes : elles mènent à +2,8°C en 2100 ;
- les politiques réelles actuellement menées ne permettent pas d'atteindre ces contributions : elles mènent à +3,2°C en 2100.

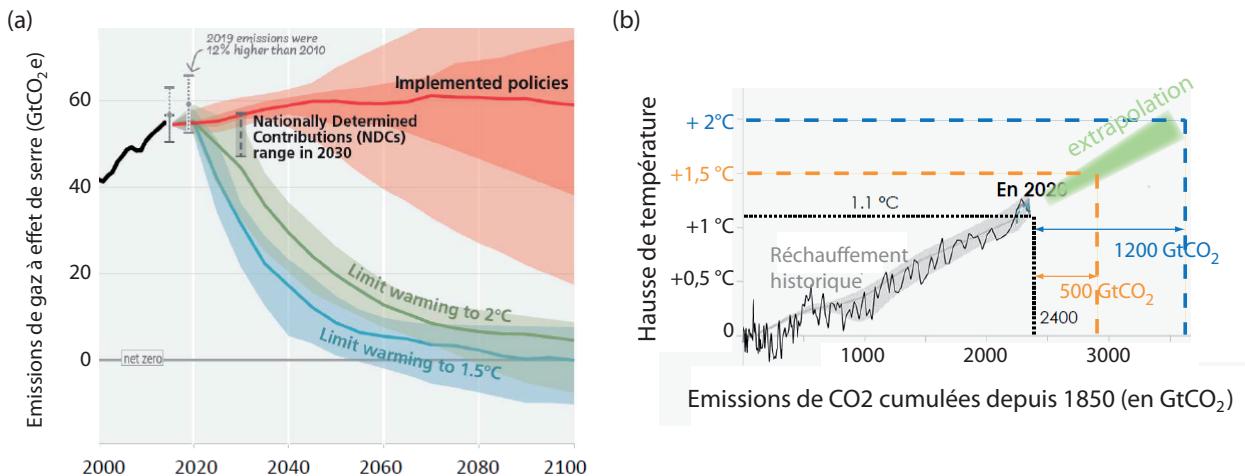


FIGURE 1.7 – (a) Trajectoires d'évolution des émissions annuelles de gaz à effet de serre - noir : mesurée jusqu'à 2015 ; rouge : anticipée d'après les politiques actuellement mises en œuvre ; vert : à respecter pour rester en deçà de +2°C ; bleu : à respecter pour rester en deçà de +1,5°C. [7] (b) Élévation de température en fonction de la masse de CO₂ émise (cumulée depuis 1850) : mesures de 1850 à 2020 (trait noir [7]) et représentation schématique de la notion de budget carbone.

Une fois émis, les GES restent présents très longtemps dans l'atmosphère ¹². C'est pourquoi **la température sur Terre à un moment donné sera déterminée par la somme cumulée de toutes les émissions de GES jusqu'à ce moment**, et pas seulement par les émissions de GES à ce moment. Par conséquent,

- si nous parvenons à réduire drastiquement les émissions de GES, nous pourrons stabiliser le réchauffement climatique, mais pas revenir en arrière ;
- l'enjeu n'est pas seulement la date à laquelle une réduction drastique des GES sera atteinte, mais aussi la trajectoire de réduction par laquelle cet objectif sera atteint (il vaut mieux une trajectoire de réduction rapide dès le départ plutôt qu'une réduction initialement faible et qui augmente très progressivement).

La relation entre la quantité de GES émise dans le futur et l'élévation de température qui sera engendrée peut être extrapolée à partir des données passées (fig. 1.7(b)). Sur la période 1850-2020, l'élévation de température est approximativement proportionnelle aux émissions de CO₂ cumulées à partir de 1850, avec un coefficient de proportionnalité de 0,45°C par Tt de CO₂ [7] (1 Tt = 10¹² t). En supposant que cette relation linéaire restera vérifiée à l'avenir ¹³, on en déduit l'élévation de température qui sera atteinte pour une quantité donnée d'émissions de CO₂.

12. Par exemple, s'agissant du CO₂ émis dans l'atmosphère, une grosse moitié est éliminée en une centaine d'années, mais une petite portion restera beaucoup plus longtemps. La durée de présence du méthane dans l'atmosphère est plus faible : une dizaine d'années.

13. C'est une hypothèse assez forte, qui n'est valable que pour une certaine plage de valeurs d'émissions de GES. Comme pour tout phénomène physique, on peut s'attendre à ce que la relation entre la cause (émissions de GES) et la conséquence (température) cesse d'être linéaire au-delà d'un certain seuil d'émissions. Par exemple, la hausse de température favorise la fonte des glaces, qui diminue

Définition : budget carbone

Le budget carbone associé à une température cible (par exemple +1,5°C) est la quantité de gaz à effet de serre (cumulée dans le temps) qu'il ne faut pas dépasser pour rester en deçà de cette température.

On peut l'exprimer en tonnes de CO₂ équivalent (ce qui est noté tCO₂e).

Ainsi, les émissions de CO₂ cumulées de 1850 à 2019 étant d'environ 2400 GtCO₂e, il restait ¹⁴ en 2020 :

pour ne pas dépasser +1,5°C : budget carbone \simeq 500 GtCO₂e,

pour ne pas dépasser +2°C : budget carbone \simeq 1000 GtCO₂e.

Or, les émissions mondiales annuelles sont actuellement : \simeq 50 GtCO₂e (dont \simeq 40 Gt de CO₂).

Alors que le réchauffement climatique a longtemps paru un danger lointain, les connaissances récentes montrent que ce sont les efforts des prochaines décennies qui seront déterminants. Pour respecter la limite de +2°C, il faudrait ¹⁵,

par rapport à 2010, baisser les émissions de 27 % pour 2030 et 63 % pour 2050

et pour rester en-dessous de +1,5°C, il faudrait baisser de 43 % pour 2030 et de 84 % pour 2050 (cf fig. 1.7) [7].

3.5 Empreinte carbone

Exemple : chaque année, une vache laitière produit de l'ordre de 5000 litres de lait et émet de l'ordre de 150 m³ de méthane d'origine digestive [22], soit 0,02 kg de méthane par litre de lait. On en déduit qu'un litre de lait a une contribution d'environ 0,5 kgCO₂e. ¹⁶

Dans l'exemple précédent, la quantité « 1,2 kgCO₂e / litre » constitue le *facteur d'émission* du lait : le facteur d'émission d'un bien ou d'une activité est l'empreinte carbone associée à une unité (kg de beurre, km parcouru en avion, litre d'eau chaude, etc.) de ce bien ou de cette activité. De même, l'empreinte carbone d'un kWh d'énergie électrique (voir prochain chapitre), constitue un facteur d'émission de l'électricité.

La connaissance de facteurs d'émission d'éléments de base donne accès à l'empreinte carbone d'éléments plus spécifiques : par exemple, à partir des facteurs d'émission de l'électricité, du transport routier ou aérien, du chauffage urbain etc, Sorbonne Université réalise (comme demandé par la loi) son bilan d'émissions de GES : on peut le consulter [ici](#).

Émissions directes et émissions totales

On distingue, dans l'estimation des émissions de GES liées à une activité (ou à un bien),

- les **émissions directes** qui ont lieu directement pendant l'activité (ou pendant l'usage), et
- les **émissions totales** causées par l'ensemble de l'activité (pour un bien, l'ensemble des étapes de la production au recyclage), déterminées par une **analyse du cycle de vie**.

l'albédo de la Terre, et favorise le réchauffement climatique futur (mécanisme de rétro-action positive), qui serait ainsi plus important que prévu. Par ailleurs, la hausse de la concentration de CO₂ favorise la pousse des arbres, lesquels captent davantage de CO₂, ce qui freinera le réchauffement climatique (mécanisme de rétro-action négative). Différents mécanismes de rétro-action seront discutés dans le chapitre Climat et feront l'objet du TD 7. Savoir si la relation GES-température continuera d'être linéaire ou si apparaîtront des non-linéarités, voire des « points de bascule » au-delà desquels le réchauffement serait beaucoup plus fort, est un enjeu de recherche actuel très important.

14. Pour être plus précis, l'affirmation du rapport du GIEC, qui s'appuie sur des raisonnements plus élaborés que celui qui est présenté ici, est que le budget carbone restant, à partir de début 2020, était de 500 GtCO₂e pour avoir une probabilité de 50 % de rester en-dessous de +1,5°C. Pour rester en-dessous de +2°C, suivant que l'on se donne une probabilité de 67 % ou 83 % de réaliser l'objectif, le budget correspondant est de 1150 ou 900 GtCO₂e - point B.5.2 du rapport de synthèse [7].

15. Notez bien que le GIEC a pour rôle d'énoncer des affirmations fondées scientifiquement, pas des recommandations sur les politiques à mener. Le choix de la cible (1,5°C ou +2°C) relève d'une décision politique, actée notamment lors de la signature des accords de Paris. Le GIEC dit seulement quelle trajectoire doit être suivie si on décide d'atteindre cette cible.

16. Il s'agit de la part liée à ce seul poste (méthane d'origine digestive). Cette valeur est cohérente avec l'empreinte carbone totale d'un litre de lait, estimée à 1,2 kgCO₂e dont 0,8 kgCO₂e associé à la production agricole (et le reste à l'emballage et au transport) [13].

Par exemple, pour un déplacement en voiture, les émissions directes sont les émissions de CO₂ dues à la combustion du carburant (si c'est une voiture à moteur thermique), mais l'analyse du cycle de vie doit aussi inclure la construction de la voiture, l'extraction du pétrole, la fin de vie du véhicule etc. Si les émissions directes sont souvent connues avec une bonne précision, l'analyse du cycle ¹⁷ de vie peut être beaucoup plus complexe (et poser des questions de méthodologie : faut-il inclure la construction de la route dans l'empreinte du déplacement en voiture ?) et entachée d'une forte incertitude.

Émissions territoriales et empreinte carbone

À l'échelle d'un pays, on distingue

- les **émissions territoriales** (parfois aussi appelées « inventaire national »), qui ont lieu sur le territoire du pays, et sur lesquelles portent les accords de Paris car elles peuvent être comptabilisées avec davantage de précision par chaque état,
- et l'**empreinte carbone**, l'ensemble des émissions de GES associée à la consommation du pays, où qu'aient lieu ces émissions.

Ainsi, l'empreinte carbone somme les émissions territoriales et les émissions associées aux biens importés, et retranche les émissions associées aux biens exportés. Son calcul est particulièrement délicat puisqu'il nécessite la connaissance des circuits de production des biens consommés dans le pays.

3.6 Cas de la France

En France, les émissions territoriales sont d'environ 6 tCO₂e par personne, et l'empreinte carbone de l'ordre de 9 tCO₂e par personne [21].

Les principaux postes de cette empreinte carbone correspondent au transport, particulièrement routier, à l'habitat, notamment le chauffage et la construction, et à l'alimentation (fig. 1.8). *On peut, si on le souhaite, estimer son empreinte carbone individuelle grâce au site Nos gestes climat de l'ADEME.*

L'empreinte carbone par personne est 1,5 fois plus élevée en France que la moyenne mondiale (**6 tCO₂e par personne**). De manière générale, les émissions de GES par personne présentent de fortes disparités en fonction du pays, mais aussi des revenus, du lieu d'habitation (ville ou campagne), etc. Dans le monde, les 10 % de foyers les plus émetteurs de GES représentent entre 34 et 45 % des émissions, tandis que les 50 % de foyers les moins émetteurs de GES représentent 13-15 % des émissions [7]. Nous ne développerons pas ici cet aspect mais il pose naturellement des questions politiques et géopolitiques majeures de répartition et d'acceptabilité des efforts. Le GIEC note aussi que 41 % de la population mondiale vit dans des pays dont l'empreinte est inférieure à 3 tCO₂e par personne, et qu'il est possible d'éradiquer la pauvreté extrême dans ces pays et d'assurer un niveau de vie décent (logement, santé, éducation, mobilité, ...) sans augmenter significativement les émissions mondiales [9].



FIGURE 1.8 – Empreinte carbone moyenne par personne et par an (en kgCO₂e), en France en 2017, répartie sur les différents postes de la vie quotidienne [24], avec la décomposition fine des postes principaux.

Les objectifs de la France dans sa Stratégie Nationale Bas Carbone, en conformité avec les "contributions" annoncées par l'Union européenne, sont de réduire les émissions territoriales de 55 % pour 2030 et d'atteindre 1 tCO₂e par personne en 2050. Notons

- qu'ils portent sur les émissions territoriales uniquement - puisque ce sont elles qui sont concernées par les accords de Paris ; cependant l'enjeu est bien sûr de diminuer l'ensemble de notre empreinte carbone, et pas d'exporter nos émissions par la délocalisation de la production,

17. Pour être plus exact, l'analyse du cycle de vie prend en compte non seulement les différentes étapes de l'activité, mais aussi les différentes atteintes à l'environnement : GES, consommation d'eau, impact sur la biodiversité, occupation des sols etc.

- qu'ils portent sur la date de référence 1990 (et non 2010 comme dans le rapport du GIEC), ce qui facilite en apparence l'atteinte de l'objectif puisque les émissions territoriales ont déjà baissé de 25 % entre 1990 et 2018 pour la France (et la baisse est la même à l'échelle de l'Union européenne – chiffres disponibles sur [ce site](#)).

4 Érosion de la biodiversité

Les impacts des activités humaines sur le vivant ne datent pas d'hier ; on peut évoquer en particulier la disparition notable des grands mammifères, qu'on appelle la mégafaune, vers la fin de la dernière glaciation (entre -13000 et -9000) ou la déforestation dans l'Europe du Moyen-Âge. Cependant, ces tendances à l'érosion (voire à l'effondrement) de la biodiversité se sont considérablement amplifiées avec le développement industriel et la mondialisation des échanges.

Afin de faire l'interface entre les scientifiques et les décideurs, l'IPBES (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques ¹⁸) a été créée en 2013 sur le modèle du GIEC. Un premier rapport d'un millier de pages, faisant la synthèse de plus de 15 000 documents scientifiques sur le sujet, a été publié en 2019 [10]. Il souligne notamment que des objectifs de préservation de la nature ne pourront être atteints sans transformations économiques, sociales, politiques et technologiques profondes.

On peut distinguer plusieurs types de biodiversité :

- **la diversité écosystémique** ; certains milieux naturels sont particulièrement menacés - les récifs coralliens le sont de manière critique, et les milieux humides (marais, mangroves etc) sont en très fort recul (ils ont disparu à 85 % au niveau mondial [10]),
- **la diversité spécifique** (diversité des espèces) ; des familles entières d'espèces sont menacées d'extinction (fig. 1.9(a)) ; les espèces les plus touchées sont celles qui vivent dans les écosystèmes menacés ¹⁹.
- **la diversité génétique** au sein d'une espèce ; dans le cas notamment des espèces domestiques, l'uniformisation des cultures et des élevages aboutit à ne sélectionner que quelques variétés de plantes et races animales, ce qui diminue la résilience de l'agriculture, par exemple au changement climatique, aux maladies etc.

Enfin, de manière générale, les populations animales sont en déclin : les populations d'espèces terrestres ont ainsi baissé de 40 % depuis 1970 [10].

L'érosion de la biodiversité possède des origines diverses dont la complexité ne saurait être appréhendée en quelques lignes. Le rapport de l'IPBES distingue et quantifie, à l'échelle mondiale, **cinq grandes contributions** (fig. 1.9(b)) :

- les changements d'utilisation des terres (exemples : remplacement d'un milieu naturel par un espace agricole ; remplacement d'un milieu forestier naturel par une plantation d'arbres ; constructions urbaines ou routières etc.),
- l'exploitation directe de la nature : chasse, pêche etc. - c'est le premier facteur en milieu marin,
- le changement climatique, qui a un rôle de plus en plus important,
- les pollutions (eaux usées, métaux lourds, boues toxiques, plastiques, engrains etc),
- l'introduction d'espèces exotiques envahissantes ²⁰.

Il est encore temps d'inverser la tendance. Il existe de nombreux exemples de conservation qui ont marché et le vivant est extrêmement prompt à rebondir quand la pression est supprimée (tant que des seuils d'irréversibilité ne sont pas franchis).

18. La notion de services écosystémiques, sur laquelle le rapport de l'IPBES met l'accent, correspond à ce que la nature apporte à l'humanité : alimentation, médecine, services « non matériels » comme les loisirs ou la spiritualité etc.

19. Concernant la France, on pourra trouver une discussion de la situation de la biodiversité sur [ce site gouvernemental](#). D'après ce site, la moitié des espèces menacées en France vivent dans les milieux humides ; ces milieux ont reculé de moitié entre 1960 et 1990.

20. « exotiques » veut dire « extérieures à l'écosystème considéré ». Les lapins européens sont un exemple célèbre d'espèce exotique envahissante introduite en Australie au XVIII^e siècle. Les îles sont des milieux particulièrement fragiles de ce point de vue : les espèces locales se sont développées de façon très isolée et sont peu capables de réagir à l'arrivée d'espèces nouvelles.

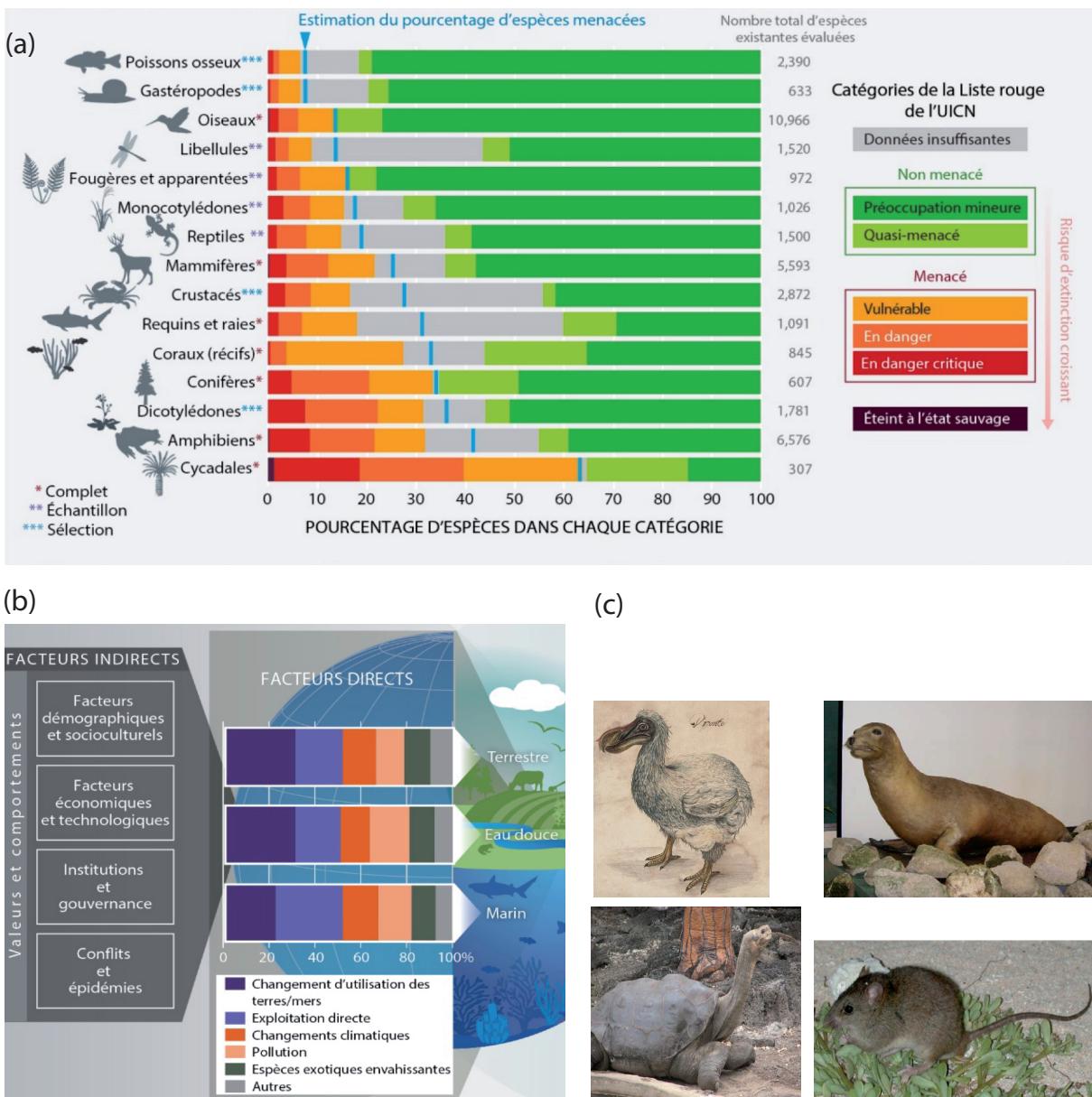


FIGURE 1.9 – (a) Pourcentage d'espèces menacées dans les grands groupes d'êtres vivants. [10] (b) Facteurs agissant sur les écosystèmes terrestres, d'eau douce et marins, l'impact des facteurs directs étant estimé en %. Ces deux documents sont issus de la version française du rapport de l'IPBES. [10] (c) Quelques espèces actuellement considérées comme éteintes en raison de l'activité humaine – perturbation de l'habitat, chasse excessive, introduction d'espèces envahissantes (source : Wikipedia) : le dodo de l'île Maurice (éteint fin XVII^e siècle), l'otarie du Japon (éteinte depuis 1950), la tortue géante de Pinta aux Galapagos (éteinte depuis 2021), le rat de Bramble Cay (éteint depuis 2018 – pour cet animal, c'est le réchauffement climatique qui est en cause, par des tempêtes répétées frappant son habitat).

Compétences à maîtriser

- ✓ Connaître les limites planétaires et savoir donner brièvement, de manière qualitative, des causes et des conséquences de leur franchissement - notamment connaître les causes de l'érosion de la biodiversité.
- ✓ Connaître quantitativement les objectifs des accords de Paris et savoir manipuler les unités de mesure des gaz à effet de serre (ppm, kgCO₂, kgCO₂e), les notions et les ordres de grandeur (budget carbone et émissions mondiales, empreinte carbone par personne en France) associés.

5 Annexes

5.1 Notion de croissance exponentielle (*)

Profitons de cette occasion pour discuter le terme "croissance exponentielle", qui joue un rôle capital en physique et est, dans une certaine mesure, passé dans le langage commun comme synonyme de "croissance très rapide".

Une fonction $f(t)$ croît exponentiellement si elle est de la forme

$$f(t) = K e^{\alpha t}$$

où K est une constante (et $\alpha > 0$ pour que la fonction soit bien croissante - mais on pourrait faire le même raisonnement avec $\alpha < 0$ pour une décroissance exponentielle).

Ainsi, pour analyser le caractère exponentiel des fonctions de la figure 1.1, on peut tracer la courbe $f(t)$ en échelle semi-logarithmique, c'est-à-dire que les distances sur l'axe des ordonnées sont proportionnelles à $\ln(f)$. Si la fonction $f(t)$ est bien exponentielle, on a $\ln f = \ln K + \alpha t$, c'est-à-dire que la courbe en échelle semilog est une droite.

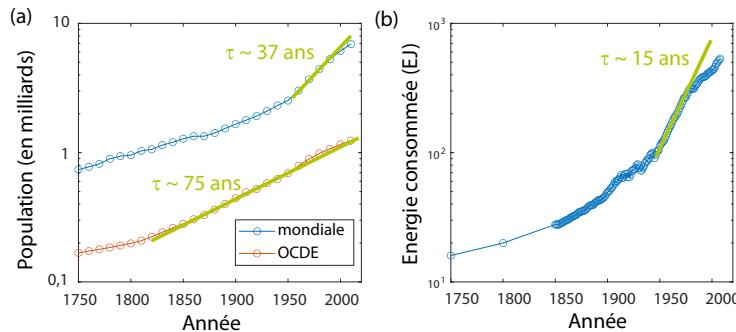


FIGURE 1.10 – Tracé des courbes de population et de consommation primaire d'énergie en échelle semilog, à partir des données de la figure 1.1. Les traits verts indiquent les portions de courbe proches d'une croissance exponentielle.

Nous pouvons par exemple tracer les données de population ou de consommation d'énergie en échelle semilog (fig. 1.10). La population mondiale montre bien une croissance exponentielle à partir de 1950, et jusqu'à 2000 environ, après quoi la croissance s'infléchit. La croissance des pays de l'OCDE, quant à elle, est plus régulière : elle connaît une croissance exponentielle, mais plus lente (α plus petit), depuis 1800. La consommation d'énergie connaît une croissance parfaitement exponentielle de 1950 à 1975, puis s'infléchit et suit de nouveau plus ou moins une exponentielle, plus lente, de 1982 à 2007.

Quelle est la signification d'une croissance exponentielle ? Au bout d'un temps τ , la fonction $f(t) = K e^{\alpha t}$ a été multipliée par un facteur $e^{\alpha\tau}$. Si on prend par exemple $\tau = \ln(2)/\alpha$, au bout d'un temps τ la fonction f a été multipliée par 2 ($f(t + \tau) = 2 \times f(t)$, quel que soit t). Ainsi, dire que $f(t)$ a une croissance exponentielle revient à dire qu'il existe un temps τ tel que f aura doublé au bout de τ .

Sur la figure 1.10, les valeurs de τ associées sont indiquées à côté des portions de courbes correspondant à des croissances exponentielles. Sur la période 1950-1980, la consommation d'énergie a été multipliée par 2 en 15 ans et par 4 en 30 ans.

Chapitre 2

Énergie

Sommaire

1	Introduction	21
2	Énergie. Les concepts physiques	22
2.1	Énergie et puissance : définitions, unités et ordres de grandeur	22
2.2	Les différentes formes d'énergie	24
2.3	Les principes de la thermodynamique	25
2.4	Quelques exemples de conversions d'énergie	25
2.5	Notion d'efficacité	26
2.6	Une "explication" du second principe (*)	26
2.7	À retenir	27
3	Focus sur la conversion d'énergie thermique	28
3.1	Le moteur thermique. Principe général	28
3.2	La machine à vapeur	29
3.3	La centrale thermique (électrique)	29
3.4	Éfficacité du moteur thermique	30
3.5	Pour aller plus loin : efficacité en énergie <i>versus</i> maximum de puissance (*)	31
3.6	Peut-on améliorer la récupération de chaleur ?	32
3.7	Un autre type de machines thermiques : les extracteurs de chaleur	33
3.8	Focus sur la pompe à chaleur (*)	35
4	Énergie et société. Concepts et définitions complémentaires	35
4.1	Énergie primaire	35
4.2	Vecteur énergétique (ou énergie secondaire)	36
4.3	Énergie finale (<i>versus</i> énergie utile)	37
4.4	Chaîne de conversions : de l'énergie primaire à l'énergie utile.	37
4.5	Énergies de stock, énergies de flux	38
4.6	Consommation d'énergie : à l'échelle du Monde	38
4.7	Consommation d'énergie : à l'échelle d'une société	39
4.8	Consommation d'énergie : à l'échelle individuelle	40
5	Sources d'énergie	42
5.1	Combustibles fossiles	42
5.2	Énergie nucléaire	43
5.3	Énergies renouvelables : introduction	44
5.4	Hydroélectricité	44
5.5	Énergie éolienne	45
5.6	Bio-énergie	48
5.7	Énergie solaire	49
6	Caractéristiques des différentes sources d'énergie	52
6.1	Densité énergétique	52

6.2	Puissance produite par m ² au sol (*)	53
6.3	Taux de retour énergétique (*)	54
6.4	Intermittence	54
6.5	Coût (*)	56
6.6	Intensité carbone	56
6.7	Empreinte matériaux (*)	57
7	Conclusion	58
8	Annexes	60
8.1	Énergie totale, énergie interne, énergie thermique (*)	60

Objectifs

- ✓ Connaître les différents types d'énergie et l'utilisation qui en est faite par l'humain
- ✓ S'approprier les ordres de grandeur en jeu
- ✓ Identifier les limites physiques (fondamentales ou techniques) sur les quantités utilisables
- ✓ Appréhender les impacts des différents modes de production d'énergie. Ébaucher une vision systémique

1 Introduction

Le Soleil étant un corps chaud, il rayonne de l'énergie et émet en particulier de la lumière. C'est une expérience dont on peut faire l'expérience fréquemment (en regardant une ampoule à filament, un métal chauffé "à blanc", de la lave, etc.). De part sa taille, il émet une puissance électromagnétique colossale, et la petite fraction qui arrive en haut de l'atmosphère terrestre est elle aussi gigantesque comparée aux ordres de grandeur que nous manipulons habituellement. Le *flux surfacique*¹ (au sommet de l'atmosphère) est de 340 W m^{-2} , soit une puissance totale² de 173 000 TW.

Cette énergie solaire nous intéresse à plusieurs titres : d'une part, elle constitue le moteur du système Terre vu comme une machine thermique, c'est-à-dire que c'est elle qui entraîne les mouvements de l'atmosphère, des océans, les précipitations, etc. ; d'autre part, elle constitue une source très importante d'énergie, plus de 8 000 fois supérieure à la consommation annuelle d'énergie de l'humanité, de l'ordre de 20 TW actuellement.

Ainsi formulé, l'énergie peut sembler abondante, et, de fait, l'énergie solaire est indéniablement une source d'avenir. Pour autant, les enjeux sont la captation et la conversion de cette énergie sous des formes utiles, économiquement viables et les moins impactantes possibles (pour les écosystèmes et nous-mêmes). Les principes de la Physique mettent non seulement des **limites sur les quantités disponibles** d'énergie mais aussi sur **l'efficacité dans les conversions d'une forme d'énergie vers une autre**.

Au final, l'énergie est une denrée précieuse (elle ne se consomme pas mais sa forme utile se dégrade comme nous le verrons). Les conséquences sont nombreuses et significatives. En particulier, une importante consommation d'énergie ne peut pas être sans conséquence sur l'environnement ; à grande échelle, il n'existe pas d'énergie « propre ».

Pour autant, cela ne signifie que toutes les sources d'énergie se valent et soient à mettre sur le même plan. Le but de ce cours est précisément de donner des éléments de comparaison entre sources d'énergie, en particulier sur les aspects physiques et de comprendre les enjeux du nécessaire basculement vers les énergies renouvelables.

1. énergie par unité de temps et de surface

2. reçue par l'ensemble de la surface de la sphère au sommet de l'atmosphère

2 Énergie. Les concepts physiques

2.1 Énergie et puissance : définitions, unités et ordres de grandeur.

L'énergie est une notion protéiforme et omniprésente dans notre vie quotidienne. En Physique, l'énergie est un concept profond qui joue un rôle central du fait de sa connexion avec le concept d'interaction. L'énergie n'est pas une chose en soi mais une propriété de la matière en interaction.³

En pratique, toute transformation physique fait intervenir un échange d'énergie et c'est précisément la définition qui nous intéresse et que l'on retiendra ici :

Définition et unité de l'énergie

L'énergie est l'unité de compte des changements d'état des systèmes physiques.

Son unité dans le système international est le joule (symbole J).

Par exemple, de l'énergie est mise en jeu dans les changements d'état suivants :

- modification de vitesse
- modification de position dans un champ (gravitationnel, électromagnétique)
- modification de température
- modification de forme
- modification de luminosité
- modification de structure chimique
- modification de structure nucléaire

Ainsi, pour mettre en mouvement un objet, initialement immobile, jusqu'à une vitesse v , il faut lui fournir l'énergie $E = mv^2/2$ (à altitude constante).

De même, si un objet de masse m est au repos à la position $z = 0$, pour l'amener au repos à la position $z = Z > 0$, il faut lui fournir l'énergie $E = \Delta E_p = mgZ$ (dans le champ de pesanteur terrestre).

De tels processus se rencontrent partout et tous les jours dans notre quotidien (véhicules pour la mobilité, industrie pour la manufacture d'objets, chauffage, éclairage, etc.). Changer l'état matériel du monde nécessite de l'énergie. Rien d'étonnant donc, compte tenu de la quantité impressionnante d'énergie mobilisée par l'humanité, que notre environnement soit radicalement impacté.

Unité dans le système international :

Une analyse dimensionnelle⁴ conduit à : [Énergie] = [Masse].[Longueur]².[Temps]⁻²

Ainsi, l'unité d'énergie dans le système international, le joule, est l'équivalent d'un $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$.

Exemples : soulever une pomme (de masse $m \sim 100 \text{ g}$) d'un mètre requiert typiquement 1 joule ($\Delta E_p = mgh$). L'énergie cinétique d'un moustique⁵ est de l'ordre de 10^{-5} J (10 microjoules), celle d'un avion de ligne⁶ de 2.10^{10} J (20 milliards de joules). Quant à la consommation annuelle d'énergie primaire en France (en 2022, par l'ensemble des habitants), elle est de 10^{19} J (10 exajoules) ...

On voit sur ces exemples que l'ordre de grandeur des énergies mises en jeu peut être drastiquement différent d'un processus à un autre. Cette disparité explique (outre des raisons parfois historiques) l'existence de différentes

3. Pour la physique théorique moderne, l'énergie est définie au travers d'une symétrie particulière, la translation dans le temps : tout système indépendant du temps présente un invariant (c'est-à-dire une quantité qui se conserve) et cet invariant est l'énergie du système. Un système qui ne conserve pas son énergie est en interaction avec l'environnement extérieur, et cette interaction change son état physique.

4. en partant par exemple de l'expression d'une quantité homogène à une énergie que vous avez déjà rencontrée : « $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ », « $E_p = mgh$ », « $W = F.d$ », ...

5. $m \sim 5 \text{ mg}$, $v \sim 2 \text{ m.s}^{-1}$

6. $m \sim 500 \text{ tonnes}$, $v \sim 1 \text{ 000 km.h}^{-1}$

unités d'énergie, appropriées au domaine physique considéré (par exemple, l'électron-volt pour la physique atomique et nucléaire).

Quelques autres unités :

- **La tonne équivalent pétrole (tep) (ou toe : *tonne of oil equivalent*, en anglais) :** Unité utilisée dans l'industrie ou en économie, 1 tep correspond à la chaleur dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole brut "moyen" :

$$1 \text{ tep} = 41,868 \text{ GJ} \text{ (valeur fixée par convention, car la valeur réelle dépend du type de pétrole).}$$

Ainsi la consommation annuelle d'énergie primaire en France précédemment évoquée devient dans cette unité 238 Mtep, soit 3,5 tep par personne (tout se passe comme si chacun et chacune d'entre nous brûlait en moyenne chaque année 3,5 tonnes de pétrole pour l'ensemble de sa consommation).

- **la calorie :** Unité de thermodynamique, c'est l'énergie qu'il faut fournir pour échauffer un gramme d'eau pure de 14,5°C à 15,5°C (sous une pression de 1 bar) :

$$1 \text{ calorie} = 4,18 \text{ J}$$

Les nutritionnistes utilisent le kilocalorie (ou Calorie avec une majuscule). La ration énergétique alimentaire quotidienne d'un humain est d'environ 2400 kcal ($\sim 10 \text{ MJ} \sim 0,24 \text{ kep}$).

- **la tonne de TNT** est l'énergie libérée par l'explosion d'une tonne de l'explosif chimique trinitrotoluène :

$$1 \text{ t de TNT} = 4,184 \text{ GJ.}$$

Cette unité est surtout utilisée dans le domaine militaire.

Définition de la puissance

La puissance est une quantité d'énergie par unité de temps :

$$\mathcal{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Son unité dans le système international est le watt (symbole W). $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$.

Elle exprime la vitesse à laquelle s'effectue un transfert d'énergie ⁷. Un flux d'énergie (par exemple solaire) est homogène à une puissance.

Exemples : soulever une pomme (de masse $m \sim 100 \text{ g}$) d'un mètre **en une seconde** requiert typiquement $1 \text{ W} = (1 \text{ J})/(1 \text{ s})$. La consommation d'énergie primaire annuelle en France ($\sim 10 \text{ EJ}$) correspond à une puissance moyenne de $(10^{19} \text{ J})/(365 \times 24 \times 3600 \text{ s}) = 317 \text{ GW}$, soit environ 4700 W par habitant.

Quelques ordres de grandeur à retenir

Puissance typique d'une éolienne : 5 MW

Puissance typique d'un réacteur nucléaire : 1 GW

Consommation annuelle mondiale d'énergie primaire (en 2022) : 20 TW

La définition de la puissance permet de réécrire $\Delta E = \mathcal{P}\Delta t$ et de définir une nouvelle unité d'énergie :

Définition : le wattheure

Le wattheure est une unité **d'énergie** correspondant à la production ou consommation de puissance 1 W pendant 1 heure :

$$1 \text{ Wh} = (1 \text{ W}) \times (1 \text{ h}) = 3600 \text{ J}$$

Pour la plupart des usages de la vie quotidienne, une unité appropriée est le kilowattheure (kWh), comme le montre les exemples suivants.

Quelques exemples d'énergie consommée ou fournie par :

7. La puissance est donc l'équivalent d'un débit d'énergie : par analogie avec un tonneau contenant un stock de fluide (l'énergie), la puissance caractérise le débit d'énergie avec lequel on puise dans le stock en question (comme le ferait le débit d'eau d'un robinet en sortie du tonneau).

- un radiateur de 1000 W pendant 1h : 1 kWh
- un repas ~ 1 kWh
- un litre d'essence ~ 10 kWh
- un feu de cheminée (10 kg de bois) ~ 30 kWh

La consommation d'énergie primaire en France (2022) devient : $(10 \text{ EJ}) / 3600 = 2780 \text{ TWh}$, soit $40\,900 \text{ kWh / personne / an}$, ou encore **112 kWh / personne / jour**.

Remarque importante : cette valeur correspond à la consommation "territoriale", elle n'inclut pas l'énergie indirectement consommée via la production de produits importés. Typiquement, quelle serait cette valeur ?

2.2 Les différentes formes d'énergie

En lien avec les phénomènes qui leur donnent naissance, on distingue couramment différentes formes d'énergie :

- **énergie mécanique** :
 - cinétique : énergie due au mouvement de translation ou de rotation⁸ d'un solide. Pour une translation (non-relativiste), $E_c = \frac{1}{2}mv^2$.
 - potentielle : énergie stockée dans une configuration de l'objet du fait de l'existence d'un champ gravitationnel. Dans le cas du champ terrestre, $E_p = mgz$ (où z est une altitude par rapport à un point de référence).
- **énergie thermique** : énergie contenue dans la dynamique microscopique d'un grand nombre d'atomes ou de molécules (degrés de liberté de translation + vibration + rotation).
- **énergie électromagnétique** : énergie contenue dans les champs électriques et magnétiques. Elle peut se propager sous forme de radiation électromagnétique (ex. : lumière visible) ou peut se transmettre au moyen de circuits électriques.
- **énergie chimique** : énergie stockée dans les liaisons chimiques.
- **énergie nucléaire** : énergie stockée dans les liaisons du noyau atomique.
- **énergie de masse** : la masse elle-même est une forme d'énergie ($E = mc^2$ au repos). Importante pour comprendre les processus nucléaires mais complètement hors sujet pour un usage pratique (la conversion de masse en énergie nécessite de l'antimatière ...). On n'en parlera jamais par la suite⁹.

Plutôt que des énergies *absolues*, on s'intéresse toujours à des variations d'énergie. Par exemple, lorsque nous parlons de l'énergie potentielle d'une balle de tennis maintenue à 2 m au-dessus du sol, il s'agit de la différence entre ses énergies en deux endroits. Lorsque nous parlons de l'énergie de liaison d'un atome (énergie chimique) ou d'un noyau (énergie nucléaire), on se réfère à son énergie par rapport à celle de ses constituants isolés.

Remarque : cinétiqe versus potentielle

Les noms donnés aux formes précédentes (mécanique, électromagnétique, ...) ont une utilité pour le langage courant. Mais à un niveau plus fondamental, il n'existe en fait que deux types d'énergie : cinétiqe ou potentielle.

- Les énergies du **mouvement** (macroscopique ou microscopique) sont de type **cinétique**. Dans cette catégorie : énergie mécanique cinétiqe (mouvement du centre de masse macroscopique), énergie thermique (mouvements microscopiques), propagation d'une onde électromagnétique ou mécanique (marée, son), ...
- Les énergies stockées dans une **configuration** du système sont de type **potentielle**. Dans cette catégorie : énergie gravitationnelle, énergie des liaisons chimiques, énergie nucléaire, énergie de masse. On peut relier ces différentes formes d'énergies potentielles aux quatre interactions fondamentales : gravitationnelle, électromagnétique, forte (responsable de la cohésion des noyaux atomiques), et faible (responsable de la radioactivité et de la fusion de l'hydrogène en hélium, entre autres).

8. L'énergie de rotation d'un solide, autour d'un axe fixe dans le référentiel du centre de masse, est : $E_c^{rot} = \frac{1}{2}J\omega^2$ avec J le moment d'inertie et ω la vitesse angulaire.

9. Attention à ne pas faire de confusion, plus loin, avec l'énergie de la biomasse, qui est simplement de l'énergie thermique obtenue par combustion de végétaux (ou du gaz obtenu par fermentation de ces végétaux).

2.3 Les principes de la thermodynamique

Vous avez vu (ou vous verrez) en thermodynamique ces principes ; on les formule ici de façon à mettre l'accent sur les aspects pertinents pour ce cours.

Conservation de l'énergie (1^{er} principe)

L'énergie totale d'un système isolé (= fermé) se conserve. Elle ne peut pas changer si rien (matière ou énergie) n'entre ni ne sort des frontières du système.

- Tout en se conservant, l'énergie d'un système peut varier d'une forme à une autre au gré de son évolution.
- Pour changer la valeur de l'énergie totale d'un système, il faut qu'il y ait un échange avec l'extérieur (l'environnement du système).

Ces échanges - entre formes d'énergie au sein du système isolé ou entre le système et l'extérieur - se font par l'intermédiaire d'un travail et/ou d'un transfert thermique (ou quantité de chaleur). Ces notions et la formulation du premier principe sont précisées en Annexe (8).

Remarque importante : forme ordonnée *versus* désordonnée d'énergie

La chaleur est un transfert d'une forme *désordonnée* d'énergie. L'énergie thermique correspond en effet à l'agitation thermique des constituants du système (donc à l'énergie cinétique de très nombreuses particules aux mouvements erratiques).

Par contraste, le travail est un transfert *ordonné* d'énergie, et, par extension, on parle parfois de formes ordonnées de l'énergie pour toutes celles susceptibles d'être intégralement converties en travail, c'est-à-dire toutes les formes d'énergie autres que thermique : énergie mécanique, cinétique¹⁰ ou potentielle (gravitationnelle, électromagnétique, élastique, chimique...).

Il existe de nombreuses formulations du second principe de la thermodynamique (faisant en général intervenir le concept d'entropie). On retiendra ici la formulation suivante :

Inéquivalence entre formes de l'énergie (2nd principe)

On peut intégralement convertir du travail en chaleur, mais l'inverse n'est pas vrai (la conversion de chaleur en travail est toujours incomplète).

Remarque : le travail et la chaleur étant des transferts d'énergie, et non des formes d'énergie, l'énoncé précédent est une version synthétique d'une formulation qui plus rigoureusement serait :

On peut intégralement transformer les formes ordonnées d'énergie (entre elles ou vers une forme désordonnée) mais **la conversion d'une forme désordonnée (thermique) vers une forme ordonnée est toujours incomplète**.

On reviendra sur l'importance de cet énoncé après avoir défini la notion d'efficacité d'une conversion d'énergie.

Remarque Les expressions « production d'énergie » et « consommation d'énergie » sont physiquement incorrectes, puisque l'énergie se transforme et se transfère mais ne se crée pas et ne disparaît pas. Elles signifient en réalité :

- « transformation d'une forme d'énergie en une autre utilisable »
- « utilisation d'une forme d'énergie utile ».

2.4 Quelques exemples de conversions d'énergie

- Une bille dans un bol, lâchée sans vitesse initiale à l'une des extrémités effectue un mouvement de va-et-vient entre les deux extrémités du bol et convertit son **énergie mécanique potentielle** (maximale lorsque la bille est aux extrémités) en énergie **cinétique** (maximale lorsque la bille est au fond du bol).

10. Il s'agit ici de l'énergie liée au mouvement (ordonné) d'ensemble du système et non à celle liée aux mouvements désordonnés de ses constituants.

En l'absence de frottements, le mouvement se poursuivrait à l'infini. En situation réelle (présence de frottements), la bille finit par s'équilibrer au fond du bol : l'énergie mécanique totale s'est progressivement transformée en énergie thermique par échange de chaleur (à cause des frottements).

- L'interaction gravitationnelle entre le Soleil, la Lune et la Terre donne lieu au phénomène des marées. Le déplacement relatif de ces corps dans le champ **gravitationnel** total ¹¹ donne lieu à une conversion en énergie **cinétique** (déplacement de masses d'eau) et à un tout petit peu de dissipation d'énergie par frottements (des masses d'eau sur le sol).
- Une ampoule à incandescence de 100 W reçoit 100 J d'énergie par seconde du réseau électrique. (1) Cette énergie **électrique** est convertie en énergie **thermique** par la résistance du filament (par effet Joule) (2) Le filament, s'étant fortement réchauffé, **rayonne** cette énergie sous forme d'énergie électromagnétique ¹², dont une partie (~ 3 W) seulement est comprise dans le spectre visible (le reste étant dans l'infra-rouge). On a donc dans cet exemple une chaîne de 2 conversions successives :

$$\text{électrique} \xrightarrow{(1)} \text{thermique} \xrightarrow{(2)} \text{électromagnétique} \left\{ \begin{array}{l} \text{rayonnement visible} \\ + \text{infrarouge} \end{array} \right.$$

2.5 Notion d'efficacité

Pour que s'effectue une conversion entre une forme initiale et une ou plusieurs formes finales d'énergie, il faut un **convertisseur** (tel que par exemple une ampoule à incandescence, une machine à vapeur, etc.).

On définit l'*efficacité* (ou *rendement*) η d'un convertisseur par le rapport entre l'énergie utile (l'énergie obtenue sous la forme souhaitée) et l'énergie injectée en entrée dans le convertisseur :

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{entrée}}}$$

N. B. : Dans une chaîne de conversion, l'efficacité globale est le produit des efficacités des différentes conversions.

Exemple : pour l'ampoule à incandescence évoquée ci-dessus, l'efficacité de la conversion *électrique* $\xrightarrow{(1)}$ *thermique* est d'environ 100 % ($\eta_1 = 1$) mais celle de la conversion *thermique* $\xrightarrow{(2)}$ *rayonnement visible* est de 3 % ($\eta_2 = \frac{3}{100}$) et au final, l'efficacité de l'ampoule est de 3 % ($\eta = \eta_1 \times \eta_2$).

Remarques :

- L'exemple précédent illustre bien notre énoncé du 2nd principe : la forme ordonnée qu'est l'énergie électrique peut être intégralement transformée en chaleur mais la conversion de chaleur en une autre forme (ici, énergie lumineuse) ne peut être que partielle.
- La notion d'énergie *utile* dépend de ce que l'on souhaite en faire : utile à quoi ? Si le but est de s'éclairer, l'efficacité de l'ampoule est de 3 %. En revanche, s'il était de se chauffer, elle est alors de 100 % puisque le rayonnement (visible ou infrarouge), une fois absorbé par les différents objets de la pièce, est converti en énergie thermique.

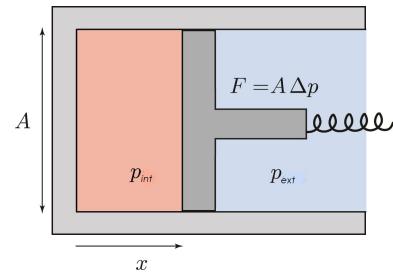
2.6 Une "explication" du second principe (*)

On cherche à comprendre pourquoi la conversion de chaleur est toujours incomplète ($\eta = \frac{W}{Q} < 1$). Prenons l'exemple illustré sur la figure ci-dessous où la pression d'un gaz chaud est utilisée pour produire du travail mécanique en agissant sur un piston.

11. Somme des interactions gravitationnelles à deux corps : $E_{\text{Terre-Lune}} + E_{\text{Terre-Soleil}} + E_{\text{Soleil-Lune}}$, où l'on a négligé l'influence des autres planètes.

12. cf. rayonnement du corps noir, partie 5.7.1.

Initialement, les gaz à gauche et à droite du piston, sont à la même pression et la même température. Le piston est donc à l'équilibre : $p_{\text{int}} = p_{\text{ext}}$ et $T_{\text{int}} = T_{\text{ext}}$. Tout en maintenant fixe la position du piston, de la chaleur est apportée au gaz à gauche du piston (partie rouge) : l'énergie interne de ce gaz augmente et sa pression devient $p_{\text{int}} = p_{\text{ext}} + \Delta p$, ce qui résulte en une force de pression ($F = A\Delta p$) sur le piston (s'exerçant de la gauche vers la droite).



On autorise alors le piston à se déplacer :

- le travail fourni au piston (cédé par le gaz) est : $\delta W = p_{\text{int}}dV = p_{\text{int}}Adx$
- le travail que l'on peut récupérer (par exemple par un ressort relié au piston) est : $\delta W_{\text{utile}} = Fdx = \Delta pAdx$ (remarque : le travail effectué est proportionnel à p_{int} mais le travail utile à Δp seulement)

L'efficacité de cette conversion (d'énergie thermique en travail mécanique utile) est donnée par $\eta = \frac{\delta W_{\text{utile}}}{\delta W}$, donc par $\eta = \frac{\Delta p}{p_{\text{int}}} = \frac{p_{\text{int}} - p_{\text{ext}}}{p_{\text{int}}}$.

Pour expliciter ces termes, prenons par simplicité le cas du gaz parfait dont la pression est donnée par $p = \frac{nRT}{V}$. On a alors :

$$\eta = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{T_{\text{int}}} = 1 - \frac{T_{\text{ext}}}{T_{\text{int}}}$$

Conclusions :

- De façon remarquable, cette expression est en fait celle de l'efficacité maximale avec laquelle le travail mécanique peut être extrait de l'énergie thermique (efficacité de Carnot). On peut l'établir de façon plus générale dans le cadre d'un cycle ditherme en introduisant le concept d'entropie.
- On a $\delta W_{\text{utile}} < \delta W$. Où va la différence d'énergie ? Lorsque le piston se déplace vers la droite, il effectue effectivement un travail mécanique mais, en plus, il percute les molécules "devant lui" (gaz de la partie bleue, à droite). Ce faisant, il transfère de l'énergie sous forme de chaleur au gaz à l'extérieur du piston. Seul l'excès du travail effectué par le gaz intérieur par rapport au travail effectué par le gaz extérieur est disponible pour effectuer un travail mécanique utile.
- De façon plus générale, la conversion de chaleur en travail ne peut être parfaitement complète car elle revient à transformer des mouvements microscopiques désordonnés (ceux des particules) en un mouvement d'ensemble ordonné, parfaitement dirigé dans une direction et un sens (ici, le mouvement macroscopique du centre de masse du piston, de la gauche vers la droite).

En conclusion, la pression d'un gaz chaud peut être utilisée pour produire du travail mécanique et c'est le principe même d'une machine à vapeur ou d'une centrale thermique ¹³. Mais au cours de ce processus, il y a inévitablement une **perte d'énergie dans l'environnement** (dégradation d'énergie ordonnée en énergie désordonnée).

2.7 À retenir

- Il existe une **limite fondamentale** [2nd principe de la thermodynamique] à la conversion d'énergie thermique en une forme ordonnée (mécanique, électrique, ...). C'est une limite essentielle à l'efficacité de dispositifs tels que les centrales thermiques, moteurs thermiques, climatiseurs, ... Mais aussi dans des processus naturels tels que la formation de vents à partir de gradients thermiques.
- Même si cette limite fondamentale ne s'applique pas aux autres types de conversion, il existe en pratique presque toujours une source de dissipation (ex. : frottements mécaniques, effet Joule, ...) transformant une partie de l'énergie initiale en énergie cinétique microscopique désordonnée, c'est-à-dire en chaleur.

Par exemple, l'énergie mécanique fournie par un cycliste n'est pas intégralement transformée en énergie de mouvement du vélo.

Au final, dans toute transformation, une partie de l'énergie se dégrade en chaleur. Une machine efficace minimise cette *dégradation de l'énergie* afin de maximiser l'énergie **utile**^a.

a. Par *utile*, on entend *susceptible de donner lieu à un travail*.

13. l'écoulement de vapeur actionne des turbines.

Remarques :

– L'énergie ne se consomme pas mais sa forme utile se dégrade en chaleur. On parle pour la chaleur d'énergie *dégradée*, car sous cette forme, elle ne peut être reconvertise intégralement en une autre forme. À l'inverse, on parle parfois pour l'électricité de forme *noble*, car on peut faire de cette énergie n'importe quel usage, avec une excellente efficacité (la transformer en travail mécanique dans un moteur, ou en faire de la chaleur dans une résistance chauffante).

– C'est pour cette raison que le chauffage électrique résistif (par effet Joule) est très découragé voire interdit (pour les nouveaux bâtiments) dans certains pays (Danemark, Suisse), puisque cela revient à dégrader de l'énergie électrique, alors qu'il existe d'autres moyens d'obtenir de la chaleur.

3 Focus sur la conversion d'énergie thermique

L'énergie thermique joue un rôle central dans nos systèmes énergétiques, ce qui mérite qu'on s'attarde plus spécifiquement sur sa conversion dans les *machines thermiques* (moteur thermique, pompe à chaleur, etc.)¹⁴.

Avant 1800, la plupart de l'énergie consommée par l'humain l'est sous forme de chaleur pour le chauffage et la cuisson (par combustion du bois). Une part plus faible l'est sous forme d'énergie mécanique, principalement par la force humaine et animale, et de façon limitée par les moulins à vent et à eau.

À partir du 19^e siècle, le développement de la machine à vapeur, qui permet la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique, augmente considérablement l'utilité de la chaleur. À partir de là, nos sociétés développeront une dépendance sans cesse croissante à la combustion de ressources fossiles pour alimenter des moteurs thermiques, dont les deux principales finalités sont les transports et la génération d'électricité. Aujourd'hui, plus des deux tiers de l'énergie électrique mondiale provient d'énergie thermique produite par la combustion du charbon, du pétrole et du gaz naturel. Et la plupart des véhicules utilisés actuellement pour le transport, qu'il s'agisse d'automobiles ou d'avions à réaction, reposent sur des moteurs à combustion interne alimentés par des combustibles fossiles. Même certaines sources d'énergie non fossiles comme les centrales solaires thermiques à concentration et les centrales nucléaires dépendent de moteurs thermiques pour la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique et électrique. Au final, aujourd'hui, **plus de 90 % de l'énergie consommée dans le monde repose sur une utilisation (soit directe soit à une étape intermédiaire) de l'énergie thermique**¹⁵

3.1 Le moteur thermique. Principe général

Spontanément, entre deux systèmes à des températures différentes s'établit un transfert thermique du corps le plus chaud vers le plus froid¹⁶. Il est possible de mettre à profit ce transfert pour en retirer un travail. Le système agit alors comme un moteur thermique :

moteur thermique : dispositif qui convertit (une partie de) l'énergie thermique en mouvement mécanique [voir le schéma de principe (2.1)]

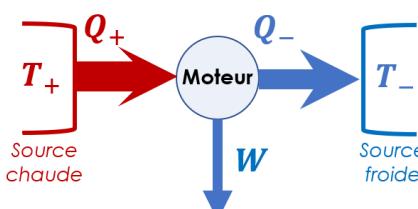


FIGURE 2.1 – Schéma de principe du moteur thermique. Un flux de chaleur, du chaud vers le froid, permet d'extraire du travail mécanique utile.

14. Une machine thermique est un dispositif permettant de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique, et vice versa. Elle fait subir à un fluide des transformations cycliques au cours desquelles le fluide échange avec l'extérieur de l'énergie sous forme de travail et de chaleur.

15. Les sources non thermiques se limitent à l'énergie hydraulique, éolienne et photovoltaïque.

16. d'une casserole de soupe chaude vers l'air ambiant, ou de l'air ambiant vers une boisson froide ; ou vers vos pieds à partir du sable chaud si vous êtes à la plage.

On injecte de la chaleur Q_+ pour récupérer du travail mécanique W . Le dispositif ne convertit pas intégralement la chaleur en travail ; en raison du second principe, une partie Q_- est inévitablement (*fatalement*) rejetée - elle est parfois appelée pour cette raison **chaleur fatale**¹⁷.

Pour que la chaleur s'écoule spontanément au travers du moteur, il faut donc une différence de température $\Delta T = T_+ - T_- > 0$ entre ce qui est appelée **la source chaude** (à la température T_+) et **la source froide** (T_-).

Différents dispositifs correspondent à ce schéma de conversion *thermique → mécanique* :

- la centrale thermique : une chaudière produit de la vapeur qui fait tourner des turbines
- le moteur d'automobile : la combustion de carburant provoque une augmentation abrupte de température dans un cylindre, ce qui produit une expansion rapide du gaz contenu dans le cylindre et donne lieu à un mouvement de piston (ensuite, toute une mécanique permet de transformer le mouvement rectiligne du piston en mouvement de rotation de l'arbre moteur, ce qui fait tourner les roues de la voiture et la fait avancer).
- Le flux d'énergie thermique du Soleil sur la Terre produit des gradients de température qui mettent en mouvement des masses d'air (énergie cinétique du vent)

On présente rapidement certains de ces exemples avant de revenir sur leur efficacité théorique.

3.2 La machine à vapeur

La 1^{ère} machine à vapeur en service (figure 2.2) avait pour but de pomper l'eau dans les mines de charbon inondées.

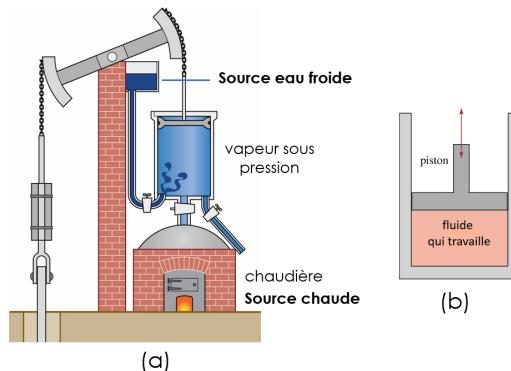


FIGURE 2.2 – a) Schéma de la 1^{ère} machine à vapeur (Thomas Newcomen, 1712) pour pomper l'eau dans les mines. b) zoom sur le piston (partie bleue de la figure a). Figures adaptée de la référence [1].

Principe du piston en mouvement de va-et-vient Une source de chaleur (chaudière) vaporise de l'eau, qui pousse un piston (vers le haut) en se dilatant. Puis, l'ajout d'eau froide condense la vapeur : le piston redescend.

L'exemple de cette machine n'est pas seulement historique mais emblématique de la révolution industrielle. Elle décuple l'usage du charbon en entraînant un effet d'emballage (ou *boucle de rétroaction positive*) : en retirant de l'eau des mines, la pompe rend plus de charbon accessible ; or ce charbon alimente lui-même les chaudières de ces machines ; ce qui rend plus de pompes utilisables, donc moins d'eau dans les mines, etc

3.3 La centrale thermique (électrique)

Stricto sensu, une centrale thermique a pour but de produire de la chaleur (par combustion d'une ressource telle que le bois, le charbon, le gaz naturel, le gaz issu de déchets, etc). En fait, la plupart des centrales thermiques dans le monde ont aujourd'hui pour finalité une production d'électricité (par l'enchaînement de conversions *énergie thermique → mécanique → électrique*). Par rapport à la machine à vapeur précédente, il y a donc deux différences (fig. 2.3) : 1) le mouvement mécanique créé par la détente de vapeur est une rotation de turbines, 2)

17. De façon générale, la chaleur fatale est la « chaleur générée par un procédé qui n'en constitue pas la finalité première, et qui n'est pas récupérée ».

ces turbines entraînent un générateur d'électricité, appelé alternateur¹⁸ dont on ne parlera pas ici¹⁹ mais dont on retiendra que l'efficacité de conversion *mécanique* → *électrique* est très bonne (proche de 100 %). L'efficacité globale de la double conversion est donc en fait limitée par l'efficacité de la première (*énergie thermique* → *mécanique*)²⁰.

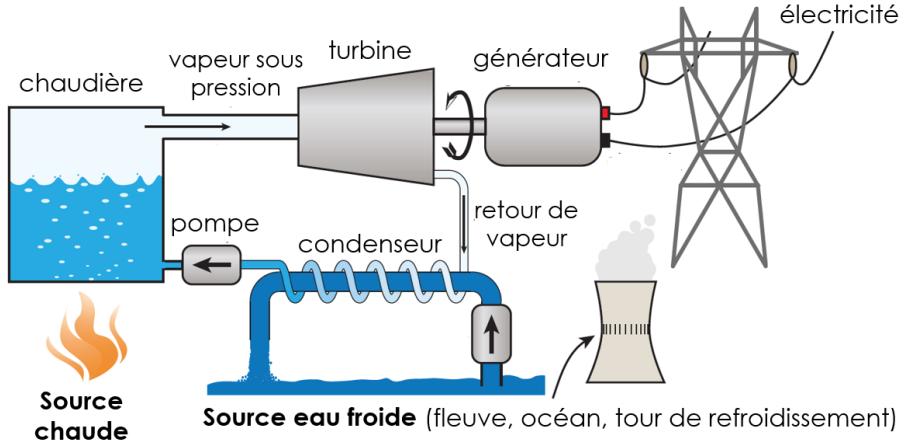


FIGURE 2.3 – Schéma de base de la plupart des centrales électriques thermiques (utilisant de la chaleur issue d'une source : fossile, nucléaire, solaire thermique, géothermique, bois, déchets). Une source de chaleur produit de la vapeur qui, en chemin, actionne une turbine connectée à un générateur d'électricité. Puis la vapeur retourne au condenseur où elle se condense en liquide, au contact thermique de la source froide. Figure adaptée de [3].

3.4 Éfficacité du moteur thermique.

Avec les notations du schéma (2.1), l'**efficacité** du dispositif (rapport de l'énergie "utile" sur l'énergie "dépensée en entrée") s'exprime comme :

$$\eta = \frac{W}{Q_+}$$

On établit en thermodynamique²¹ l'expression de l'**efficacité maximale** en fonction des températures T_+ et T_- des sources chaude et froide (ou de leur écart $\Delta T = T_+ - T_-$) :

$$\eta_C = \frac{\Delta T}{T_+} = 1 - \frac{T_-}{T_+} \quad \text{efficacité de Carnot} \quad (2.2)$$

N. B. : les températures doivent être exprimées en kelvins.

Commentaires :

- l'efficacité maximale est proportionnelle à ΔT . Si les deux thermostats sont à la même température ($T_+ = T_-$), le système est en réalité avec un unique thermostat. Dans cette situation l'efficacité maximale est nulle, il est impossible de créer du travail d'une source monotherme (c'est une formulation alternative du second principe).
- l'efficacité maximale tend vers 1 (c'est-à-dire 100 %) si $T_- = 0$ ou $T_+ \rightarrow \infty$. Ces deux cas limites sont impossibles physiquement.
- En pratique, la limite sur T_+ est fixée par la tenue en température des matériaux et, dans la plupart des situations réelles, la source froide est à la température ambiante, $T_- \sim 300$ K (c'est par exemple l'eau d'un fleuve ou de l'océan pour une centrale thermique).

18. Un rotor tourne dans un stator, de façon analogue à la dynamo d'un vélo.

19. Le phénomène physique, l'induction électromagnétique, sera vu au second semestre de L2.

20. $\eta = \eta_1 \times \eta_2 \sim \eta_1$, puisque $\eta_2 \sim 1$.

21. Il suffit d'exploiter les deux premiers principes, munis d'une relation liant entropie et température.

Le tableau 2.1 répertorie l'efficacité maximale théorique que l'on peut espérer (compte-tenu de la source chaude utilisée) et l'efficacité typique (celle réellement observée) de différents dispositifs.

	T_+	$\left(1 - \frac{T_-}{T_+}\right)$	efficacité réelle
Centrale géothermique	400 K	25 %	15 %
Centrale nucléaire	600 K	50 %	33 %
Centrale au charbon	800 K	62 %	33 %
Centrale au gaz	1500 K	80 %	45 %
Moteur à essence	2300 K	87 %	25 %

TABLE 2.1 – Différents moteurs thermiques avec la température de la source chaude, l'efficacité maximale de Carnot et l'efficacité réelle. La température de la source froide est $T_- \sim 300$ K dans tous les cas.

L'efficacité typique d'une centrale électrique est de 30 à 40 %, tandis que celle d'un moteur d'automobile est généralement de l'ordre de 15 à 25 %.

Peut-on exploiter les gradients thermiques des océans pour actionner des turbines ?

Oui. Cependant, faites le calcul de l'efficacité de ce moteur, sachant que $T_- = 5^\circ\text{C}$ et $T_+ = 25^\circ\text{C}$.

Complément On remarque (tableau 2.1) que l'efficacité des moteurs thermiques réels est approximativement la moitié de la valeur maximale possible. Ceci est en partie lié à des raisons pratiques mais aussi à une limitation de l'approche théorique utilisée que nous explicitons dans la section suivante.

3.5 Pour aller plus loin : efficacité en énergie versus maximum de puissance (*)

L'expression de l'efficacité de Carnot (équation 2.2) est obtenue dans l'hypothèse d'un transfert de chaleur *réversible*. En pratique, il existe toujours des sources d'irréversibilités (tels que des frottements de mécanismes) qui rendent cette limite inatteignable. Pour une transformation irréversible, on a $\eta < \eta_{\max}$.

Par ailleurs, même en l'absence de frottements, pour que le transfert soit réversible et donc être à la limite de Carnot, il faudrait que la transformation soit quasi-statique, c'est-à-dire décomposable en une succession infinie de transferts instantanés (mais infinitésimaux) de chaleur, ce qui conduirait à un temps total de transfert infiniment long et donc à une puissance ... nulle. Ce n'est pas vraiment ce qu'on attend d'une centrale thermique (plutôt puissante !). La limite de Carnot n'est donc ni atteignable, ni nécessairement souhaitable.

En formulant une hypothèse plus réaliste sur le transfert de chaleur ²², et en cherchant à **optimiser la puissance**, on aboutit à l'expression suivante (non-démontrée ici et non exigible) de l'efficacité d'un moteur dit *semi-idéal* :

$$\eta_{\text{semi-idéal}} = 1 - \sqrt{\frac{T_-}{T_+}} \quad (2.3)$$

L'expression (2.3) (due à Chambadal – Novikov – Curzon – Ahlborn) correspond à un transfert de puissance maximal et décrit très bien le cas des centrales thermiques, comme l'illustre le tableau 2.2. Ces systèmes ont en effet été conçus et optimisés pour un tel régime : maximum de puissance plutôt que maximum d'énergie transférée ²³.

22. On tient compte du fait que le transfert prend un temps fini, relié à la loi de conduction thermique de Fourier : $\frac{dQ}{dt} \propto \Delta T$.

23. La nuance est subtile mais illustre bien que puissance et énergie sont des concepts différents.

	T_+	$\left(1 - \sqrt{\frac{T_-}{T_+}}\right)$	efficacité réelle
Centrale géothermique	400 K	13 %	15 %
Centrale nucléaire	600 K	29 %	33 %
Centrale au charbon	800 K	39 %	33 %
Centrale au gaz	1500 K	55 %	45 %
Moteur à essence	2300 K	64 %	25 %

TABLE 2.2 – Efficacité réelle de différents types de moteurs thermiques comparée à la valeur théorique en régime de puissance maximale (exprimée en pourcentage, $\eta_{\text{semi-idéal}} \times 100$). La température de la source froide est $T_- \sim 300$ K dans tous les cas.

3.6 Peut-on améliorer la récupération de chaleur ?

Comme on l'a vu, un moteur thermique, même bien optimisé, « gaspille » beaucoup d'énergie puisqu'il convertit une fraction seulement de la chaleur en entrée en travail mécanique, rejetant le reste dans l'environnement (typiquement les deux tiers !). Ce rejet concerne les centrales thermiques en premier lieu mais aussi certaines activités industrielles (comme par exemple les aciéries). En plus d'être une perte d'énergie, rejeter localement de grandes quantités de chaleur dans l'environnement peut avoir des conséquences graves sur les écosystèmes. Certaines installations industrielles sont donc soumises à des seuils de température de rejets à ne pas dépasser. Que peut-on faire de cette chaleur ?

– Dans les centrales thermiques :

La chaleur fatale (Q_- dans le schéma 2.1) est perdue pour le moteur en question ²⁴ mais on peut néanmoins envisager de la récupérer pour la valoriser, soit pour produire à nouveau du travail mécanique dans un autre moteur (**cycle combiné**), soit directement en tant que chaleur pour le chauffage (**cogénération**).

- **Cycle combiné** : Réinjecter Q_- de façon à lui faire jouer le rôle de source chaude (Q_+ dans un deuxième cycle) ne présente un intérêt que si la température de la vapeur en sortie du premier cycle est suffisamment élevée (pour l'efficacité du deuxième cycle). Les turbines dites à gaz ²⁵ opèrent à très haute température ($\sim 1200^\circ\text{C}$) et en sortie le gaz est à suffisamment haute température ($\sim 550^\circ\text{C}$) pour servir de source de chaleur pour un autre cycle avec une turbine à vapeur cette fois (c'est donc un cycle combiné « turbine à gaz - turbine à vapeur d'eau »).

Par exemple, si les efficacités des cycles séparés sont respectivement $\eta_1 \sim 40\%$ et $\eta_2 \sim 30\%$, l'efficacité nette devient $\eta = \eta_1 + (1 - \eta_1) \times \eta_2 = 58\%$, ce qui constitue une amélioration considérable.

L'inconvénient est l'utilisation (actuellement) de gaz naturel (ressource fossile dont il faut se passer); une alternative est le biogaz (issu de ressources renouvelables).

- **Cogénération** : Si Q_- est à une température trop basse pour effectuer du travail mécanique de façon efficace, il reste toujours la possibilité de récupérer cette chaleur pour du chauffage (en l'injectant par exemple dans le réseau d'eau chaude sanitaire). Au final, du travail et de la chaleur sont générés simultanément d'une même centrale et l'efficacité finale de l'ensemble peut tendre vers 100 %.

Le potentiel pour la cogénération est a priori important. Selon des calculs du CEA ²⁶, la récupération de chaleur produite par les centrales nucléaires en France pourrait subvenir à la moitié des besoins de chaleur pour le chauffage. Il y a cependant des limitations pratiques : i) il est préférable que le centre de production soit proche de l'utilisation pour limiter les pertes de chaleur dans le transport et optimiser les coûts d'infrastructure : en grande majorité, la cogénération se fait à partir de centrales proches d'un réseau dense (centre urbain, Université) ou pour un usage interne au centre de production ; ii) il est difficile de combiner une efficacité élevée du cycle moteur avec une température adéquate au chauffage (car une efficacité élevée implique une température T_- basse, insuffisante pour l'eau de chauffage ; il faut donc sacrifier un peu d'efficacité sur le cycle produisant l'énergie mécanique/électrique. Au final, la cogénération reste peu développée : en Europe, la part de l'électricité produite par cogénération est de 11 % (Danemark : 40 %, France : 3 %).

24. Q_- ne peut pas être réinjectée simplement *telle quelle* dans le même moteur puisque sa température basse impliquerait une efficacité mauvaise, et même nulle (s'il n'y a plus de différence de température entre les sources chaude et froide). On peut cependant effectuer ce qu'on appelle un *cycle de surchauffe* (ou *cycle de régénération*), dans lequel la vapeur en sortie est surchauffée avant réinjection. Outre le gain en efficacité et l'augmentation de la puissance par cycle, l'intérêt est la diminution de l'humidité, néfaste aux aubes de turbines.

25. dans lesquelles, à la différence du schéma général de la figure 2.3 (turbine à vapeur), le fluide qui subit le cycle compression-détente n'est pas de l'eau mais le gaz issu de la combustion.

26. La pertinence économique de ces estimations fait débat, notamment pour EDF. Source : *Le Monde* (29/10/2013).

- Et plus généralement :

Outre les centrales thermiques, il existe beaucoup d'autres activités générant de la chaleur, par exemple les serveurs informatiques d'un *data center* ou d'un centre de calculs. En récupérant cette chaleur, on fait d'un « déchet » une ressource (pour chauffer un bâtiment par exemple). Par exemple, le réseau de chaleur de la commune de Dunkerque est alimenté par la chaleur fatale d'une aciéries proche.

D'autres systèmes sont producteurs de chaleur qui pourrait être a priori récupérée : les moteurs fixes ou moteurs de véhicules (chaleur perdue par le radiateur ou par le pot d'échappement), les rejets de fumées d'usines, la plupart des procédés de climatisation et de réfrigération, les procédés d'incinération des déchets, les réseaux d'évacuation des eaux usées (eaux chaudes de douches, vaisselles, lessives, ...).

Cependant, on conçoit bien qu'il existe des difficultés pratiques et économiques, en particulier pour les "gisements" trop petits ou trop diffus. Il semble difficile de récupérer efficacement la chaleur produite par un ordinateur individuel par exemple et pourtant la multiplicité de ce genre d'objets rend le total non négligeable.

En France, l'ADEME estime à 100 TWh/an le gisement théorique de chaleur fatale²⁷ dont un tiers facilement valorisable. C'est considérable puisqu'à titre de comparaison, l'énergie consommée pour alimenter l'ensemble des réseaux de chaleur est de l'ordre de 40 TWh/an²⁸. En pratique cependant, le déploiement de projets de captation reste très lent.

3.7 Un autre type de machines thermiques : les extracteurs de chaleur

Principe En inversant le fonctionnement du moteur, et donc en changeant le sens des flèches du schéma (2.1), on obtient un « extracteur de chaleur » dont le schéma de principe devient la figure (2.4). Cela revient à faire circuler de la chaleur dans le « mauvais sens » (du froid vers le chaud, donc à l'opposé du sens spontané), ce qui n'est possible que parce qu'on en paye le coût énergétique (injecté sous forme de travail externe W). C'est ainsi que fonctionnent un réfrigérateur, un congélateur, ou un climatiseur par exemple (le travail est apporté sous forme d'énergie électrique²⁹).

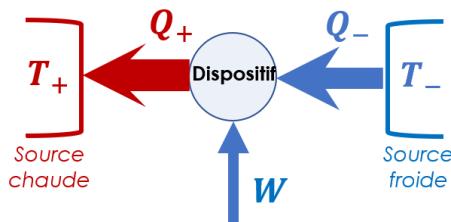


FIGURE 2.4 – Schéma de principe d'un « extracteur de chaleur » (réfrigérateur, climatiseur, pompe à chaleur). Du travail extérieur est fourni pour forcer un flux de chaleur du froid vers le chaud.

Coefficient de performance Il convient de définir l'*efficacité* de ce type de dispositif en fonction du but recherché : refroidir la source froide (réfrigérateur, climatiseur) ou chauffer la source chaude (pompe à chaleur). On l'appelle **coefficient de performance** (CoP en anglais) et on le définit par le rapport $\left[\frac{\text{effet désiré}}{\text{dépense}} \right]$ (voir le tableau 2.3).

En utilisant les 2 premiers principes de la thermodynamique, on obtient les limites maximales possibles :

$$-\text{ pour la pompe à chaleur : } \text{CoP}_{\text{chauffer}} \equiv \frac{Q_+}{W} \leq \frac{T_+}{T_+ - T_-} = \frac{1}{\eta_C} \quad (2.4)$$

$$-\text{ pour le climatiseur (ou le réfrigérateur) : } \text{CoP}_{\text{refroidir}} \equiv \frac{Q_-}{W} \leq \frac{T_-}{T_+ - T_-} = \frac{1}{\eta_C} - 1 \quad (2.5)$$

27. dans 4 secteurs : industrie (95 %), incinérateurs d'ordures, stations de traitements des égouts, et marginalement dans les *data centers*. Source : ADEME.

28. 39 TWh en 2021 : Source Ministère.

29. Plus en détail, l'électricité alimente le moteur d'un compresseur de fluide, dans le cadre d'un cycle thermique.

Dispositif	Effet désiré	$\text{CoP} \left[\frac{\text{effet désiré}}{\text{dépense}} \right]$
Pompe à chaleur	chauffer une pièce	$\frac{Q_+}{W}$
Réfrigérateur/Climatiseur	refroidir un bac/une pièce	$\frac{Q_-}{W}$

TABLE 2.3 – Définition du coefficient de performance (CoP) en fonction de l’effet recherché, avec les notations du schéma (2.4).

où η_C est l’efficacité de Carnot, obtenue précédemment (efficacité maximale du moteur thermique).

Commentaires :

- Là où l’efficacité du moteur thermique est proportionnelle à la différence de température $\Delta T = T_+ - T_-$, le coefficient de performance des extracteurs de chaleur lui est *inversement proportionnel* : pour une utilisation optimale, il faut maximiser ΔT dans le cas d’un moteur, la minimiser pour un réfrigérateur ou une pompe à chaleur. Ainsi, on perd sur deux tableaux en mettant un réfrigérateur dans un garage chaud : il consomme plus d’énergie pour maintenir un même ΔT et en plus il le fait avec un mauvais rendement. La figure (2.5) représente ces quantités (en échelle logarithmique) pour ces différents dispositifs.

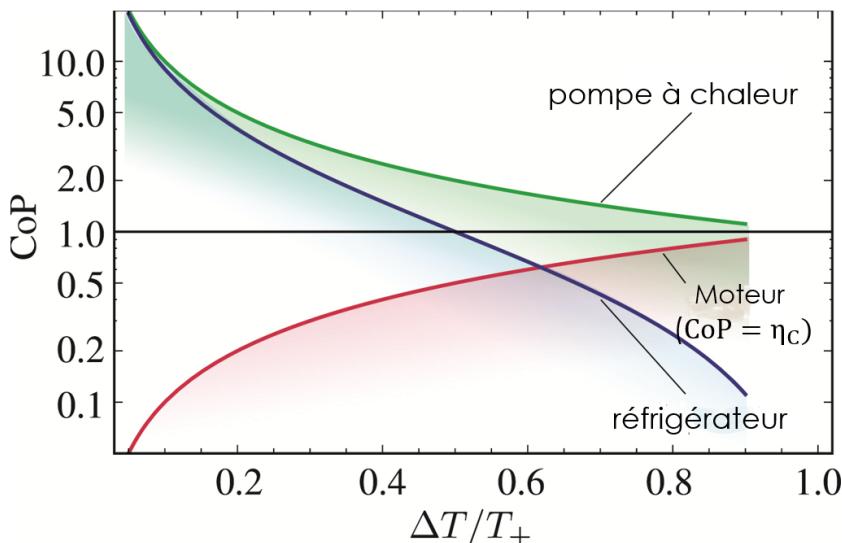


FIGURE 2.5 – Limites supérieures du coefficient de performance (ou efficacité dans le cas du moteur) en fonction de $\Delta T/T_+$ où $\Delta T = T_+ - T_-$ est la différence de température entre les sources chaude et froide. Adapté de [1].

- On voit sur ces expressions ou sur la figure (2.5), que le coefficient de performance peut être supérieur à 1 ! De fait, il est typiquement de 2-5 (voire plus) pour une pompe à chaleur commerciale. Cela ne doit pas induire en erreur : évidemment, il ne s’est pas créé d’énergie et les principes de la thermodynamique ne sont pas violés. Mais un CoP supérieur à 1 signifie que le gain retiré, du point de vue du consommateur, est supérieur à ce qu’il paye (sur sa facture d’électricité). Comme les pompes à chaleur n’ont besoin que de déplacer de l’énergie thermique, chaque joule qu’elles déplacent nécessite une petite fraction de joule, ce qui en fait des dispositifs astucieux et efficaces³⁰.

30. La référence [3] fait une analogie avec l’art martial du *Jiu Jitsu* : l’élan de l’adversaire est utilisé à son détriment, nécessitant ainsi peu de travail pour en diriger le flux.

Exercice : Calculer la valeur (maximale) du coefficient de performance d'une pompe à chaleur qui serait utilisée pour faire bouillir de l'eau.

3.8 Focus sur la pompe à chaleur (★)

L'expression « pompe à chaleur » (PAC) regroupe de nombreux dispositifs et l'on n'entrera pas dans le détail des différentes technologies existantes, certaines en développement.

On peut distinguer deux catégories principales variant par la nature de la source froide (de laquelle est prise la chaleur) :

- les PAC *aérothermiques* : utilisent l'air extérieur comme source froide. Ce sont les plus répandues, les moins chères mais les moins efficaces. Parmi elles, la catégorie air-air transfère la chaleur à l'air d'une pièce à chauffer tandis que la catégorie air-eau le fait à un système d'eau de chauffage. Certaines air-air sont réversibles, c'est-à-dire peuvent aussi jouer le rôle de climatiseur (là encore, ce ne sont pas les plus efficaces). Les air-eau peuvent suffire au chauffage d'une habitation.
- les PAC *géothermiques* : utilisent le sous-sol comme source froide (une sous-catégorie, dite *aquathermique* utilise la nappe phréatique ou une rivière). Ce sont les plus coûteuses car leur installation nécessite des travaux importants, et d'avoir un terrain dans lequel enterrer des capteurs. Mais elles sont aussi les plus efficaces, notamment parce que la température du sol baisse peu en hiver.

La PAC fait partie des leviers techniques couramment invoqués pour décarboner la production de chaleur. Elle fait l'objet d'un déploiement important et est considérée comme une « filière industrielle stratégique » par l'Union Européenne. En France, la production de chaleur issue de PAC s'établit à 43 TWh en 2022. L'Agence internationale de l'énergie³¹ estime le potentiel de réduction des émissions de CO₂ par les PAC à au moins 0,5 Gt en 2030 (le chauffage représente actuellement 4 Gt CO₂ par an).

Il existe cependant des points de vigilance à garder à l'esprit :

- certaines PAC utilisent (pour leur cycle frigorifique) un fluide réfrigérant qui se trouve être un puissant gaz à effet de serre (ex. : tétrafluoroéthane). Il faut donc veiller à ce qu'il n'y ait pas de fuites dans le cycle (supposé fermé).
- une PAC surdimensionnée n'est pas sans impact écologique : gel du sol d'où est pris la chaleur dans le cas d'une PAC géothermique, rejet d'une eau plus froide que l'eau pompée ou prélèvement excessif dans le cas d'une PAC aquathermique, etc,
- compte-tenu de l'expression de leur CoP (qui diminue avec l'écart en température entre sources chaude et froide, équation 2.4 et figure 2.5), les PAC sont bien adaptées aux climats tempérés (comme en France) mais beaucoup moins aux climats chauds ou froids,
- l'installation d'une PAC ne se substitue pas à une isolation efficace (globale) des logements (il faut *d'abord* isoler les logements *puis* les équiper en fonction des besoins restants).



Rapport IEA 2022

4 Énergie et société. Concepts et définitions complémentaires

Dès lors que l'on parle de machines et du rôle de l'énergie dans la société, nous prenons un point de vue anthropocentrique qui va attribuer une certaine valeur subjective aux mots employés et aux définitions. Ce qui est appelé *source d'énergie* est un système physico-chimique à l'origine d'une chaîne de transformations qui, au final, satisfait un besoin humain. C'est ce que l'on va illustrer au travers d'un exemple particulièrement significatif (la voiture thermique), après avoir défini quelques notions énergétiques à connotation économique.

4.1 Énergie primaire

On parle d'**énergie primaire** pour désigner l'énergie obtenue la plus directement possible d'une ressource naturelle (charbon, pétrole, ...). Nous parlerons également de *source d'énergie* en guise de synonyme^a.

a. même si cette dénomination est abusive : il ne peut y avoir création d'énergie *ex nihilo*

Le concept d'énergie primaire est utilisé en particulier pour l'analyse statistique des usages économiques de l'énergie. L'énergie primaire est relativement facile à quantifier, nonobstant les subtilités exprimées ci-dessous.

En fait, la définition même de l'énergie primaire est plus subtile qu'il n'y paraît car l'énergie captée d'une ressource dépend en partie de la façon dont est faite cette captation³². Par ailleurs, il existe des difficultés pratiques à la mesure de certaines formes³³, ce qui donne lieu à différentes conventions de comptabilisation.

Le tableau ci-dessous (Figure 2.6) récapitule la différence entre l'énergie disponible (3^e colonne) dans une ressource donnée et la forme sous laquelle elle peut être effectivement récupérée (dernière colonne) le plus directement possible.

31. AIE, ou en anglais International Energy Agency (IEA).

32. Par exemple, l'énergie solaire peut être convertie en chaleur par une bâche noire ou en électricité par un panneau photovoltaïque.

33. Par exemple, l'énergie mécanique du vent qui propulse les embarcations à voile ou l'énergie du bois de chauffage prélevé "sauvagement" échappent à toute comptabilité.

	Ressource	Énergie disponible	Processus de conversion	Dispositif	Forme d'énergie obtenue
Bois-énergie	bois	énergie chimique (liaison inter-atomique)	réaction de combustion	foyer de cheminée, centrale au bois, ...	thermique
Énergies fossiles	charbon, pétrole, gaz	énergie chimique (liaison inter-atomique)	réaction de combustion	Four, enceinte de centrale, ...	thermique
Énergie nucléaire	uranium	énergie nucléaire (liaison intra-noyau)	réaction de fission	enceinte de réacteur nucléaire	thermique
Énergie éolienne	flux de vent	énergie cinétique du vent	conversion en énergie cinétique de rotation	pales d'éolienne, de moulin à vent	mécanique
Énergie marine	courant d'eau (libre)	énergie cinétique du courant	conversion en énergie cinétique de rotation	pales d'hydrolienne, de moulin à eau	mécanique
Énergie hydraulique	chute d'eau	diff. énergie pot. de pesanteur convertie en énergie cinétique dans une conduite forcée	conversion en énergie cinétique de rotation	pales de turbine hydraulique	mécanique
Énergie solaire [thermique ou photovoltaïque]	lumière solaire	énergie des photons	absorption du rayonnement	plaque ou bâche panneau PV (jonction p-n)	thermique électrique

FIGURE 2.6 – Dernière colonne : forme d'énergie obtenue à partir de différentes ressources primaires (à l'issue de la toute première transformation).

Prenons quelques exemples. L'énergie susceptible d'être *disponible* dans le bois est de l'énergie chimique mais pour la "récupérer", il faut inévitablement une transformation (la réaction de combustion), qui la convertit en énergie thermique ³⁴. C'est donc cette dernière que l'on devrait comptabiliser comme énergie primaire de la ressource "bois-énergie". De la même façon, ce que l'on nomme communément énergie nucléaire (au sens de la production économique) est la chaleur dégagée par la réaction de fission à partir de minerai d'uranium ³⁵. Cependant, il existe une autre convention qui comptabilise en fait l'énergie électrique obtenue en sortie de centrale nucléaire (donc après une chaîne de conversion plus longue : *énergie thermique → mécanique → électricité*) ³⁶. La raison est simplement pratique : il est plus facile de mesurer les kWh électriques produits en sortie que les joules d'énergie thermique injectés dans les turbines. Dans le cas de l'énergie éolienne (ou hydraulique), la source d'énergie est un courant d'air (ou un courant d'eau) dont on retire de l'énergie mécanique. Cependant, la convention là-aussi la plus souvent retenue pour l'énergie primaire de ces sources est l'électricité produite en sortie d'éolienne (ou de centrale hydraulique), donc à l'issue d'une conversion *énergie mécanique → électrique* ³⁷.

4.2 Vecteur énergétique (ou énergie secondaire)

L'énergie primaire est parfois utilisable assez directement (ex. : énergie cinétique du vent dans une voile de bateau), mais le plus souvent elle doit être transformée en une source d'énergie secondaire, ou **vecteur énergétique**, pour être utilisable et transportable facilement vers un lieu de consommation.

- L'**électricité** est l'exemple même de vecteur énergétique : ce n'est pas une source d'énergie en soi ³⁸ puisqu'elle a été obtenue par conversion d'une énergie primaire (dans une centrale thermique, une éolienne, etc.).
- De même, l'hydrogène est essentiellement ³⁹ un vecteur énergétique (le plus souvent obtenu par hydrolyse de l'eau).
- L'essence, le kérosène et le diesel sont des produits issus du raffinage du pétrole ; ce ne sont donc pas à proprement parler des énergies primaires, ce sont en revanche des vecteurs énergétiques.

34. Dans le détail, quand le bois brûle, plusieurs transformations se déroulent simultanément. L'eau résiduelle s'évapore puis les matières organiques qui constituent le bois (cellulose, lignine) commencent à se décomposer en gaz volatiles, comme le méthane, et en gouttelettes de goudron. Au contact du dioxygène de l'air, les gaz s'enflamme ; la réaction exothermique élève leur température et le résidu solide qui constitue le charbon de bois s'enflamme à son tour.

35. C'est la convention que retient par exemple l'Agence internationale de l'énergie.

36. La distorsion induite par ces différentes conventions est a priori importante car l'efficacité de la conversion *énergie thermique → mécanique* est faible (~ 35 %, du fait du 2nd principe). En pratique, la part d'énergie nucléaire dans le mix énergétique mondial étant faible (~ 3 %), l'usage d'une convention ou d'une autre n'induit pas de grosses différences dans le total.

37. La différence entre conventions est dans ce cas faible car l'efficacité de la conversion *mécanique → électrique* est proche de 100 %.

38. Sauf à être capable de récupérer la foudre ...

39. En fait, il a été récemment découvert des gisements naturels d'hydrogène, ce qui en fait aussi une source d'énergie, mais pour le moment à une échelle très négligeable.

- Une batterie stocke de l'énergie mais n'en produit pas, c'est donc un vecteur énergétique.
- Idem pour l'air comprimé

4.3 Énergie finale (*versus* énergie utile)

L'**énergie finale** est la forme sous laquelle est délivrée l'énergie au consommateur : essence à la pompe d'une station service, électricité à l'arrivée du compteur électrique, gaz du réseau, bois de chauffage, etc.

Il s'agit d'un concept économique, qui ne correspond pas nécessairement à l'énergie *utile* (telle que définie en physique). Par exemple, dans le cas d'un déplacement en voiture, seule une partie de l'énergie contenue dans l'essence est convertie (par le moteur thermique) en énergie mécanique utile au déplacement (le reste étant dissipé en chaleur). L'efficacité de l'appareil impacte l'énergie utile, comme illustré dans la section suivante.

4.4 Chaîne de conversions : de l'énergie primaire à l'énergie utile.

4.4.1 L'exemple de la voiture à moteur thermique.

De façon à illustrer les notions précédentes, considérons la chaîne complète de conversions d'énergie en jeu pour répondre au besoin d'un déplacement en voiture (à moteur thermique), représentée sur la figure 2.7.

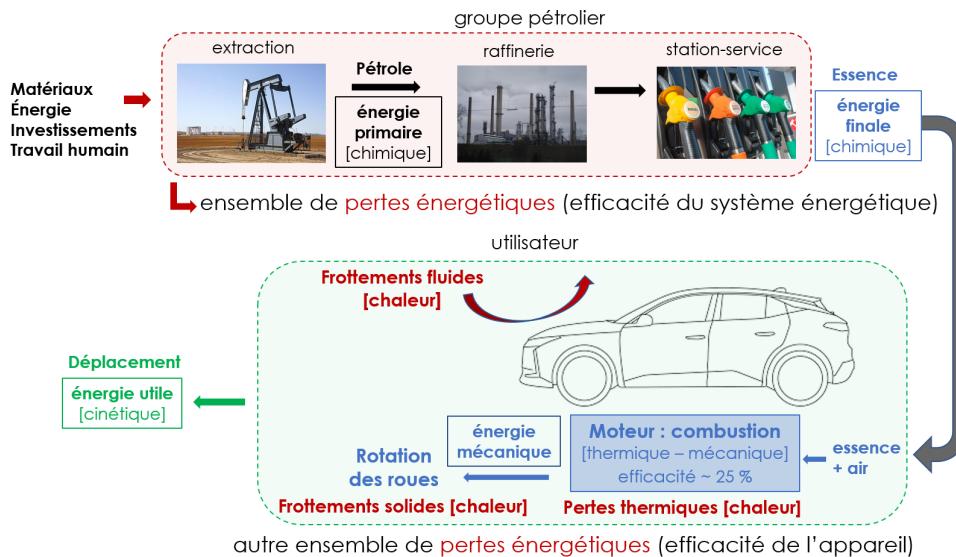


FIGURE 2.7 – Transformations et formes d'énergie qui interviennent dans l'utilisation d'une voiture. Adapté de la référence [5], chap. 2.1, p. 37.

Dans cet exemple, l'énergie *primaire* est sous forme de pétrole. Notons que sa récupération nécessite en amont une infrastructure (puits de pompage) et des moyens humains, économiques et énergétiques. Puis d'autres éléments de la chaîne de production (raffinerie) interviennent pour convertir le pétrole en essence et l'acheminer à l'utilisateur (à la station service) : l'essence (énergie *finale*, au sens économique) est donc une énergie *secondaire* (ou un vecteur énergétique) qui délivrera en entrée du moteur de l'énergie chimique, convertie dans le moteur en énergie thermique (par combustion d'un mélange d'essence et d'air) puis en énergie mécanique (par mouvement des pistons).

Comme cela a été déjà mentionné, l'efficacité intrinsèque du moteur à essence est de l'ordre de 25 % (75 % de l'essence est dissipée sous forme de chaleur, évacuée par le pot d'échappement et les radiateurs). L'énergie mécanique des pistons est transformée en énergie de rotation pour deux usages différents : faire tourner les roues (c'est le but principal) et pour produire, via un alternateur, de l'électricité (pour l'éclairage des phares, l'alimentation des bougies, de la radio, etc). La part *utile*, celle qui correspond au déplacement (énergie cinétique de la voiture et ses passagers) est réduite à moins de 15 % de l'énergie chimique fournie par l'essence (figure 2.8). Cette part utile doit compenser les différentes pertes par frottement qui agissent sur la voiture : le frottement *solide* au niveau du contact roues/chaussée, et le frottement *fluide* lié au déplacement de l'air devant la voiture.

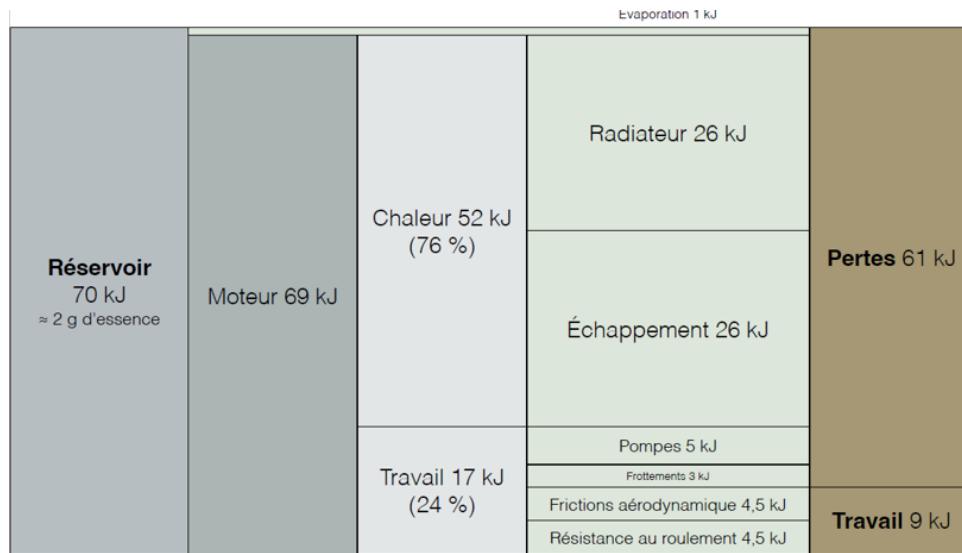


FIGURE 2.8 – Consommation d'énergie d'un moteur de voiture roulant à vitesse constante (130 km/h) sur autoroute, en 1 seconde. Source : [4], partie I.

Comme le montre les valeurs de la figure 2.8, l'efficacité du réservoir à la roue est de moins de 10 %. Celle du puits à la roue (prenant en compte les pertes d'extraction et raffinage du pétrole) serait encore abaissée de quelques pourcents⁴⁰.

Au final, l'énergie utile n'est qu'une faible fraction de l'énergie mobilisée en amont de la chaîne du fait d'un ensemble de pertes liées à l'efficacité du système énergétique (l'infrastructure) et à celle de l'appareil lui-même. Il est donc important d'avoir à l'esprit l'ensemble de cette chaîne socio-technique lorsqu'on veut évaluer les impacts d'un service.

4.5 Énergies de stock, énergies de flux

Les différentes énergies primaires évoquées précédemment se divisent entre énergies de type *stock*, non renouvelables à notre échelle de temps humaine, et énergies de type *flux*, renouvelables.

- Les **énergies de stock** sont les fossiles – charbon, pétrole et gaz – et les fissiles, c'est-à-dire le nucléaire – l'uranium, notamment. En effet, les gisements accessibles de pétrole, charbon, gaz, uranium, etc. déterminent un stock d'*énergie disponible*, qui peut être consommé sur une durée plus ou moins rapide, ce qui permet de générer une puissance plus ou moins élevée selon les besoins. Mais une fois épuisés, les stocks ne peuvent pas être reconstitués – ce sont des énergies non renouvelables.
- Les **énergies de flux** renouvelables sont l'énergie solaire et ses sous-produits – hydraulique, vent, houle, biomasse –, l'énergie géothermique et l'énergie des marées. Elles ne s'épuisent pas, mais la *puissance disponible* à un moment donné est limitée.

Notez cependant que la distinction n'est pas toujours nette car elle dépend d'une échelle de temps : le bois d'une forêt est une ressource renouvelable uniquement si le prélèvement n'excède pas sa capacité à se régénérer.

4.6 Consommation d'énergie : à l'échelle du Monde

La consommation mondiale d'énergie primaire est représentée entre 1800 et aujourd'hui sur la figure 2.9. L'essor du charbon au XIX^e siècle a été suivi de celui du pétrole au XX^e siècle, puis du gaz naturel, puis de l'hydraulique et du nucléaire et plus récemment des nouvelles formes renouvelables (éolien, photovoltaïque, ...).

40. Review of Modern Physics, 80, S1 (2008).

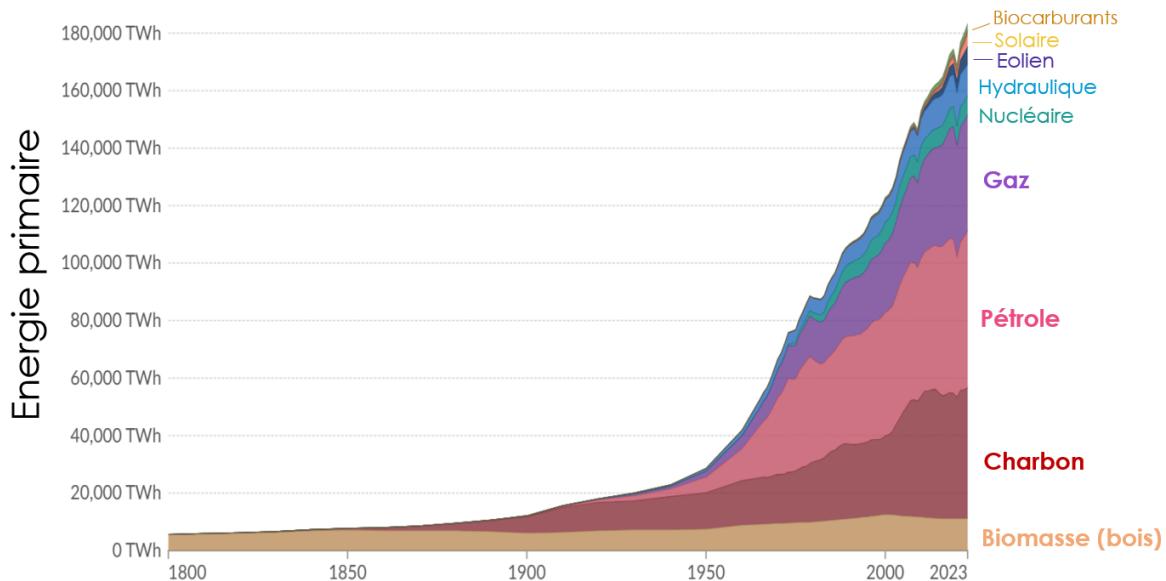


FIGURE 2.9 – Évolution de la consommation mondiale annuelle d'énergie primaire [11].

Exercice : Identifier l'unité de l'axe vertical de la figure 2.9. Convertir la valeur actuelle en exajoule et calculer la puissance correspondante (en terawatt).

Plusieurs points sont notables :

- La quantité totale d'énergie consommée est en augmentation (d'environ 2,5 % par an actuellement, ce qui se traduit par une croissance exponentielle, comme évoqué dans l'annexe 1.5),
- Cette consommation est très largement carbonée puisque dominée par les énergies fossiles (à $\sim 80\%$),
- Chaque forme d'énergie s'est ajoutée aux précédentes sans les remplacer⁴¹ : il n'y a pas eu, à ce jour, de « transition énergétique » [19].

On voit que les défis posés par la transition énergétique sont colossaux. Cependant, l'énergie primaire ne dit rien de l'efficacité avec laquelle on s'en sert, ni de la nécessité de l'usage.

4.7 Consommation d'énergie : à l'échelle d'une société

Que ce soit à l'échelle d'un pays ou du monde, il est relativement facile de comptabiliser les énergies primaire et finale (elles font l'objet de transactions économiques et donc sont systématiquement comptabilisées dans les statistiques nationales). Plus difficile est la comptabilisation de l'énergie utile ; c'est pourtant elle qui caractérise le service rendu. On dispose néanmoins d'une telle étude dans le cas américain (figure 2.10) : à gauche sont représentées les différentes catégories d'énergie primaire et les traits épais permettent de suivre les flux d'énergie consommée par catégorie et par secteur d'usage (on appelle diagramme de Sankey ce genre de représentation). On voit par exemple que le gaz (en bleu clair) a pour usages principaux la *production d'électricité* (qui alimente elle-même d'autres usages) et le secteur *industriel*, et est utilisé de façon plus minoritaire par les 3 autres secteurs (*résidentiel*, *commercial* (= tertiaire) et *transports*).

Faits notables, l'ensemble des énergies primaires utilisées n'est converti qu'à hauteur de 76 % en énergie finale, et à seulement 33 % en énergie utile. Autrement dit, **67 % de l'énergie primaire ont été dissipés en chaleur fatale**, illustrant l'immense "gaspillage" de nos systèmes énergétiques. Ce diagramme permet d'identifier les

41. Notons que l'utilisation du charbon, très résiduelle en France (1 % [17]) comme dans d'autres pays occidentaux, et perçue comme une énergie « du passé », a continué de croître à l'échelle mondiale pendant tout le XX^e siècle et reste très importante. Dans notre pays, la consommation d'énergie est dominée par les produits pétroliers (39 % de la consommation énergétique finale) et le gaz (22 %) [17] - le nucléaire, très présent en France, fournit 69 % de l'électricité [18], mais celle-ci ne représente qu'un quart de la consommation totale [17].

Consommation d'énergie U. S. (2022) : 100,3 Quads ~ 106 exajoules

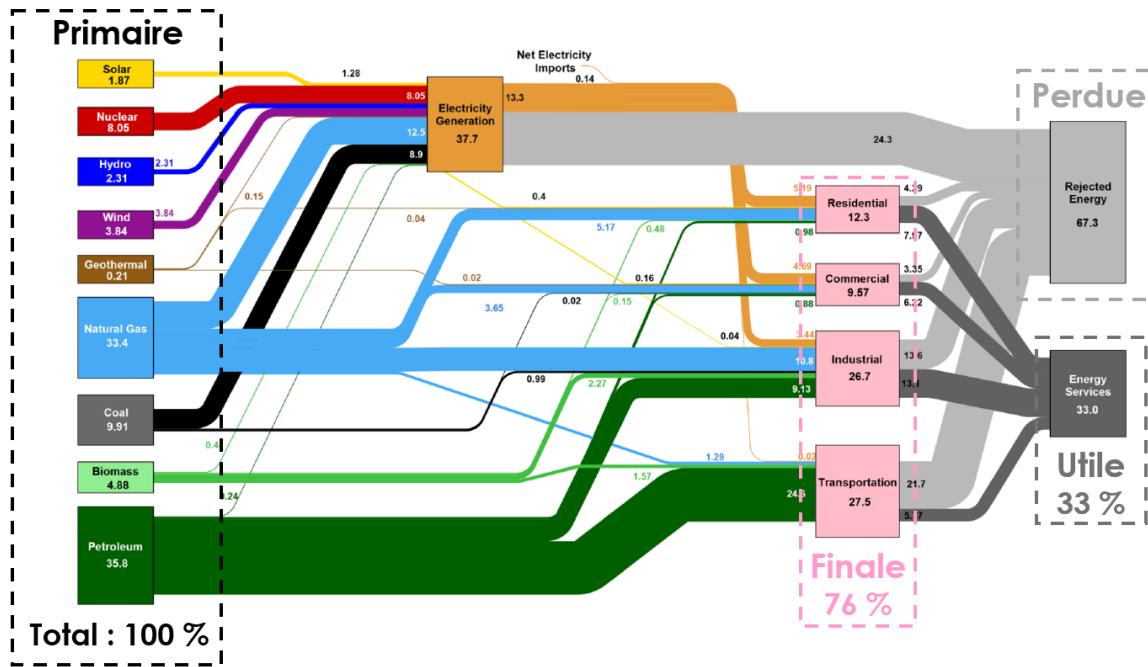


FIGURE 2.10 – Consommation d'énergie primaire, finale et utile aux États-Unis en 2022 sous forme d'un diagramme de Sankey (estimation réalisée par le [Lawrence National Livermore Laboratory](#)). L'unité (américaine) est le Quad : 1 quadrillion de BTU (British Termal Unit) = $10^{15} \times 1055 \text{ J} \sim 10^{18} \text{ J} = 1 \text{ exajoule}$.

principales pertes (traits gris épais) : elles apparaissent au niveau de la *production d'électricité* et du *transport* et résultent l'une et l'autre de la mauvaise efficacité du moteur thermique (dans la centrale thermique et dans le moteur à essence), conséquence du second principe de la thermodynamique ...

Exercice : Identifier sur le diagramme 2.10 la part d'énergie consommée par les véhicules électriques.

4.8 Consommation d'énergie : à l'échelle individuelle

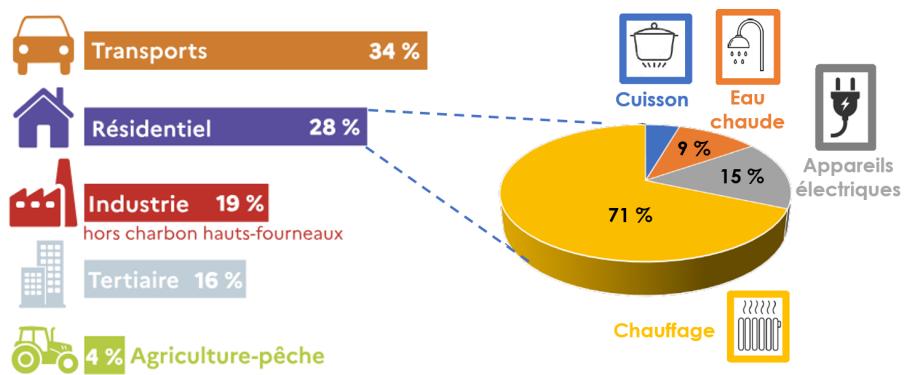


FIGURE 2.11 – Consommation d'énergie finale en France en 2022 (Source : [Ministère](#))

Afin d'identifier les usages à l'origine de la consommation d'énergie, on s'intéresse à une décomposition de la consommation d'énergie finale par secteur et par poste d'activité (en France métropolitaine, fig. 2.11). On voit que le transport est le secteur principal, suivi du secteur résidentiel, puis à parts presque égales par ceux de l'industrie et du tertiaire. En regardant plus en détail le cas du secteur résidentiel, on s'aperçoit que le chauffage

concentre plus des deux tiers de la consommation de ce secteur. L'électricité spécifique (qui comprend la consommation d'électroménager, d'éclairage, d'appareils audiovisuels et informatique, etc.) représente 15 % de la consommation d'énergie (du secteur résidentiel). En décomposant à son tour ce poste (électricité), une analyse plus fine ⁴² fait apparaître comme principaux usages l'éclairage, le froid domestique (réfrigérateur-congélateur), et une myriade d'autres postes plus petits (VMC, TV, ...), mais dont certains sont apparus récemment ou dont la part tend à croître tels que les objets liés aux technologies de l'information et la communication (TIC).

Toujours en s'en tenant au secteur résidentiel, nous reprenons ci-dessous l'analyse de RTE (gestionnaire du réseau électrique en France) ⁴³ :

Dans un contexte de décarbonation, les efforts sur le secteur résidentiel portent à la fois sur la sortie des énergies fossiles pour les usages thermiques que sont le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la cuisson, mais aussi sur une réduction globale des besoins en énergie. À cet effet, des améliorations de performance énergétique sont nécessaires, qu'il s'agisse de performance thermique des bâtiments, via des normes plus strictes sur la construction neuve et la rénovation des bâtiments existants, ou de performance des équipements en eux-mêmes (meilleurs rendements des solutions de chauffage, meilleure classe d'efficacité pour les appareils soumis à l'étiquetage énergétique, etc.). À cela s'ajoutent des évolutions dans les modes de vie et pratiques énergétiques, avec un continuum d'actions mobilisables entre les « gestes simples » du quotidien pour limiter les consommations superflues (réduction de la température de chauffage, extinction de la lumière des pièces inoccupées, extinction des appareils en veille, etc.) et des transformations sociétales dans les modes de vie (réduction de la taille des logements, développement d'espaces et de services partagés, attractivité des logements collectifs, augmentation du nombre de personnes par ménage, etc.).

Chauffage :

Même si la France est connue pour un développement du chauffage électrique plus marqué que dans les pays voisins, le chauffage reste un usage dominé par les combustibles fossiles. Près de 40 % des résidences principales sont aujourd'hui chauffées par des solutions électriques. Le remplacement des combustibles fossiles par des solutions bas-carbone (électricité, biomasse, biogaz ou « gaz vert », réseaux de chaleur urbains alimentés par des énergies renouvelables), en commençant par une sortie rapide du chauffage au fioul et par une réduction importante de l'usage de gaz fossile, et la réduction du besoin de chauffe par une meilleure isolation des bâtiments, des systèmes de chauffage plus efficaces et une évolution des normes de confort thermique dans les habitations constituent ainsi les principales voies de réduction des émissions dans ce secteur.

42. EDF R&D, 2016.

43. Bilan prévisionnel 2023. Chapitre 2 : Consommation.

5 Sources d'énergie

Dans cette partie et la suivante, nous revenons plus en détail sur différentes sources d'énergie et leurs caractéristiques.

5.1 Combustibles fossiles

Les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) sont utilisés dans des systèmes où leur combustion libère de la chaleur⁴⁴, qui est principalement

- utilisée directement pour le chauffage,
- transformée en énergie mécanique (véhicules, industrie, etc.),
- ou, dans le cas des centrales thermiques, transformée en énergie mécanique (turbine) puis en énergie électrique (fig. 2.3).

Comme discuté précédemment, pour des raisons thermodynamiques, les transformations impliquant l'énergie thermique comme intermédiaire sont peu efficaces, si bien qu'une large part de l'énergie primaire associée aux combustibles fossiles est en fait perdue.

Si la production de combustibles fossiles est difficile à modéliser et à anticiper (cf TD 1), elle semble devoir décroître à plus ou moins long terme. Un épuisement éventuel des combustibles fossiles est cependant trop lointain pour constituer une solution au problème du réchauffement climatique.

Il est en effet estimé que près de 60 % du pétrole et du méthane fossile, et 90 % du charbon doivent rester non extraits pour rester dans les limites d'un budget carbone associé à un réchauffement de 1,5 °C⁴⁵.

D'après le GIEC, les émissions associées à l'exploitation de l'ensemble des infrastructures fossiles existantes (mines de charbon, puits de pétrole, gazoducs) jusqu'à leur fin de vie suffit à épuiser le budget carbone de 1,5°C (et de 2°C en y ajoutant les projets d'infrastructures prévus) [9]. Ainsi, l'Agence internationale de l'énergie stipule :⁴⁶ « *À partir de 2021, aucun nouveau gisement de pétrole ou de gaz ne doit être développé ; aucune nouvelle mine de charbon ou extension de mine ne devrait être approuvée. Le rythme du déclin de la demande en pétrole et en gaz dans les années 2030 pourrait signifier qu'un certain nombre de projets coûteux devront être mis à l'arrêt avant la fin de leur durée de vie technique.* »

Captage et stockage du carbone (Carbon capture and storage - CCS). Un élément de solution avancé par certaines industries consiste à capter du CO₂ et à le stocker dans le sous-sol en profondeur.

De manière très idéalisée, cette approche de CCS permettrait de brûler des combustibles fossiles et de capturer à la source le CO₂ émis pour l'enfouir, de sorte qu'il ne contribue pas à l'effet de serre. Cependant, ces techniques complexes d'enfouissement du CO₂ soulèvent différents risques (dégradation des roches par réaction avec le CO₂, séismes, fuites de CO₂ - mortelles si elles sont massives etc), elles sont très énergivores et coûteuses, inapplicables à de petits systèmes (chaudière individuelle, voiture, avion etc). Leur utilisation future semble donc devoir concerner principalement les rejets de certaines grosses industries, avec un impact réel mais très limité.

Au-delà des installations utilisant des combustibles fossiles, les techniques de CCS pourraient aussi cibler le CO₂ déjà présent dans l'atmosphère. Le captage direct du CO₂ de l'air (*Direct Air CCS - DACCS*) semble cependant trop coûteux pour être envisageable à une large échelle. Une alternative est de lier les CCS aux bio-énergies (BECCS) : puisque le carbone de la biomasse est issu, via la photosynthèse, du CO₂ de l'atmosphère, capturer et enfouir le CO₂ issu des procédés de bio-énergie (par exemple, de la raffinerie de l'éthanol) permettrait de diminuer la concentration de CO₂ de l'atmosphère et de réaliser des "émissions négatives" de CO₂. Là encore, un recours massif aux BECCS poserait des difficultés considérables et reste très spéculatif. Le potentiel de captation se situerait aux environ de quelques Gt CO₂.

44. Pour être plus précis, la majorité des usages des combustibles fossiles sont associés à leur combustion, mais il en existe aussi d'autres usages, contribuant environ à 10 % de leurs émissions de GES. Le pétrole est utilisé pour la pétrochimie : production de lubrifiants, plastiques, pesticides, etc. et le charbon intervient dans la production d'acier - ainsi, l'État français a annoncé un soutien de 1,8 milliards d'euros ([lien](#)) à la décarbonation du site d'ArcelorMittal Dunkerque, qui représente 15 % des émissions de GES industrielles nationales.

45. *Unextractable fossil fuels in a 1.5°C world.* Nature (2021).

46. AIE, Rapport *net-zero by 2050* (mai 2021).

5.2 Énergie nucléaire

Une réaction nucléaire est une réaction par laquelle des noyaux sont modifiés, en masse ou en charge, perdant ou gagnant des protons ou des neutrons. Il existe différents types de réactions nucléaires, telles que la **fusion nucléaire**, par laquelle deux noyaux s'assemblent pour former un noyau plus lourd, et la **fission nucléaire**, par laquelle un noyau se scinde en plusieurs noyaux plus légers. L'étude théorique de l'énergie de cohésion des noyaux montre que la fission des noyaux les plus lourds libère de l'énergie (mécanisme utilisé dans les centrales nucléaires), de même que la fusion de deux noyaux légers (à l'origine de l'énergie produite par le Soleil).

5.2.1 Fonctionnement des centrales nucléaires

Les noyaux dont on peut déclencher la fission par bombardement de neutrons sont dits fissiles. Le seul élément fissile naturel est l'isotope 235 de l'uranium. Sa fission, déclenchée par collision avec un neutron, produit 2 noyaux (de masses variables : il y a différents produits de fission possibles) et 2 ou 3 neutrons. En présence d'une concentration d'uranium suffisamment élevée, chaque neutron produit peut lui-même déclencher la fission d'un autre atome d'uranium 235, et une cascade de réactions peut donc se produire. Chaque réaction de fission produit une énergie petite ($200 \text{ MeV} \simeq 3 \times 10^{-11} \text{ J}$) mais le grand nombre de réactions possibles produit au final une énergie colossale. Cette énergie est cédée, sous forme de chaleur, à un circuit de circulation d'eau qui joue le rôle de source chaude pour une machine thermique (fig. 2.3).

Il y a actuellement un peu plus de 400 réacteurs nucléaires dans le monde, de puissance moyenne individuelle de l'ordre de 1 GW. Cette production représente dans le monde $\sim 3\%$ de l'énergie primaire (fig. 2.9) et 9 % de l'électricité.

Le cas français, avec ses 56 réacteurs (soit près de 1 par million d'habitants) est très spécifique : l'énergie nucléaire produit $\sim 75\%$ de l'électricité ($\sim 35\text{-}40\%$ de l'énergie primaire, 15-20 % de l'énergie finale).

Une discussion des avantages et inconvénients de l'énergie nucléaire est esquissée dans le rapport du GIEC [7] : c'est une production stable et piloteable (on peut choisir de la ralentir plus ou moins), qui occupe une faible surface au sol ; en revanche, les risques sont nombreux (accident, déchets, prolifération, etc.) et impliquent des mesures de sécurité coûteuses – les risques sécuritaires constituent donc des risques économiques, auxquels s'ajoutent, notamment en Europe, les surcoûts à la construction (d'un facteur x 3-4) et les délais de construction (il faut 20-40 ans pour développer un parc nucléaire complet). Enfin, pour gérer correctement les risques et les frais de construction élevés, le GIEC signale qu'il faut un contexte local favorable : soutien politique stable, surveillance transparente (contre-pouvoirs, lutte contre la corruption), financement garanti en cas de dépassement des coûts.

5.2.2 Fusion nucléaire (*)

L'utilisation de la fusion nucléaire pour produire de l'énergie est un sujet de recherche depuis les années 1950 et reste encore extrêmement incertaine.

La réaction la plus viable sur Terre serait une fusion d'un noyau de deutérium (isotope 2 de l'hydrogène) et d'un noyau de tritium (^3H), produisant un noyau d'hélium et un neutron. Cette réaction aurait pour avantage que ses produits ne sont pas radioactifs, ce qui limiterait les déchets. Le deutérium est relativement abondant à l'état naturel ; en revanche le tritium devrait être produit par bombardement du lithium par des neutrons.

La difficulté de la fusion est que, les noyaux étant tous chargés positivement, ils se repoussent. Il faut donc vaincre la force de répulsion électromagnétique en se plaçant à très hautes pression et température, tout en restant dans le vide : ce *confinement* pourrait être réalisé

- soit par des *champs magnétiques intenses* : c'est l'objet du projet international ITER à Cadarache, l'un des plus vastes projets scientifiques du monde, lancé en 1985, toujours en phase de construction avec d'importants retards et dépassements de budget, et dont les premières expériences sont prévues pour les années 2030,
- soit par des *lasers intenses* : un résultat remarquable mais encore très préliminaire a été obtenu par le NIF aux États-Unis en 2022 : 3,15 MJ libérés par une cible ayant reçu 2,1 MJ, soit une production de 1,05 MJ – mais à l'aide de 192 faisceaux lasers dont l'alimentation a nécessité près de 400 MJ en amont [20].

Quelle que soit la voie de confinement envisagée, il faudra probablement au moins plusieurs décennies, ne serait-ce que pour savoir si elle a des chances d'être techniquement viable.

5.3 Énergies renouvelables : introduction

Comme signalé plus haut, les énergies renouvelables sont des énergies de flux : elles se renouvellent (donc elles ne s'épuisent pas), mais à un rythme limité, si bien que la **puissance disponible** est plafonnée. Nous recevons à la surface terrestre plusieurs flux d'énergie :

- le plus important est l'énergie lumineuse solaire, dont la puissance totale reçue par la Terre est d'environ $1,7 \times 10^5$ TW (voir partie 5.7) [1] ; nous pouvons récupérer cette énergie soit directement (énergie solaire), soit par l'intermédiaire des végétaux dont la croissance est permise par le Soleil (bio-énergie),
- une partie de cette énergie solaire est absorbée par l'atmosphère, ce qui génère des mouvements de convection ; les mouvements de l'atmosphère (énergie éolienne) représentent de l'ordre de 1 % de l'énergie totale reçue par la Terre via le rayonnement solaire [1],
- et une petite partie de cette énergie éolienne est convertie en mouvements de l'hydrosphère : précipitations, cours d'eau (énergie hydraulique), circulation des océans,
- par ailleurs, la surface terrestre reçoit environ 40 TW de chaleur issue de l'intérieur de la Terre [1], qui peut être utilisée par des installations géothermiques faisant circuler un fluide qui se réchauffe en profondeur et dont la chaleur est récupérée en surface,
- enfin, l'interaction Terre-Lune est à l'origine des marées, dont l'énergie peut être captée par les usines marémotrices (puissance totale reçue par la Terre estimée à 4 TW [1]).

Étant entendu que seule une petite partie de chacun des flux d'énergie listés ci-dessus pourra être récupérée, il apparaît déjà que la géothermie et les marées ne pourront pas contribuer de manière significative à la production mondiale - qui est actuellement d'environ 20 TW. C'est pourquoi nous ne les décrirons pas dans ce cours. Elles peuvent cependant avoir un rôle important dans certains endroits. Ainsi la géothermie représente environ 20-30 % de l'électricité produite en Islande, en Norvège, aux Philippines ou au Kenya [1].

L'énergie hydraulique et l'énergie éolienne, qui seront décrites dans les parties 5.4 et 5.5, sont principalement utilisées pour la production d'électricité. La bio-énergie (partie 5.6) peut aussi servir au chauffage et au transport. L'énergie solaire (partie 5.7) est utilisée principalement pour le chauffage local et pour différents modes de production électrique, dont le photovoltaïque.

5.4 Hydroélectricité

L'hydroélectricité s'appuie le plus souvent sur le détournement d'un cours d'eau par une conduite débouchant sur une turbine. La pression de l'eau entraîne la rotation de la turbine, qui fait tourner un alternateur, qui génère un courant électrique. Ainsi, l'**énergie potentielle de pesanteur** de l'eau située en amont sera convertie en énergie mécanique de rotation de la turbine, puis en énergie électrique.

La conversion *mécanique* (E_p) → *électrique* est donc plus directe que dans une centrale thermique (pas de limitation par la loi de Carnot), permettant une bien meilleure efficacité : elle peut tendre vers 100 %. Nous noterons ϵ cette efficacité, qui décrira donc les deux transformations *mécanique* (E_p) → *mécanique* (*rotation turbine*) → *électrique*.

Considérons une centrale où le débit volumique d'eau est noté D_v : pendant un temps dt , un volume d'eau $dV = D_v \times dt$ circule dans la conduite. L'énergie potentielle perdue par l'eau stockée dans le barrage, pendant un temps dt , est donc donnée par la différence d'énergie potentielle entre les cas t et $t + dt$ sur la figure 2.12 : elle correspond à $dE_p = (\rho dV) \times gH = \rho D_v g H \times dt$ où H est la différence de hauteur entre la surface de l'eau en amont et en aval, et ρ est la masse volumique de l'eau. Cette énergie étant convertie en énergie électrique⁴⁷ avec l'efficacité ϵ , la puissance électrique générée P est donc donnée par $(\epsilon dE_p)/dt$ soit

⁴⁷. Notons bien que le facteur ϵ est donc introduit pour décrire l'efficacité de l'ensemble du processus de conversion : mise en rotation de la turbine puis conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique. Dans la mesure où ces deux étapes se font de manière très efficace, nous ne détaillerons pas davantage ce qui limite leur efficacité.

Puissance électrique fournie par une centrale hydraulique

$$P = \epsilon \rho D_v g H$$

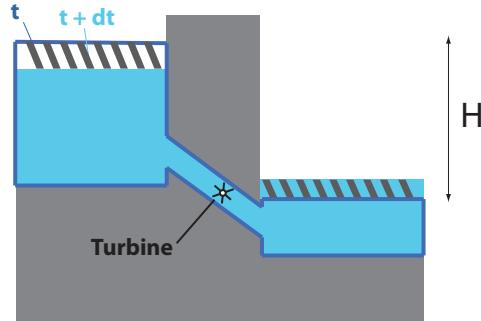


FIGURE 2.12 – Gauche : le barrage des Trois Gorges, sur le Yang Tsé, en Chine. Droite : schéma - énergie potentielle perdue par la réserve d'eau pendant dt : le volume $dV = D_v dt$ est indiqué en hachures.

Sur certaines installations (stations de transfert d'énergie par pompage - STEP), il est aussi possible d'inverser la turbine pour **stocker de l'énergie** : quand la demande est plus faible que la production des autres centrales du réseau électrique, cette production excessive du réseau est utilisée pour pomper de l'eau depuis le réservoir en aval vers le réservoir en amont. C'est actuellement le principal moyen de stockage de l'énergie électrique. L'efficacité de ce stockage est assez bonne - de l'ordre de ϵ .

L'hydroélectricité est une technologie ancienne et mature ; c'est la deuxième source d'électricité en France et la première source d'électricité renouvelable. La production est stable et pilotable : elle peut être augmentée ou diminuée en fonction de la demande. En Europe, la plupart des sites exploitables pour l'hydroélectricité sont déjà exploités. En revanche, il existe encore des gains possibles en Asie et en Afrique, pour un total d'environ 1 TW [7]. La construction de barrages a cependant un coût humain et environnemental important, puisque les cours d'eau sont souvent des zones densément peuplées et des écosystèmes riches et menacés.

Application

Le barrage des Trois Gorges (fig. 2.12) est le plus puissant au monde (et sa construction a entraîné le déplacement de millions de personnes). Son débit maximal étant de $900 \text{ m}^3/\text{s}$, sa différence de hauteur de $H = 80 \text{ m}$, et son rendement de conversion de $\epsilon = 95\%$ [1], quelle est sa puissance maximale ?

Cette puissance maximale n'est pas toujours atteinte, notamment à cause des variations de précipitations ; la puissance moyenne générée est de 12 GW. Combien de réacteurs nucléaires cela représente-t-il ?

5.5 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent, c'est-à-dire l'énergie cinétique de l'atmosphère en mouvement. Une éolienne convertit une partie (plus ou moins grande : cf loi de Betz ci-dessous) de cette énergie éolienne en énergie mécanique de rotation de ses pales. Cette énergie mécanique est ensuite convertie (avec une efficacité proche de 100 %) en énergie électrique par un alternateur.

5.5.1 Limite de Betz

Supposons une vitesse du vent v uniforme, et une surface S perpendiculaire au vent. Le volume d'air traversant S pendant un temps dt est $S \times vdt$ et correspond à une masse $\rho_a S v dt$ où ρ_a est la masse volumique de l'air. L'énergie cinétique de ce volume d'air est donc $\rho_a S v^3 dt / 2$.

Définition : puissance cinétique

La puissance cinétique du vent qui traverse la surface S est l'énergie cinétique de l'air qui traverse S par unité de temps :

$$P_{cin} = \frac{\rho_a v^3}{2} S$$

Application

On estime qu'il faut que la moyenne annuelle de la puissance cinétique soit supérieure à 300 W pour $S = 1 \text{ m}^2$ pour qu'une éolienne soit rentable [1]. À quelle moyenne annuelle $\langle v^3 \rangle$ cela correspond-il ? En déduire une vitesse minimale typique ($\langle v^3 \rangle^{1/3}$).

Notons P la puissance mécanique reçue par les pales de l'éolienne (et donc la puissance électrique qu'elle fournit sera ϵP). Une éolienne balayant une surface S (c'est-à-dire que $S = \pi R^2$ où R est la longueur des pales) est traversée par une puissance cinétique $P_{cin} = \rho_a v^3 S / 2$. Mais la totalité de cette puissance cinétique disponible ne peut pas être récupérée par les pales. En effet, si l'éolienne se met à trop freiner l'écoulement, le vent préférera contourner l'éolienne plutôt que de passer à travers sa surface. On définit alors le coefficient de puissance⁴⁸

$$C_P = P / P_{cin}$$

qui est compris entre 0 et 1.

Un calcul plus complet sera fait au TD 3, mettant en jeu les conservations de la masse et de la quantité de mouvement. Nous montrerons que le paramètre crucial est le rapport entre les vitesses avant et après passage par l'éolienne (ce rapport optimal est déterminé par la géométrie de l'éolienne, d'une façon que nous ne chercherons pas à quantifier) et qu'il existe une valeur optimale de ce rapport, permettant de maximiser C_P .

Limite de Betz

Pour une éolienne, le rapport C_P entre la puissance cinétique disponible P_{cin} et la puissance mécanique P reçue par les pales de l'éolienne ne peut pas dépasser une valeur maximale appelée limite de Betz.

Nous calculerons au TD 3 la valeur de cette limite de Betz :

$$C_{P, \max} = \frac{16}{27} \simeq 0,59$$

En fonction de sa géométrie, une éolienne donnée pourra être plus ou moins proche de la limite de Betz.

Application

L'amélioration de la performance des éoliennes et de leur coût s'est fait notamment par une augmentation de leurs dimensions, et leur diamètre atteint maintenant 120 m. À un moment où la puissance cinétique du vent est de 300 W par m^2 , quelle est la puissance qu'une telle éolienne peut fournir si elle atteint la limite de Betz ?

Pour comparaison, la puissance maximale effectivement fournie par une éolienne de telles dimensions est de l'ordre de 7 MW.

Complément : énergie hydraulienne et limite de Betz

Une hydrolienne (ou un moulin à eau immergé) est l'équivalent marin d'une éolienne : une roue à pales préleve de l'énergie cinétique d'un courant d'eau libre. L'efficacité de cette captation est donc sujette à la même limite (Betz). En revanche, la limite de Betz ne s'applique pas à la situation décrite précédemment pour l'énergie hydraulique : la chute d'eau (ou le courant *forcé* dans la canalisation) ne permet pas à l'eau de contourner la turbine et l'efficacité de conversion peut ainsi tendre vers 100 %.

48. On désigne parfois ce rapport sous le nom d'*efficacité*, cependant il faut bien voir que la puissance qui n'est pas transférée à l'éolienne n'est pas perdue (dégradée en chaleur) : elle est maintenue sous forme de puissance cinétique dans le fluide et reste disponible pour être éventuellement récupérée par d'autres éoliennes.

5.5.2 Géométrie des éoliennes

L'ingénierie des éoliennes s'appuie notamment sur les connaissances d'aérodynamique développées pour l'aviation. Considérons, dans le référentiel d'une aile d'avion, l'action de l'air s'écoulant à une vitesse \vec{v} (fig. 2.13(a)). L'aérodynamique décompose la force exercée par l'air sur l'aile en deux composantes :

- la traînée, orientée parallèlement à \vec{v} , a tendance à freiner l'avion,
- la portance, orientée perpendiculairement à \vec{v} , peut soulever l'avion à condition que le profil de l'aile soit correctement dessiné : il faut pour cela que l'air s'écoule à plus grande vitesse au-dessus de l'aile qu'en-dessous, de sorte que la pression de l'air soit plus faible au-dessus.

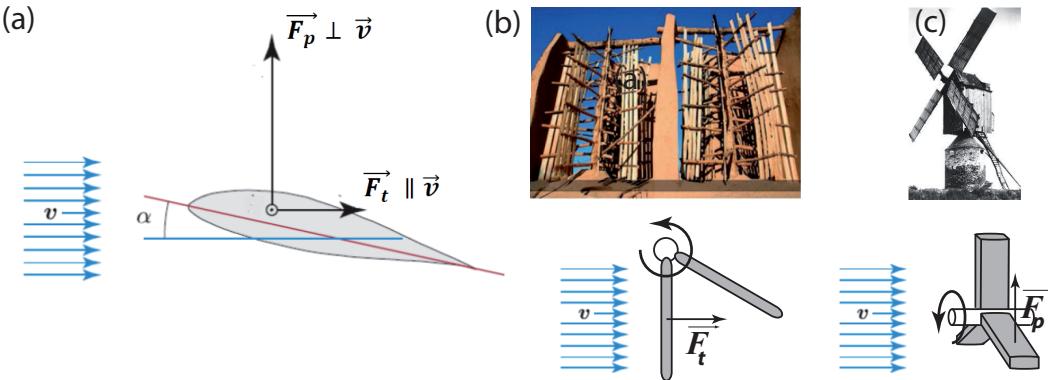


FIGURE 2.13 – (a) Schéma de profil d'une aile d'avion : l'air s'écoule dans le référentiel de l'avion à la vitesse v ; l'aile est inclinée d'un angle α par rapport à \vec{v} ; elle subit de la part de l'air une force dont les composantes parallèle et perpendiculaire à \vec{v} sont \vec{F}_t et \vec{F}_p . (b) Un panémone, moulin à vent utilisé en Iran au 1^{er} millénaire avant J.C. Le vent entraîne une force de traînée (parallèle à \vec{v}) sur les pales [1]. (c) Un moulin à vent d'Europe du Nord. Les ailes subissent une force perpendiculaire à \vec{v} qui les fait tourner autour d'un axe parallèle à \vec{v} .

Afin de récupérer l'énergie éolienne, de premiers systèmes ont été conçus dès l'Antiquité (fig. 2.13(b)), où c'est la force de traînée qui est utilisée, c'est-à-dire que le vent pousse les pales et les met en rotation autour d'un axe vertical. En revanche, les moulins développés au Moyen-Âge en Europe utilisent la force de portance, qui fait tourner les pales autour d'un axe horizontal (fig. 2.13(c)). Cette configuration est plus efficace : elle permet généralement de se rapprocher davantage de la limite de Betz ⁴⁹.

Le rapport F_p/F_t est d'autant plus élevé que l'angle d'attaque α (angle entre la pale et la vitesse du vent) est faible. La vitesse du vent dans le référentiel de la pale est $\vec{v}_{vent} - \vec{v}_{pale}$, avec $v_{pale} = \Omega r$ où Ω est la vitesse angulaire de rotation des pales et r est la distance du point considéré par rapport à l'axe de rotation. Ainsi, l'orientation de la pale permettant de minimiser α n'est pas la même suivant la distance r par rapport à l'axe. Ceci impose un profil particulier des pales, dont l'orientation tourne à mesure que l'on s'éloigne de l'axe de rotation.

C'est le paramètre $\lambda = R\Omega/v_{vent}$, rapport entre la vitesse de la pointe des pales et la vitesse du vent, qui détermine le coefficient C_P pour une géométrie donnée d'éolienne (et avec toujours, quelle que soit la géométrie, $C_P \leq 0,59$). Pour tous les types d'éolienne, une valeur optimale de λ existe (fig. 2.14). Si Ω était autrefois fixée pour s'adapter au réseau électrique, elle est maintenant adaptée en fonction de la vitesse du vent afin de maintenir λ à sa valeur optimale [1].

Le nombre de pales est par ailleurs fixé à trois, afin de minimiser le poids du système, tout en évitant les instabilités qui apparaissent quand il n'y a qu'une ou deux pales [1].

Les pointes des pales restent une limitation importante pour l'efficacité des éoliennes car elles créent des vortex qui entraînent des pertes.

5.5.3 Potentiel de développement de l'énergie éolienne (*)

Une estimation grossière de la puissance cinétique disponible dans l'ensemble de l'atmosphère amène à ~ 1000 TW. Mais il n'est naturellement pas possible d'en capturer la totalité, et le GIEC estime à 63-81 TW la puissance éolienne qui pourrait être installée dans le monde [7]. C'est une *technologie maintenant mature et peu coûteuse*

49. Par exemple, une modélisation simple du panémone de la figure 2.13(b) a été développée lors du contrôle de seconde chance de juin 2024 (exercice II) et une efficacité maximale de seulement 12 % a été trouvée.

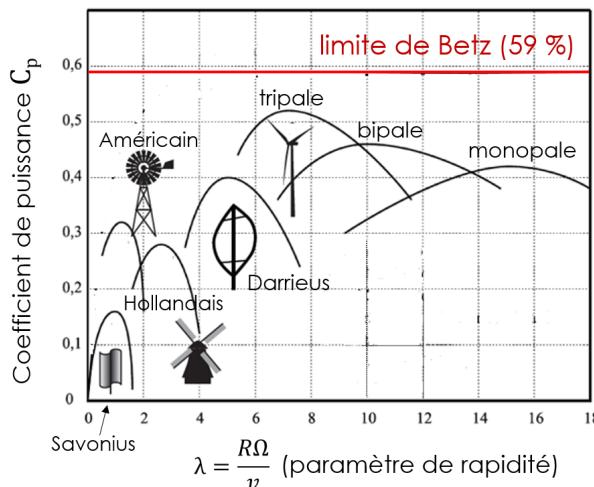


FIGURE 2.14 – Coefficient de puissance $C_P = P/P_{cin}$ pour différentes géométries d'éoliennes, en fonction du paramètre λ . Adapté de la référence [3].

(fig. 2.20), mais la production est non pilotable et intermittente. Le recours à des éoliennes plus hautes et à l'éolien offshore permet d'accéder à des zones où le vent est plus rapide.

La construction d'une éolienne voit son empreinte carbone rentabilisée en un an [7], mais fait appel à des minéraux stratégiques, notamment pour fabriquer les aimants des alternateurs. L'impact des éoliennes sur la biodiversité (perturbation du vol des oiseaux et des chiroptères, de leur chasse, de leurs migrations) n'est pas encore bien connu. Avec maintenant 200 m de hauteur (pour comparaison la tour Eiffel mesure 330 m), elles ont par ailleurs un impact esthétique et peuvent aussi être causes de nuisances sonores.

5.6 Bio-énergie

On parle de bio-énergie pour désigner la production d'énergie par combustion de la biomasse (arbres, plantes, déchets agricoles etc). Il s'agira peut-être d'un élément important de la transition énergétique, notamment pour les transports, puisque les bio-carburants offrent une densité énergétique comparable à celle des carburants fossiles. Cependant, compte-tenu des faibles liens de ces techniques avec la physique, nous n'en ferons qu'une description très rapide dans ce cours.

Les combustibles fossiles sont issus de gisements en profondeur, si bien que leur combustion ajoute du CO₂ dans l'atmosphère, ce sont donc des sources de GES majeures. Par contre, les végétaux tirent leur carbone du CO₂ atmosphérique, et relâchent ce CO₂ lors de leur combustion, si bien que, *sur le long terme*, le cycle croissance – combustion des plantes n'ajoute pas de CO₂ dans l'atmosphère. Ainsi, **les bio-énergies peuvent être considérées comme peu émettrices de CO₂** - et, par ailleurs, comme renouvelables.

Ceci n'est vrai, cependant, que si les terres utilisées sont déjà des terres agricoles – et pas si une forêt naturelle (puits de carbone), est détruite pour être remplacée par un champ de canne à sucre ou de maïs destiné à produire des bio-carburants. Ce n'est pas totalement vrai non plus si les cultures font appel à un apport d'engrais obtenus par utilisation d'énergies fossiles (et/ou à des engins agricoles fonctionnant aux carburants fossiles).

Types de bio-énergie (*) :

- La biomasse « traditionnelle » (bois) reste la forme de bio-énergie principale (cf fig. 2.9), mais avec des rendements insuffisants pour couvrir les besoins actuels de manière durable.
- Les biogaz sont des gaz (méthane essentiellement) issus de la digestion, par certaines bactéries, de déchets agricoles, agro-alimentaires, ménagers, etc. Ils sont produits dans un digesteur (aussi appelé méthaneuse), qui peut être dimensionné à l'échelle d'une famille, d'une ferme ou d'une commune. L'usage de cette technologie reste à développer (il ne représente que quelques pourcents seulement du gaz actuellement consommé en France) mais sera au final limité par la quantité de déchets disponibles.

- Les bio-carburants (éthanol issu de la fermentation des sucres, biodiesel issu des graisses) présentent l'avantage de pouvoir être directement utilisés dans les véhicules existants, avec une bonne efficacité et peu d'émissions polluantes.

La « première génération » de bio-carburants est issue de cultures dédiées (maïs, canne à sucre), ce qui pose de sérieux problèmes de déforestation et de concurrence avec les usages alimentaires dans certains pays du Sud. La production, de l'ordre de $0,5 \text{ W/m}^2$, est faible par rapport aux autres énergies renouvelables, si bien qu'il faudrait, pour remplacer le pétrole dans les transports (consommation mondiale 3,5 TW), y consacrer 7 millions de km^2 soit 40 % de la surface totale cultivée au monde. C'est pourquoi le GIEC, avec le ton très mesuré qui le caractérise, qualifie le futur de cette première génération d'« incertain » [7].

Une « deuxième génération » de bio-carburants est donc en cours de développement, en s'appuyant uniquement sur des produits et déchets agricoles inutilisables pour l'alimentation. Son potentiel semble encore difficile à estimer.

Une « troisième génération », à un stade de recherche encore très prospectif, aurait recours à des micro-algues cultivées en mer, ce qui poserait moins de problèmes de partage des sols.

5.7 Énergie solaire

5.7.1 Rayonnement solaire

La notion de rayonnement du corps noir, importante en thermodynamique, donne une bonne description du rayonnement solaire et sera aussi nécessaire pour modéliser l'effet de serre au chapitre III.

L'absorption de lumière par un objet le réchauffe, et l'agitation thermique provoque l'émission d'un rayonnement électromagnétique.

Définition : rayonnement du corps noir

Un objet qui absorberait parfaitement la totalité de l'énergie lumineuse reçue, quelle que soit la longueur d'onde du rayonnement, est appelé un **corps noir**. À température fixée et donc à l'équilibre, toute l'énergie est ré-émise : on appelle **rayonnement du corps noir** cette émission.

Max Planck a montré en 1900 que le spectre du rayonnement expérimentalement observé sur un corps chaud était bien décrit par un modèle de corps noir, à condition d'introduire une quantification de l'énergie lumineuse⁵⁰.

Le spectre⁵¹ du rayonnement d'un corps noir de température T est ainsi donné par la loi de Planck :

$$s(\lambda) = \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc/\lambda}{k_B T}} - 1}$$

où $k_B \simeq 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ est la constante de Boltzmann, $c \simeq 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ la vitesse de la lumière dans le vide et $h \simeq 6,62 \times 10^{-34} \text{ J s}$ la constante de Planck.

Insistons sur le fait qu'avec ce modèle (*corps noir*), l'émission à une longueur d'onde λ ne dépend que de la température ; elle ne dépend pas du matériau (ni de sa couleur, ni de quelque autre propriété).

Remarque : On parle de *corps gris* pour désigner un objet n'absorbant que partiellement le rayonnement reçu.

Application Le maximum de $s(\lambda)$ est à la longueur d'onde $\lambda_m \simeq 2,9 \times 10^{-3}/T$. Quelle est la longueur d'onde du maximum du spectre d'émission du Soleil, en supposant sa température de surface de 6000 K ? Et pour le rayonnement du corps humain ? Quelles sont les gammes spectrales correspondantes ?

50. C'est l'un des travaux précurseurs à l'introduction de la notion de photon et à la mécanique quantique - nous ne développerons pas ce calcul ici, on peut le trouver par exemple dans Jaffe et Taylor [1], section 22.3.

51. On entend par "spectre" la distribution en longueur d'onde de la puissance émise. Ici, pour s'éviter des définitions un peu techniques, nous nous contenterons d'une quantité $s(\lambda)$ normalisée d'une façon que nous ne chercherons pas à préciser : c'est seulement la dépendance en λ qui nous intéresse.

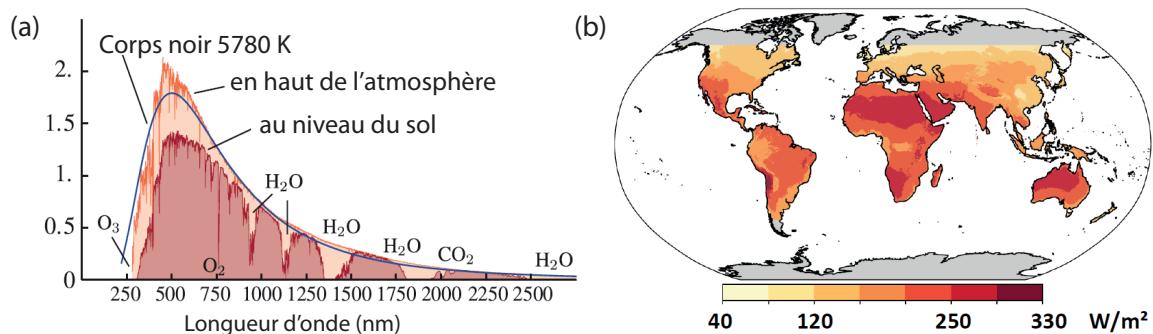


FIGURE 2.15 – (a) Spectres du rayonnement solaire (unité arbitraire) mesurés en haut de l'atmosphère et au niveau du sol; modélisation par un corps noir de 5780 K (adapté de la réf. [1]). (b) Répartition mondiale de la moyenne annuelle de l'éclairement solaire (puissance solaire par m²) au sol - éclairement direct + diffus [9].

Le spectre du rayonnement solaire, mesuré en haut de l'atmosphère, est assez bien décrit par la formule de Planck (fig. 2.15(a)). Le spectre solaire mesuré au niveau du sol présente des creux dûs à l'absorption par les molécules de l'atmosphère, notamment les UV absorbés par l'ozone O₃ et les raies des molécules d'eau ou de CO₂ dans l'infrarouge. *Vous rappelez-vous à quels moments du premier chapitre l'absorption de ces différentes molécules a été mentionnée ?*

La puissance totale (sommée sur toutes les longueurs d'onde) rayonnée découle du calcul de Planck :

Loi de Stefan-Boltzmann

La puissance totale rayonnée par une surface S d'un corps noir à la température T est

$$P = \sigma T^4 S$$

où $\sigma \simeq 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann.

Application La puissance lumineuse rayonnée par le Soleil est de $3,84 \times 10^{26} \text{ W}$. En déduire la température de surface du Soleil, connaissant son rayon de $6,9 \times 10^8 \text{ m}$.

On peut en déduire, connaissant le rayon de l'orbite terrestre ($1,50 \times 10^8 \text{ km}$) et le rayon de la Terre (6371 km), la puissance lumineuse totale reçue par la Terre (nous ferons ce calcul au TD 4) : elle est de l'ordre de 2.10^5 TW . Ainsi, il "suffirait" (mais ça n'a rien de simple évidemment) d'en capter une petite fraction - 0,01 % - pour couvrir toute la consommation énergétique mondiale.

L'éclairement (puissance solaire reçue par m²) moyen annuel au sol varie, selon la position géographique, entre quelques dizaines et quelques centaines de W/m² (fig. 2.15(a)).

5.7.2 Solaire thermique

Dans cette situation, l'énergie solaire est utilisée pour réchauffer un fluide.

- **Chauffage local** : on installe sur le toit un panneau absorbant parcouru par un tuyau dans lequel circule l'eau à réchauffer (circuit de chauffage, eau chaude sanitaire). Cette technologie simple récupère l'énergie solaire avec un bon rendement mais, en France métropolitaine, elle ne couvre en général pas la totalité des besoins en chauffage d'une maison, notamment par temps couvert.
- **Centrales solaires thermiques à concentration** : des miroirs concentrent la lumière sur un fluide (huile, sels fondus) qui est porté à très haute température (de 400 à 1000 °C) et dont la chaleur alimente une centrale thermique - laquelle, comme toute centrale thermique, convertit la chaleur en énergie mécanique puis en électricité avec un rendement faible, en raison de la limite de Carnot.



FIGURE 2.16 – Gauche : la centrale solaire thermique de Shouhang Dunhuang dans le désert de Gobi, en Chine (photo : [Global Times](#)). La plus grande d'Asie, elle occupe 8 km² et produit, au maximum, 100 MW. Les miroirs concentrent la lumière sur le fluide situé en haut de la tour centrale. Droite : la centrale de Mojave en Californie (source : [Wikipedia](#)). D'une étendue de 7 km², elle produit au maximum 250 MW avec un facteur de charge de 25 %. Ses miroirs cylindriques concentrent la lumière sur un tube horizontal situé sur leur axe.

Les miroirs sont motorisés de façon à suivre la position du Soleil. Cette technologie est donc adaptée uniquement au rayonnement direct du Soleil, pas au rayonnement diffusé par des nuages : elle doit être implantée dans des régions très peu nuageuses.

Elle présente par contre le mérite de produire de l'électricité à la fois le jour et la nuit, car le fluide conserve sa chaleur pendant quelques heures. Quelques installations très puissantes existent (figure 2.16), mais le coût de cette technologie la rend pour le moment peu compétitive [7].

5.7.3 Photovoltaïque

Absorption de la lumière par un semi-conducteur. Comme décrit en Terminale, un électron dans un semi-conducteur peut occuper différents niveaux d'énergie. Ces niveaux sont si proches qu'ils forment des *bandes* (intervalles continus) d'énergie ⁵². Au repos, les électrons occupent la *bande de valence* qui ne permet pas la conduction électrique. Cependant, un électron auquel on donne une énergie suffisante peut être promu dans la *bande de conduction*, où il peut participer à la conduction du courant électrique.

Cette énergie peut notamment être reçue par absorption d'un photon (fig. 2.17(a)), à condition que son énergie $E = hc/\lambda$ soit au moins égale à E_g , la largeur de la *bande interdite* (*band gap* en anglais) qui sépare les bandes de valence et de conduction. Cette propriété est à l'origine de l'**effet photovoltaïque** : les électrons promus dans la bande de conduction par absorption d'un photon peuvent être collectés (grâce à un empilement de couches de différentes compositions que nous ne chercherons pas à décrire) par un circuit électrique et donner naissance à un *photocourant*.

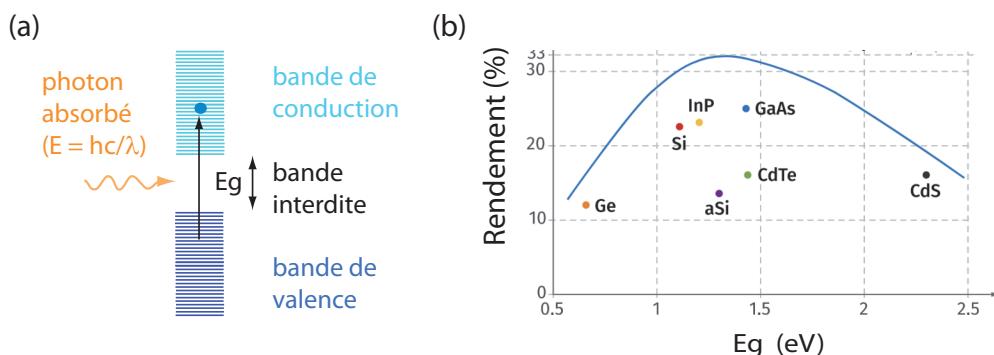


FIGURE 2.17 – (a) Mécanisme d'absorption d'un photon par un semi-conducteur. (b) Efficacité maximale théorique d'une cellule en fonction de l'énergie de gap du semi-conducteur qui la constitue (trait plein), et valeurs atteintes en pratique par différents semi-conducteurs utilisés.

52. Il s'agit d'une application de la mécanique quantique pour décrire les solides : le formalisme correspondant sera développé pendant les années ultérieures.

Par son principe, l'effet photovoltaïque ne permet pas de récupérer la totalité de la puissance lumineuse du spectre solaire :

- les photons d'énergie $E < E_g$ ne sont pas absorbés par le semi-conducteur,
- les électrons du photocourant portent chacun une énergie E_g . Si un électron reçoit du photon exciteur une énergie $E > E_g$, la différence $E - E_g$ est perdue sous forme de chaleur.

Ces deux contraintes⁵³ entraînent qu'une cellule photovoltaïque ne peut pas dépasser un rendement (rapport de la puissance électrique collectée sur la puissance lumineuse incidente) maximal appelé **limite de Shockley-Queisser** et noté ici η_{SQ} .

Cette limite dépend du band gap E_g du semi-conducteur utilisé : si E_g est faible, la plupart des photons solaires sont absorbés (énergie supérieure à E_g) mais ils génèrent des électrons d'énergie E_g faible donc η_{SQ} est faible ; mais si E_g est élevée, la plupart des photons du spectre solaire ne sont pas absorbés (énergie inférieure à E_g) donc η_{SQ} est faible aussi. Il existe donc une valeur intermédiaire de E_g permettant de maximiser η_{SQ} . On calcule (fig. 2.17(b)) que cette valeur se situe à $E_g = 1,34$ eV et qu'alors $\eta_{SQ} = 34\%$.

Ainsi, une cellule photovoltaïque ne peut pas fournir une puissance supérieure à 34 % de la puissance lumineuse solaire incidente.

Les cellules photovoltaïques commercialisées sont presque toujours composées de **silicium**. C'est l'un des éléments les plus abondants de la croûte terrestre, et la fabrication industrielle de couches de silicium de très haute qualité cristalline à bas coût est déjà connue pour l'électronique et l'informatique. Le gap du silicium est de 1,1 eV, ce qui le rapproche du maximum de la limite de Shockley-Queisser. Si le rendement de certains dispositifs de laboratoire a pu s'approcher de cette limite théorique, **les cellules commerciales actuelles ont des rendements de 15-20 %**. Ainsi, dans des régions d'éclairement moyen 100-200 W/m², la puissance produite sera de quelques dizaines de W par m².

L'une des pistes, pour dépasser la limite de Shockley-Queisser, serait d'utiliser des "cellules tandem" composées d'un empilement de deux semi-conducteurs différents. Dans ces structures, les photons qui ne sont pas absorbés par le semi-conducteur de plus grand gap peuvent être absorbés par le second. Des prototypes ont été réalisés mais, pour le moment, sans parvenir à des procédés de fabrication économiques et reproductibles sur de grandes surfaces.

Exercice Supposons une région assez ensoleillée où l'éclairement moyen est de 250 W/m². Quelle surface faudrait-il recouvrir de panneaux photovoltaïques de rendement 20 % pour couvrir la totalité de la consommation énergétique mondiale de 20 TW ?

En tenant compte des surfaces nécessaires à d'autres usages (agriculture, etc.), le GIEC estime le potentiel de l'énergie photovoltaïque à 32 TW [7]. Le coût de l'électricité photovoltaïque a considérablement baissé (fig. 2.20). La fabrication du module ne représente plus qu'un tiers de ce coût, le reste correspondant aux frais d'installation, d'obtention du permis, etc. [7]. Les matériaux utilisés (silicium, cuivre, verre, aluminium, argent) sont « largement disponibles, ont des substituts possibles, peuvent être recyclés » [7].

6 Caractéristiques des différentes sources d'énergie

6.1 Densité énergétique

Définition : densité énergétique massique

La densité énergétique massique est la quantité d'énergie qui peut être extraite d'un kg de matière dans laquelle cette énergie est stockée.

Les combustibles fossiles présentent une densité énergétique particulièrement élevée, de 15 à 50 MJ/kg, ce qui en fait des formes d'énergie particulièrement concentrées.

53. ainsi que d'autres mécanismes électroniques, qui ne seront pas décrits ici, qui jouent un rôle moins important et peuvent ajouter de l'ordre de 10 % de pertes.

Pour l'énergie hydraulique, l'énergie potentielle d'une masse m d'eau située dans un réservoir en amont, à une hauteur H par rapport au réservoir situé en aval, est donnée par mgH si bien que sa densité énergétique massique est gH . Pour le barrage des Trois-Gorges décrit plus haut, cette densité vaut 0,8 kJ/kg.

Pour l'énergie éolienne, l'énergie cinétique d'une masse m d'air en mouvement à la vitesse v est $mv^2/2$. La densité énergétique de l'air en mouvement est donc $v^2/2$, soit 32 J/kg si $v = 8$ m/s. L'énergie éolienne, encore davantage que l'énergie hydraulique, est une forme d'énergie très diluée, ce qui la rend difficile à capter.

Vecteurs énergétiques (*) : la densité énergétique est une propriété capitale pour des vecteurs énergétiques, notamment pour les transports qui nécessitent souvent de pouvoir stocker une grande quantité d'énergie sans alourdir excessivement le véhicule. De ce point de vue, l'essence, le kérósène ou le diesel, issus du raffinage du pétrole, présentent des avantages indéniables, si bien que la décarbonation des transports pose des difficultés spécifiques. Ainsi, les voitures électriques, pour lesquels l'électricité est le vecteur énergétique et doit être stockée, sont significativement alourdies par leurs batteries (densité des batteries à ion lithium : 0,5 MJ/kg), sans cependant que ce soit rédhibitoire. Pour le transport aérien, le poids de batteries électriques serait excessif et le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène (densité 100 MJ/kg) ou de bio-carburants (densité proche de celle du pétrole) est à l'étude mais pose encore des difficultés importantes⁵⁴.

6.2 Puissance produite par m^2 au sol (*)

L'emprise au sol de la production énergétique, notamment pour les énergies les plus diluées, possède des implications importantes : conflit d'usage des terres avec d'autres activités comme l'agriculture, impact sur la biodiversité, impact esthétique, etc.

Les méthodes qui récupèrent directement l'énergie solaire bénéficient de quelques dizaines à quelques centaines de W par m^2 d'éclairement solaire moyen (fig. 2.15). Les cellules photovoltaïques actuelles présentent un rendement de 15-20 %, donc une production de quelques dizaines de W par m^2 . Les bio-carburants de première génération, quant à eux, se limitent à moins de 1 W par m^2 , c'est-à-dire que leur rendement est inférieur à 1 %⁵⁵.

L'emprise au sol de l'énergie éolienne s'évalue de manière moins directe. Comme indiqué plus haut, une éolienne donnée prélève une fraction $C_P = P/P_{cin}$ de la puissance cinétique du vent. Par conséquent, une seconde éolienne qui serait placée juste derrière recevrait une puissance cinétique plus faible (de l'ordre de $(1 - C_P) \times P_{cin}$). Autrement dit, il ne sert à rien d'installer une très grande concentration d'éoliennes car la puissance cinétique disponible dans une région donnée est limitée. Compte-tenu de la perturbation du flux derrière une éolienne (fig. 2.18), il est déconseillé d'espacer les éoliennes de moins de $10D$ dans le sens du vent, et $5D$ dans le sens transverse, où D est le diamètre des pales des éoliennes [1]. Ainsi, si la limite de Betz $\left(\frac{16}{27}\right)$

est atteinte, chaque éolienne génère une puissance $P = \epsilon \left(\frac{16}{27}\right) \left(\frac{1}{2} \rho_a v^3\right) \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)$ et occupe une surface au sol $50D^2$, si bien que la puissance qui peut être générée par m^2 de surface au sol dans un champ d'éoliennes peut s'estimer comme $\epsilon \left(\frac{16}{27}\right) \left(\frac{1}{2} \rho_a v^3\right) \left(\frac{\pi}{4 \times 50}\right)$ et ne dépend pas de D (donc on ne l'améliorera pas avec des éoliennes plus grandes). Par exemple, dans une région où la puissance cinétique par m^2 , $\rho_a v^3/2$ vaut 300 W/ m^2 , cette puissance par m^2 au sol sera d'environ 3 W/ m^2 . C'est un potentiel plus faible que celui du solaire ou de l'hydraulique mais néanmoins significatif, d'autant que cette surface au sol n'est pas entièrement occupée par l'éolienne et reste disponible pour d'autres usages : photovoltaïque, agriculture, etc.

Par ailleurs, de grandes installations hydroélectriques comme le barrage des Trois Gorges (puissance maximale 22 GW, surface du réservoir 1084 km²) ou le barrage Hoover aux États-Unis (2 GW, surface du réservoir 680

54. Notez bien qu'ici l'électricité ou l'hydrogène sont utilisés comme moyens de stocker l'énergie pour un déplacement, sans libérer de GES, mais ne sont pas des sources d'énergie. Leur utilisation pour les transports demande donc de pouvoir les produire en abondance et de manière décarbonnée.

55. La référence [1] détaille, entre autres, le cas de l'éthanol issu de la canne à sucre au Brésil : par des méthodes d'agriculture très intensives, 7000-8000 litres de carburant sont produits par hectare et par an (1 hectare = 10⁴ m²). La densité énergétique de l'éthanol pur est de 30 MJ/kg soit 23 MJ/litre. L'énergie produite est donc de 16-18 MJ par an et par m², soit une puissance (moyennée sur un an) de 0,5-0,6 W par m².

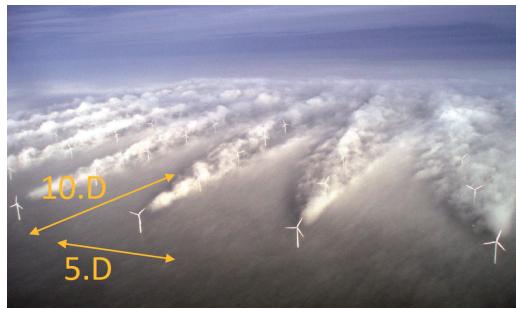


FIGURE 2.18 – Un parc d'éoliennes *offshore* au Danemark. La turbulence de l'écoulement derrière les éoliennes est rendue visible par des conditions météorologiques particulières faisant condenser des nuages de gouttelettes. Pour que chaque éolienne ne soit pas perturbée par ses voisines, il faut que l'espacement soit supérieur à 10×5 fois le diamètre des pales.

km^2) fournissent environ 3-20 W par m^2 occupé au sol.

Enfin, pour l'énergie nucléaire, la surface occupée est naturellement beaucoup plus faible : ainsi la centrale de Gravelines (Nord) occupe 150 ha et produit environ 3,7 GW, soit 2,5 kW/ m^2 .

Pour aller plus loin, il serait nécessaire d'intégrer à cette estimation une analyse complète du cycle de vie, prenant en compte la surface nécessaire à l'extraction des combustibles et des matériaux utilisés pour la fabrication des installations, etc.

6.3 Taux de retour énergétique (*)

On définit le **taux de retour énergétique** (TRE) (*energy returned on invested* - EROI en anglais) comme le rapport entre l'énergie utile produite par une installation donnée et l'énergie mobilisée pour faire fonctionner cette installation. Plus le TRE est élevé, plus l'exploitation est rentable ; à l'inverse un TRE proche de 1 signifie que l'on investit autant d'énergie que l'on en récupère (ce qui n'a évidemment aucun intérêt).

Comme toute étude en cycle de vie, le TRE est difficile à estimer car il dépend fortement des conditions de production dans le contexte économique local. On en trouve des valeurs très variables dans la littérature.

L'extraction des combustibles fossiles est une activité particulièrement rentable d'un point de vue énergétique. Selon les études, on estime leur TRE entre 7 et 80, le GIEC donnant la valeur 30 [9]. En tout cas, ce TRE est en baisse [9], notamment en raison de l'épuisement progressif de certains gisements plus accessibles et du recours à des gisements « non conventionnels » plus difficiles à exploiter.

Le TRE des autres énergies n'est pas discuté dans le rapport du GIEC ; à titre d'exemple, la référence [26] trouvait en 2013 des valeurs comparables à celles des énergies fossiles pour l'éolien, l'hydroélectrique et le solaire à concentrateur, et un TRE encore plus élevé pour l'énergie nucléaire. Des valeurs sensiblement plus faibles sont trouvées pour le photovoltaïque et les biocarburants. Dans le cas des biocarburants de première génération, des TRE inférieurs à 1 sont parfois estimés [1], en raison de l'énergie nécessaire aux cultures et à la production des engrains, ce qui questionne l'intérêt du procédé.

6.4 Intermittence

L'utilisation des combustibles fossiles pour la production électrique présente l'avantage d'être relativement

- **stable** : la puissance produite varie peu dans le temps,
- et **pilotable** : on peut augmenter ou diminuer la puissance pour s'adapter aux fluctuations des autres centrales du réseau et aux variations de la demande par les consommateurs.

La production des centrales nucléaires est elle aussi stable et de plus en plus pilotable - avec cependant des interruptions significatives liées à la complexité des opérations de maintenance ⁵⁶.

56. Ainsi, en automne 2022, la moitié des réacteurs français étaient à l'arrêt ([lien](#)), en raison d'opérations annuelles de maintenance, de visites décennales de sécurité, et de contrôles exceptionnels faisant suite à la découverte de fissures dans certains réacteurs.

Par contre, certaines énergies renouvelables ne fournissent pas une puissance constante : elles sont **intermittentes**. Les fluctuations de puissance peuvent se faire à l'échelle de la journée (alternances jour-nuit pour le solaire photovoltaïque), de quelques jours (fluctuations météorologiques pour le solaire ou l'éolien - fig. 2.19) ou d'une année (variations saisonnières du vent et de l'irradiation solaire, des précipitations pour l'hydroélectrique⁵⁷, de l'amplitude des marées pour l'énergie marémotrice). Certaines de ces fluctuations sont parfaitement prévisibles à long terme (alternance jour-nuit, marées) tandis que d'autres sont beaucoup plus aléatoires. L'énergie géothermique, elle, présente peu d'intermittence.

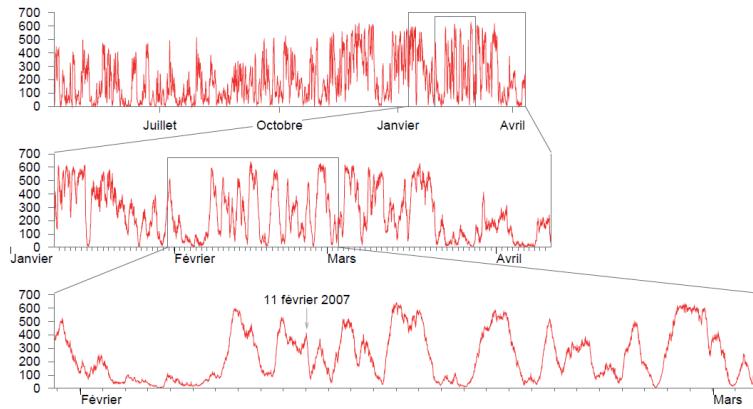


FIGURE 2.19 – Fluctuations de la production éolienne en Irlande (en MW), entre avril 2006 et avril 2007 [2]. La puissance installée était de 745 MW en 2007, répartie sur une soixantaine de fermes éoliennes.

Il est donc important de distinguer leur puissance instantanée à un moment donné $P(t)$, leur puissance moyenne $\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T P(t) dt$ (moyennée sur $T = 1$ an en général) et leur puissance nominale, qui est la puissance maximale atteinte dans les conditions normales de fonctionnement⁵⁸. On définit alors le *facteur de charge* comme le rapport de la puissance moyenne annuelle fournie sur la puissance nominale.

Pour les éoliennes, le facteur de charge est faible, mais en hausse : de 27 % en 2010 à 36 % en 2020 d'après les chiffres du GIEC [7]. En effet, les fluctuations du vent sont mieux gérées : la vitesse de rotation des pales s'adapte aux changements de vitesse (ajustement de Ω de sorte que le facteur λ reste constant - voir partie 5.5.2) ; les éoliennes sont davantage capables de supporter les vents forts sans devoir être mises à l'arrêt.

Exemple : la production éolienne en France a été en 2020 de 40 TWh = $1,4 \cdot 10^{17}$ J soit une puissance moyenne de 4,6 GW. La puissance "installée" (puissance nominale totale du parc) était de 17 GW. Le facteur de charge était donc, cette année-là, de 27 % (ceci ne veut pas dire que les éoliennes sont arrêtées 73 % du temps : elles fonctionnent environ 80 % du temps, mais pas à leur puissance maximale).

Le facteur de charge du photovoltaïque est quant à lui de l'ordre de 10-20 % [7].

Exemple : le parc photovoltaïque français avait une puissance installée de 19 GW en 2023, et a produit en moyenne sur l'année une puissance de 2,6 GW, soit un facteur de charge de 14 %.

Remarque : dans nos calculs précédents de puissance produite par m^2 , le facteur de charge était déjà inclus et ne doit pas être rajouté. Par exemple, l'éclairement moyen annuel étant d'environ 115 W/cm^2 en région parisienne, nous en déduisons une puissance moyenne de 17 W/m^2 si le rendement de la cellule est de 15 %. Dans cette valeur de 115 W/m^2 , les fluctuations de l'éclairement sont déjà incluses, puisque c'est une moyenne annuelle. Ainsi, le facteur de charge est déjà pris en compte.

Ainsi, le **développement de l'éolien et du solaire pose des défis importants pour adapter le réseau électrique aux intermittences**, avec différentes pistes :

- interconnexion avec des régions voisines pour que les fluctuations des différentes productions se moyennent,
- recours complémentaire à des centrales pilotables (hydrauliques ? nucléaires ? etc.),
- stockage de l'énergie pendant les périodes de forte production, dans des réservoirs de STEP actuellement, voire à terme en batteries électriques ou sous forme d'hydrogène pour d'autres usages,
- consommation flexible : adaptation de la demande aux fluctuations de la production par une tarification variable.

57. Les grandes centrales à réservoir - barrage - sont moins soumises aux fluctuations de débit que les petites centrales installées directement sur un cours d'eau.

58. Nous ne chercherons pas à clarifier cette notion, un peu floue, de "conditions normales de fonctionnement" : la définition précise de la puissance nominale relève de critères techniques qui peuvent varier selon les organismes et les types de centrales.

6.5 Coût (*)

Le coût des différentes énergies dépend fortement des contextes locaux et son estimation est délicate. Le dernier rapport du GIEC [7] donne des intervalles de coûts pour les électricités fossile et nucléaire, et l'évolution des coûts de l'électricité d'origine éolienne et photovoltaïque (fig. 2.20) : ces deux dernières ont baissé de manière spectaculaire en 20 ans et sont maintenant très compétitives par rapport aux énergies non renouvelables. L'une des explications proposées par le GIEC à ces progrès rapides est que les installations éoliennes et photovoltaïques sont de petites structures, ce qui a permis de faire de nombreux essais et d'en tirer les leçons rapidement.

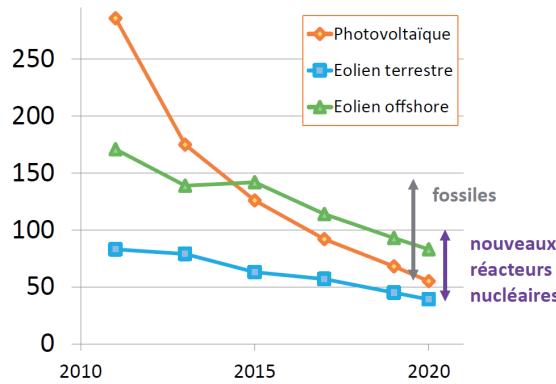


FIGURE 2.20 – Coûts de production de l'énergie électrique (en dollar par MWh) : plage de coûts actuels pour les énergies fossiles et nucléaire, évolution des coûts du photovoltaïque et de l'éolien [7].

6.6 Intensité carbone

Rappel : l'empreinte carbone représente l'ensemble des émissions de GES associées à un objet ou un service, calculé grâce à une analyse de cycle de vie. L'intensité carbone (en gCO₂e/kWh) est l'équivalent d'une empreinte carbone pour une filière énergétique.

Les combustibles fossiles représentent un peu plus de 80 % de l'énergie primaire consommée dans le monde [11] ainsi que **les trois quarts des émissions mondiales de GES**, très principalement en raison du **CO₂ issu de leur combustion**, mais aussi, pour un dixième environ, à cause des **fuites de méthane** souterrain, libéré lors des processus d'extraction.

Les énergies nucléaire et renouvelables, par contre, n'impliquent pas de combustion. Ainsi, bien que leur intensité carbone ne soit pas nulle si l'ensemble du cycle de vie est considéré (et ce cycle de vie peut varier fortement d'une centrale à l'autre ou d'un pays à l'autre), elle est très significativement inférieure à celle des énergies fossiles (fig. 2.21).

Avantages du gaz naturel. Les données de la figure 2.21 indiquent que le gaz naturel émet sensiblement moins de CO₂ que le charbon ou le pétrole ; il émet aussi beaucoup moins de particules fines. Pour cette raison, le secteur de l'énergie met en avant le gaz naturel comme « énergie de transition » (i.e. à privilégier en attendant de pouvoir décarboner totalement l'économie) et c'est à ce titre qu'il a été intégré par l'Union européenne, après de vifs débats, dans sa « taxonomie verte » (classification de finance durable). Il n'en reste pas moins une énergie fossile aux émissions de GES élevées⁵⁹. De plus, ce gaz naturel se compose principalement de méthane, qui est lui-même un puissant GES, si bien que les fuites dans le circuit de distribution du gaz ont aussi un impact négatif.

59. Précisons l'origine du terme « *gaz naturel* », dont la connotation positive peut être trompeuse. Il est apparu historiquement pour désigner le gaz d'origine fossile, par opposition au gaz manufacturé. Le « *gaz de ville* », distribué à partir du XIX^e siècle pour l'éclairage (avant l'arrivée de l'électricité), le chauffage, la cuisson etc. était autrefois du gaz manufacturé, produit en usine, généralement à partir de charbon. Il a été progressivement remplacé par le gaz naturel à partir des années 1960. Le gaz naturel est donc bien une énergie fossile, au même titre que le charbon et le pétrole.

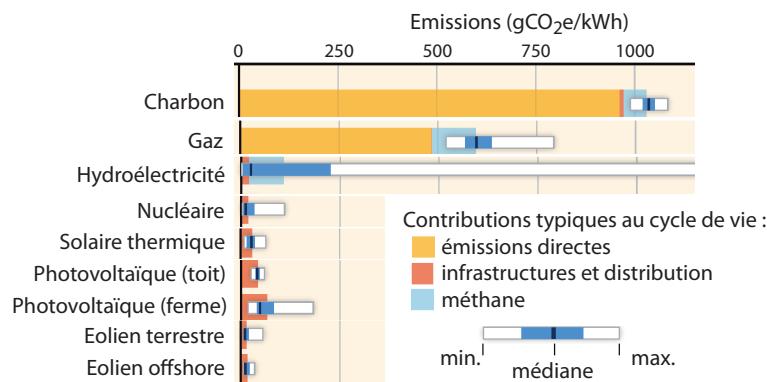


FIGURE 2.21 – Intensité carbone associée à différents modes actuels de production d'électricité. Les couleurs indiquent la répartition typique des contributions des différentes étapes du cycle de vie. Le rectangle blanc indique la dispersion des valeurs rapportées dans la littérature scientifique : la moitié de ces valeurs sont comprises dans l'intervalle bleu clair et la valeur médiane est indiquée en bleu foncé. Figure adaptée de [23].

6.7 Empreinte matériaux (*)

Une infrastructure énergétique, quelle qu'elle soit, consomme des matériaux pour sa construction, son fonctionnement et son démantèlement. La nature et la quantité de matériaux sont très variables d'une filière à l'autre et requièrent une analyse en cycle de vie pour être quantifiées. Par exemple, la filière nucléaire nécessite, outre de l'uranium (pour son combustible), du béton (pour le bâtiment) ou du zirconium (pour le gainage du combustible). Certaines éoliennes utilisent des aimants permanents (dans leur alternateur)⁶⁰, qui font intervenir actuellement des métaux tels que néodyme et dysprosium. Les technologies du solaire photovoltaïque requièrent silicium, cuivre, cadmium, indium, gallium (selon la technologie). Par ailleurs, le stockage et le transport d'électricité utilisent eux-aussi des éléments spécifiques (lithium pour certains types de batterie, cuivre pour les câbles, etc.).

Les énergie renouvelables, du fait de l'utilisation de sources d'énergie (vent, soleil) moins concentrées que le pétrole ou le nucléaire mobilisent plus de matériaux par kilowattheure produit. Ainsi, le déploiement de ces filières énergétiques pose la question de la disponibilité de ces matériaux et de l'impact environnemental de leur extraction (consommation en énergie et en eau, destruction d'espaces naturels, etc.). Par ailleurs peuvent s'ajouter des contraintes d'ordre géopolitique pour l'approvisionnement de certains métaux, dits « critiques »⁶¹ faisant l'objet d'une attention particulière.

Bien que le sujet soit complexe et la littérature scientifique encore limitée, il convient de noter les points suivants. La consommation de matériaux est en fait très largement dominée par des usages qui n'ont pas ou peu à voir avec la transition énergétique (par exemple, par les écrans plats dans le cas de l'indium). Par ailleurs, l'impact final dépendra de nombreux facteurs, en particulier d'évolutions futures techniques et non-techniques (type de filière développée, pénétration de certains objets telle que la voiture électrique, importance du recyclage, modification des usages, sobriété, etc.).

Un point de vigilance notable porte sur le cuivre, qui pourrait être en tension forte dans les décennies qui viennent. Il joue un rôle essentiel comme conducteur pour les câbles du réseau électrique⁶².

60. Seul 10 % du parc français d'éoliennes utilise des aimants permanents qui ont par ailleurs envahi les moteurs dans de multiples applications comme l'électroménager ou le numérique. Au niveau mondial en 2017, l'usage des aimants permanents est de 40 % pour les moteurs usuels, 35 % pour le numérique et 1 % pour les éoliennes. Source : Rapport du scénario négaWatt 2022, partie 4.

61. Une matière première est critique lorsqu'elle est : utilisée dans de nombreux secteurs de l'industrie ; difficilement substituable à court terme ; objet de nombreuses applications industrielles ; dotée d'une grande valeur économique. Par ailleurs, ses réserves sont concentrées géographiquement.

62. Pour cet usage, le cuivre pourrait être substitué par exemple par l'aluminium mais ce dernier fait lui aussi parti des métaux dont l'approvisionnement peut entrer en tension dans un mix électrique 100 % renouvelable.

7 Conclusion

Nous avons présenté ci-dessus différentes solutions, actuellement disponibles, pour décarboner la production d'énergie. Elles découlent en partie des recherches passées en physique⁶³.

Nous avons décrit quelques avantages et inconvénients de ces solutions. Toutes ont un coût - financier, humain, environnemental, si bien qu'il n'y a pas de solution miracle, ni de solution unique à toutes les situations. Il faut donc en parallèle diminuer les besoins énergétiques, à la fois par des usages plus sobres et par des technologies plus efficaces. S'agissant par exemple du chauffage, un usage plus sobre consisterait à chauffer moins les bâtiments ou à diminuer les surfaces occupées par personne, tandis que des gains d'efficacité énergétique seraient permis par l'isolation thermique ou le recours à des pompes à chaleur. L'éclairage électrique est un exemple de domaine où des gains d'efficacité importants ont déjà été obtenus (fig. 2.22). Cependant, **le développement de technologies plus efficaces et moins émettrices ne garantit pas que des baisses d'émissions seront effectivement obtenues**, notamment en raison des risques d'effet rebond.

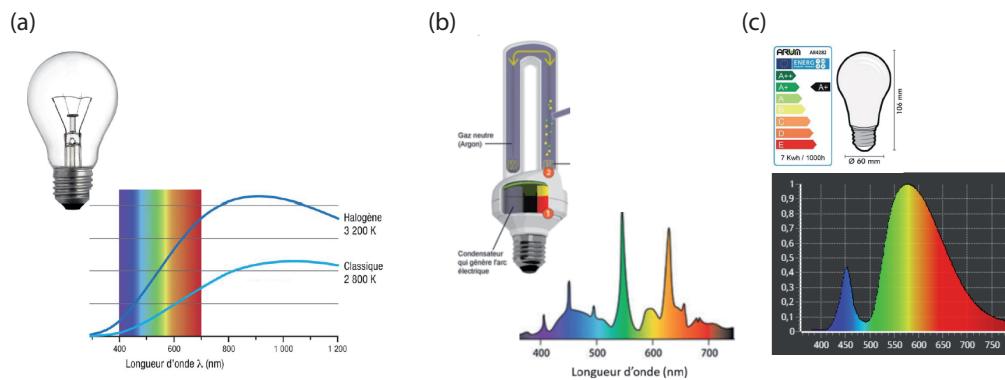


FIGURE 2.22 – L'exemple de l'éclairage électrique (*) : trois technologies d'éclairage arrivées successivement sur le marché : (a) la lampe à incandescence, (b) la lampe fluocompacte, (c) la diode électroluminescente (LED) blanche. La lampe à incandescence repose sur un mince fil conducteur (filament) chauffé par effet Joule. Le spectre d'émission est alors celui du corps noir ; même si des températures très élevées sont atteintes (2500-2700°C), ce qui permet de décaler le spectre vers le domaine visible, environ 95 % du rayonnement reste dans la gamme infrarouge et n'est donc pas utile pour l'éclairage. L'efficacité de ces lampes est donc de seulement quelques pourcents. Les lampes fluocompactes, diffusées dans les années 1980, puis les diodes électroluminescentes (LED) blanches dans les années 2000, reposent sur des principes entièrement différents et les LED blanches consomment jusqu'à 18 fois moins que les lampes à incandescence. L'éclairage joue maintenant un rôle assez faible dans la consommation électrique d'un bâtiment typique.

Définition : effet rebond

On parle d'effet rebond quand une amélioration de l'efficacité d'une technologie débouche sur une baisse de consommation énergétique moindre que prévu, car partiellement compensée par une hausse des usages.

On emploie aussi le terme « paradoxe de Jevons » quand l'augmentation des usages est telle que la consommation énergétique augmente malgré l'amélioration de l'efficacité - c'est-à-dire que les gains d'efficacité sont *plus que totalement* compensés par la hausse des usages.

Considérons l'exemple de la circulation automobile dans l'Union européenne (fig. 2.23) : l'amélioration de la conception des véhicules a permis d'améliorer leur efficacité, notamment autour de la période 2009-2013. Les émissions de CO₂ associées au transport automobile ont alors diminué, mais elles ont ensuite de nouveau augmenté en raison de l'augmentation des déplacements effectués. Ainsi, l'efficacité accrue des moteurs n'a pas empêché une augmentation des émissions ; il est même possible, bien que la courbe ne fournisse pas de moyen de le démontrer, que ce soit elle qui soit responsable de l'augmentation du nombre de km parcourus et donc, au final, de la hausse des émissions.

63. Pour plus de détails sur la façon dont la recherche en physique pourra contribuer à de nouvelles solutions dans le futur, on peut par exemple lire le [document de prospective](#) de CNRS Physique.

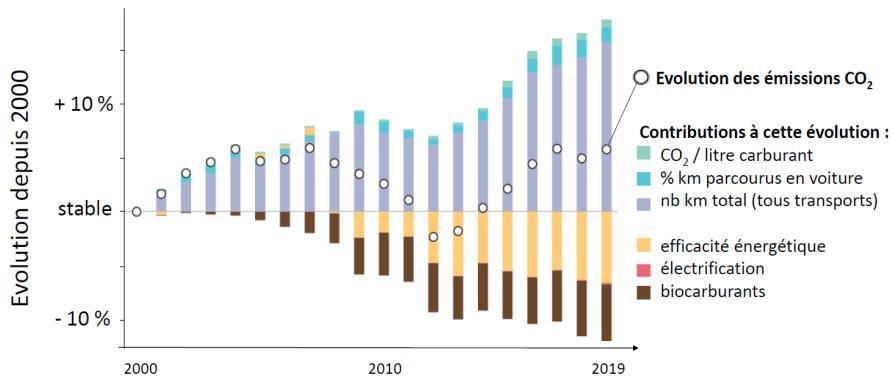


FIGURE 2.23 – Évolution des émissions de CO₂ du transport automobile en Union Européenne, et contributions à cette évolution [25]. Le développement de moteurs plus efficaces et le recours aux biocarburants ont permis (avec la voiture électrique, mais dont le rôle a été pour le moment négligeable) une baisse des émissions, mais dans le même temps le nombre de km parcourus a augmenté significativement, si bien qu’au final les émissions du transport automobile ont augmenté.

Ainsi, les gains technologiques doivent s’accompagner de changements de modes de vie et de politiques publiques pour déboucher sur une baisse significative des émissions de GES.

8 Annexes

8.1 Énergie totale, énergie interne, énergie thermique (★)

On rappelle dans cette annexe la définition de certains termes intervenant dans le principe de conservation de l'énergie ou 1^{er} principe de la thermodynamique.

8.1.1 Énergie totale et énergie interne

L'**énergie interne** U d'un système est la somme de toutes les contributions **microscopiques** à son énergie. Elle est égale à la somme de l'énergie cinétique de chaque entité élémentaire et de toutes les énergies potentielles d'interaction des entités élémentaires de ce système :

$$U = \sum E_{\text{cin,micro}} + \sum E_{\text{pot,micro}}$$

En ce sens, on parle parfois d'énergie *intrinsèque* au système (c'est l'énergie qu'il *renferme*).

L'**énergie totale** d'un système est la somme de son énergie interne U et des contributions **macroscopiques** à son énergie (énergie cinétique macroscopique $E_{\text{cin,macro}}$ et énergie potentielle des forces extérieures $E_{\text{pot,macro}}$) :

$$E_{\text{totale}} = E_{\text{cin,macro}} + E_{\text{pot,macro}} + U = E_{\text{méca}} + U.$$

En mécanique, la variation de l'énergie interne est généralement nulle ou négligée. Le principe de conservation de l'énergie se réduit à la conservation de l'énergie mécanique — somme des énergies potentielles et cinétique macroscopiques — et aboutit au théorème de l'énergie mécanique.

En thermodynamique, la variation de l'énergie mécanique est souvent nulle ou négligée ; le principe de conservation de l'énergie d'un système fermé est traduit par le premier principe de la thermodynamique.

8.1.2 Énergie thermique, chaleur.

L'**énergie thermique** est de l'énergie collective contenue dans les mouvements relatifs (les collisions) des particules qui forment le système ; ces mouvements incluent aussi les degrés de liberté de vibration et rotation dans le cas de molécules.

Plus précisément, l'énergie thermique est la part de l'énergie interne en excès de sa valeur à température nulle : $U(T) - U(T = 0)$. On a ainsi retiré de l'énergie interne les contributions des énergies de liaison chimique, de liaison nucléaire et l'énergie de masse au repos.

La **chaleur** est de l'énergie thermique qui se transfère d'un système à un autre.

Bibliographie

- [1] Robert L. Jaffe et Washington Taylor, The Physics of Energy, Cambridge University Press (2018).
La partie Énergie de ce poly s'appuie en grande partie sur ce superbe ouvrage, très complet mais peut-être un peu trop volumineux (850 pages) pour en faire une lecture recommandée en complément de ce cours.
- [2] David J. C. MacKay, L'énergie durable - Pas que du vent !, éd. de Boeck sup (2009). Disponible gratuitement [ici](#).
Une démarche typique de physicien par calcul d'ordres de grandeur, intéressante, mais maintenant un peu datée dans ses valeurs numériques, et avec des prises de position assez marquées de l'auteur.
- [3] Thomas W, Jr Murphy, Energy and Human Ambitions on a Finite Planet, Open Educational Resources, UC San diego (2021). Disponible gratuitement [ici](#).
Encore un livre de physicien. Récent, concis, accessible, et avec là-aussi des prises de position assez marquées de l'auteur (différentes du précédent).
- [4] R. Lehoucq, Cours sur l'énergie, collectif Labos1p5 (2023). Vidéos [partie I : énergie](#) et [partie II : puissance](#).
Cours pédagogique de niveau post-bac scientifique.
- [5] J. Lecomte, J.-M. Lourtioz, S. Laval-Szopa (Dir.), Enjeux de la transition écologique, EDP sciences (2021), disponible gratuitement [ici](#).
Un panorama pluridisciplinaire des problématiques environnementales destiné aux étudiantes et étudiants de Licence - intéressant si vous cherchez des compléments en-dehors du champ de la physique ; vous pouvez aussi consulter I. Ekeland et A. Bendhia, Les défis environnementaux du XXI^e siècle (2022).
- [6] B. Salviat, B. Proust, K. Allégraud (Dir.), Une énergie, des énergies, Comment fonctionne le Monde ?, Belin (2015).
Un ouvrage pluridisciplinaire formé d'un ensemble de chapitres courts, accessibles et couvrant des aspects très variés.
- [7] Sixième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) (2021).
Le rapport concerne le climat et ses évolutions, mais aussi les sources d'émissions de GES et une discussion très fouillée des solutions possibles et de leur potentiel. Les informations principales sont résumées dans le rapport de synthèse, qui ne fait "que" 85 pages et est accessible (en anglais) [ici](#).
- [8] Sixième rapport du GIEC, contribution du groupe I - Le changement climatique : les bases scientifiques physiques ([lien](#)).
La première partie du rapport complet du GIEC, consacrée au changement climatique, à sa mesure, sa modélisation et son anticipation, du point de vue des géosciences.
- [9] Sixième rapport du GIEC, contribution du groupe III - Atténuation du changement climatique 2022 ([lien](#)).
La troisième partie du rapport complet du GIEC, consacrée aux émissions de GES et aux moyens de les réduire, en version anglaise uniquement.
- [10] Rapport sur la Biodiversité et les Services Ecosystémiques, Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques, IPBES (2019).
Résumé en français (60 pages) lisible [ici](#).
- [11] Données issues de la plateforme de données et d'articles [Our World in Data](#), éditée par une équipe de chercheuses et chercheurs en économie et statistiques.

- [12] Atlas de l'Anthropocène, édité par F. Gemenne et A. Rankovic (2021).
- [13] Base de données publique de l'ADEME ([lien](#)).
- [14] International Energy Agency (2024), Global Methane Tracker 2024, IEA, Paris ([lien](#)).
- [15] W. Steffen et al., The Anthropocene Review 2, 81 (2015).
- [16] L. Engérant, N. Barrieu, H. Chauviré, M. Pitre, Les matières de l'immatériel, publication du cabinet d'experts Carbone 4 ([lien](#)).
- [17] Bilan énergétique de la France pour 2022, Ministère de la Transition écologique, mai 2024 ([lien](#)).
- [18] Bilan électrique 2022, données RTE ([lien](#)).
- [19] J.-B. Fressoz, Sans transition. Une nouvelle histoire de l'énergie. Éditions Seuil 2024.
- [20] G. de Temmerman et R. Delaporte-Mathurin, Fusion nucléaire : une avancée majeure mais le chemin reste long, [The Conservation](#), 2022.
- [21] Ministère de la Transition Ecologique, Données et études statistiques, 2023 ([lien](#)).
- [22] M. Vermorel, INRAE Productions animales, volume 8, pages 265-272 (1995) ([lien](#)).
- [23] Cinquième rapport du GIEC, contribution du groupe III - Atténuation du changement climatique (2014) ([lien](#)).
- [24] Rapport - La décomposition de l'empreinte carbone de la demande finale de la France, Ministère de la transition écologique, juillet 2022 ([lien](#)).
- [25] Transport and environment report 2021, European Environment Agency ([lien](#)).
- [26] D. Weissbach et al., Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants, Energy 52, 220 (2013).