



HAL
open science

Agir sur les causes des changements globaux

Jane Lecomte, Nathalie Frascaria, Jean-Christophe Bureau, Thierry Brunelle,
Franck Richecoeur, Jean-Michel Lourtioz, Laurent Audouin, Francois-Marie
Breon, Catherine Even

► **To cite this version:**

Jane Lecomte, Nathalie Frascaria, Jean-Christophe Bureau, Thierry Brunelle, Franck Richecoeur, et al.. Agir sur les causes des changements globaux. Enjeux de la transition écologique, EDP Sciences, pp.303 - 352, 2021, 978-2-7598-2662-9. 10.1051/978-2-7598-2662-9.c013 . hal-03483664

HAL Id: hal-03483664

<https://universite-paris-saclay.hal.science/hal-03483664v1>

Submitted on 4 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Chapitre 11

Agir sur les causes des changements globaux

Agir contre le réchauffement climatique impose des mesures fortes dans tous les secteurs pour atteindre des émissions nettes de CO₂ nulles d'ici à 2060, avec l'objectif de limiter les hausses des températures à 1,5 °C, voire plus certainement 2 °C, pour la fin du XXI^e siècle. L'obtention de la neutralité carbone, si elle s'accompagne d'une forte réduction des autres [gaz à effet de serre](#), permettra de stabiliser la température, mais n'arrêtera pas les effets du réchauffement sur les composantes lentes du [système climatiques](#) (élévation des mers, réchauffement océanique, fonte des calottes polaires) dont elle ne pourra que limiter l'ampleur. Autrement dit, comme nous l'avons indiqué en introduction du chapitre 10, les actions d'atténuation du changement climatique ne peuvent être totalement dissociées des actions d'adaptation à ce changement. La situation est différente pour ce qui concerne l'[érosion](#) de la [biodiversité](#), car il n'y a pas vraiment de sens à nous adapter à la dégradation continue de notre environnement naturel. La lutte contre l'[érosion](#) de la [biodiversité](#) impose de revoir drastiquement notre rapport au vivant (voir section 4.4) et nos modes d'appropriation des terres et des mers (voir section 5.1). Si on assiste déjà à des pertes d'[espèces](#) conséquentes, le grand péril déjà bien présent réside dans la perte des effectifs de populations entières, qui augmente leurs risques d'extinction (voir section 5.6). Tout au long de ce chapitre, nous présentons des actions possibles pour préserver la [biodiversité](#) et freiner le réchauffement climatique : comment réduire la pression [anthropique](#) sur les [écosystèmes](#), comment agir sur l'agriculture et l'alimentation, comment agir sur l'habitat, les transports, les modes de consommation et la production d'[énergie](#), comment agir directement sur les émissions de CO₂. Loin d'être des prescriptions, ces actions sont, en fait, celles que l'on retrouve dans la littérature, ouvrages et médias, traitant des mêmes sujets. Nous souhaitons juste que leur présentation dans ce chapitre invite à des réflexions en réalisant que des compromis seront toujours à faire dans nos choix sociétaux, économiques et technologiques.

11.1. Réduire la pression anthropique sur les écosystèmes : limiter la dégradation et la fragmentation des habitats

– J. Lecomte et N. Frascaria

11.1.1. Permettre la libre évolution

La crise de la Covid-19 nous a magistralement montré que les êtres vivants non-humains ont de grandes capacités à se réapproprier quasi instantanément les espaces libérés par les humains. En effet, durant la période de confinement du printemps 2020 de nombreux citadins ont été surpris de réentendre les oiseaux dont le chant est la plupart du temps masqué par les bruits de la ville, mais aussi de voir nombre d'animaux, plus habitués à se cacher et vivre en dehors des villes, déambuler au sein même de zones largement anthropisées. Ainsi des renards, des cerfs et des sangliers ont été observés en train d'arpenter les rues de grandes villes occidentales. Des groupes de singes ont envahi des quartiers de la ville de Medellin en Colombie, des otaries ont déambulé dans le port de Mar el Plata en Argentine et des kangourous ont cheminé dans la ville d'Adélaïde en Australie. La partie n'est donc pas perdue pour la **biodiversité** si tant est qu'on lui « lâche la bride ». Permettre la libre évolution des non-humains au sein d'espaces protégés suffisamment grands et nombreux et les admettre au sein même d'espaces anthropisés en ville et en campagne, c'est en effet leur permettre rapidement de développer différentes formes d'adaptation face aux perturbations (Fig. 11.1). En retour, il nous faut accepter différentes formes de naturalité [1] et de diplomatie envers les non-humains [2]. Edward Wilson dans un de ses derniers ouvrages formule qu'il faudrait garantir 50% d'espaces en protection sur notre planète pour stopper l'érosion de la **biodiversité** [3].

Mais pour illustrer les réponses offertes par la libre évolution face à l'érosion de la **biodiversité** et les modalités de sa mise en œuvre, nous vous invitons ci-après à la lecture des paragraphes de conclusion d'un ouvrage intitulé 20 000 ans: ou la grande histoire de la nature [4].

*« Dans la cacophonie des nouvelles apocalyptiques [concernant la **biodiversité**] qui nous assourdissent quotidiennement, il y a quelques bonnes nouvelles. La forêt revient et le mieux à faire est de ne surtout rien faire. Il faut lui laisser le temps et l'opportunité de vieillir et d'évoluer à sa guise et sans contraintes. Dans son sillage, elle a entraîné la réapparition de nombreuses **espèces** qui avaient disparu [en France] depuis longtemps. Voilà une liste réjouissante: pic noir, cigogne noire, chouette de Tengmalm, hibou grand-duc, phoque gris, loutre, castor, cerf, bouquetin, chamois, marmotte, quatre **espèces** de vautours, aigle royal, balbuzard pêcheur, faucon pèlerin, saumon atlantique, alose, esturgeon, mérrou brun, cachalot, rorqual, fou de Bassan, lynx boréal, loup gris, ours brun, et tant d'autres encore... La loi de protection de la nature votée en 1976 (voir section 1.5 de cet ouvrage) fut le*

*point de basculement de notre histoire. Les magnifiques paysages dont nous nous enorgueillons à juste titre n'étaient plus de tristes décors d'opéra complètement vides. Mais voilà que les acteurs reviennent peu à peu. Les solutions pour accélérer le processus de ré-ensauvagement de notre pays sont testées et approuvées. Dans le même temps, ce sont nos campagnes qui se vident à grande vitesse de toute la faune et la flore sauvages qui s'y étaient adaptées au fil des siècles et qui faisaient tout le charme de nos terroirs. La rationalisation et la simplification sont encore les maîtres mots de l'**agriculture intensive** et industrielle. C'est le prochain défi majeur à relever. Parviendrons-nous à enrayer la chute précipitée avant qu'il ne soit trop tard ? Avant que nos campagnes deviennent des déserts stériles. Là aussi on connaît les solutions []. La France sauvage est en perpétuel devenir. La nature évolue sans cesse et s'adapte en permanence à toutes les situations, avec ou sans l'homme. Il ne s'agit pas, dès lors, de revenir à un hypothétique état passé (et lequel ?) mais de décider quel visage nous voulons pour la France d'aujourd'hui et de demain. Quels espaces de liberté sommes-nous prêts à laisser à la nature pour qu'elle puisse s'adapter, réagir, proposer des combinaisons nouvelles et surtout garder tout son potentiel évolutif et créatif ? Il faut préserver la part d'imprévu de la nature,*



Figure 11.1: Quelques espèces qui ont pu bénéficier de politiques de protection de la nature. De haut en bas et de gauche à droite: le hibou grand-duc, le pic noir, la cigogne noire, le phoque gris, l'aigle royal, l'esturgeon, l'ours brun, le castor. Images sous licence Creative Commons ou libérée de droits d'auteur – Source : Stefdn, Alastar Rae, Gzen92, Andreas Trepte, torange.biz, Musicaline, Flickr.

sa capacité à rebondir. Déjà le chevreuil forme des troupeaux dans les grandes plaines cultivées: le faucon crécerelle, le faucon pèlerin et le hibou grand-duc nichent et chassent dans nos plus grandes villes: les chamois s'ébattent au bord de la Méditerranée, dans le maquis de l'Estérel: c'est du jamais vu depuis 20 000 ans! Ils ne nous attendent pas: ils proposent d'eux-mêmes de nouvelles façon d'habiter le monde et le pratiquer. Ils bousculent nos habitudes. Accueillir leurs propositions et tenter, à notre tour, de nous y adapter, quitte à faire des contre-propositions si certaines d'entre elles nous gênent, de manière à faire monde commun. Il nous faut également accepter l'idée de refuges et de corridors qui permettent aux espèces d'aller et venir, en fonction des fluctuations environnementales. Il y a tant de choses à expérimenter pour parvenir à trouver une nouvelle alliance avec le monde sauvage. Il ne tient qu'à nous de permettre à l'aventure de se poursuivre... ».

11.1.2. Accompagner la libre évolution

Cette section s'appuie sur la vidéo produite par l'Agence régionale de la biodiversité (ARB) en Île-de-France et intitulée: « Les Trames écologiques: des bénéfices multiples pour les humains » - <https://dai.ly/x7lcrry>

Les activités humaines impactent les milieux naturels, notamment en les fragmentant (voir section 5.1). Les espèces ne peuvent plus faire leur cycle de vie, se reproduire ou se déplacer. Si cette dégradation est trop importante et que l'on souhaite aboutir rapidement à un nouveau fonctionnement pour un écosystème dégradé sans attendre sa restauration naturelle, il est possible d'intervenir en le restaurant ou le réhabilitant. Les humains deviennent alors les pilotes de ces actions de restauration qui doivent s'adapter à chaque type d'écosystème. Les corridors écologiques ou « trames » sont un exemple de restauration volontaire. La notion de « trame », issue du Grenelle de l'environnement en 2007, recouvre l'ensemble des solutions pour empêcher cette fragmentation en reconnectant les espaces qui ont été séparés du fait des activités humaines. Il s'agit ainsi de mettre en place des corridors écologiques qui permettent cette reconnexion. Les trames sont dites verte, bleue, brune ou noire en référence aux milieux terrestres, milieux aquatiques, au sol et aux milieux obscurs, respectivement.

L'urbanisation et les pratiques intensives de l'agriculture consomment et fragmentent les milieux naturels. Les espèces se retrouvent ainsi prisonnières et fragilisées. Leur survie dépend alors d'un réseau continu de corridors et de réservoirs de la biodiversité. Ces trames apportent aussi des bénéfices importants aussi aux humains (Fig. 11.2).

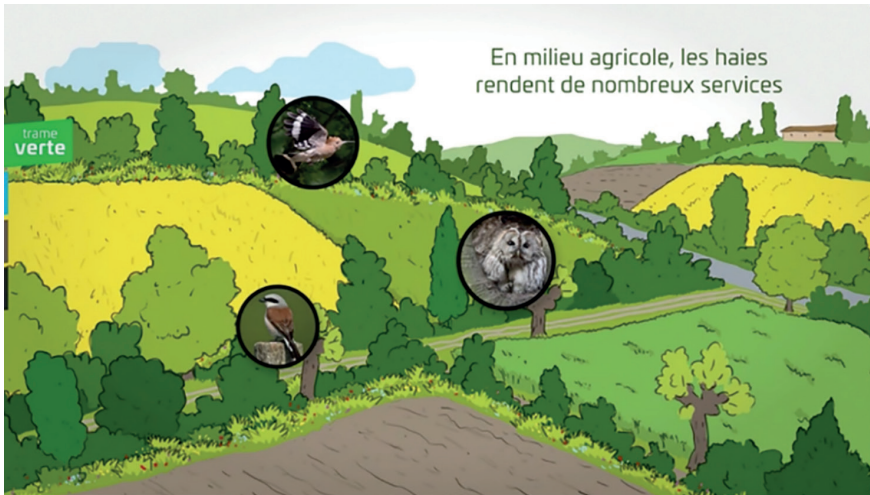


Figure 11.2: En milieu agricole, les haies limitent l'érosion des sols, protègent les cultures du vent, accueillent une faune utile aux agriculteurs, offrent du bois de chauffe local et enfin limitent la dissémination des pesticides. Illustration extraite de la vidéo produite par l'Agence régionale de la biodiversité (ARB) en Île-de-France.

La présence d'un cours d'eau, connecté à des zones d'expansion de crues, limite, par ailleurs, les risques d'inondation. Les méandres du cours d'eau et le boisement de ses berges améliorent la qualité de l'eau. Il offre un milieu naturel propice aux loisirs, à l'éducation, l'observation, la détente. Les zones humides régulièrement alimentées par les cours d'eau aussi sont très utiles aux humains (Fig. 11.3).



Figure 11.3: Les zones humides absorbent l'excès d'eau en période de crue, constituent des réserves d'eau lors des sécheresses, épurent l'eau grâce aux végétaux, réduisent l'effet de serre en piégeant du carbone dans les sols. Illustration extraite de la vidéo produite par l'Agence régionale de la biodiversité (ARB) en Île-de-France.

Dans les zones urbanisées, la nature des trames vertes joue aussi un rôle essentiel pour les humains (Fig. 11.4). En ville, la végétation améliore le cadre de vie des habitants, lutte contre l'effet d'îlot de chaleur urbain, rafraîchit la ville, réduit les pollutions et améliore notre santé.



Figure 11.4 : La pleine terre absorbe et filtre les eaux pluviales. Elle permet aussi la production de fruits et légumes. Illustration extraite de la vidéo produite par l'Agence régionale de la biodiversité (ARB) en Île-de-France.

La **pollution lumineuse** y perturbe les populations animales autant qu'elle nous affecte, alors que l'alternance jour/nuit est essentielle au sommeil et à la santé de même qu'elle permet d'observer le ciel étoilé.

En conclusion et pour reprendre les propos de Cristiana Pasça Palmer, secrétaire exécutive de la Convention sur la diversité biologique, « Une **biodiversité** saine est l'infrastructure essentielle qui soutient toutes les formes de vie sur terre, y compris la vie humaine ». Pour mémoire, 23% des terres ont connu une réduction de leur productivité en raison de la dégradation des sols, – plus de 75% des cultures vivrières mondiales dépendent de la pollinisation et la disparition des pollinisateurs représente une perte potentielle de 235 à 577 milliards de dollars US –, et 70% de médicaments anticancéreux ou synthétiques sont inspirés par la nature. Ces quelques exemples, qui rappellent les conséquences de l'**érosion** de la **biodiversité** et dont certains ont été présentés au cours de l'ouvrage, nous invitent tous à être les acteurs pour restaurer et préserver ce tissu vivant essentiel et interconnecté !

11.2. Agir sur le levier agricole : agroécologie, système alimentaire et réduction du gaspillage – J.-C. Bureau et T. Brunelle

L'agriculture est aujourd'hui un des secteurs de l'activité humaine pour lequel plusieurs limites planétaires de **développement durable** ont été dépassées (voir Fig. 10.12). Des solutions sont néanmoins possibles pour tenter de revenir en deçà de ces limites, réduire les pollutions et atténuer le réchauffement climatique. Dans ce qui suit, nous considérerons en particulier la réduction des gaz à effets de serre spécifiques à l'agriculture et le changement des modes de culture pour favoriser une meilleure qualité des sols. Ces évolutions ne peuvent être engagées efficacement que si nous changeons en même temps nos modes de consommation alimentaire tout en réduisant le gaspillage de nourriture. Ces aspects seront également discutés.

11.2.1. Réduction des gaz à effet de serre dans l'agriculture

L'agriculture n'est certes pas la source essentielle des émissions de **gaz à effet de serre** (voir section 7.2), mais elle est néanmoins un contributeur important par ses émissions de gaz spécifiques comme le **méthane** (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O).

Le **méthane** est essentiellement émis par les ruminants, les ovins et les bovins, que ce soit pour la production de viande ou pour l'élevage laitier. L'émission de **méthane** est, en fait, liée au processus de rumination des herbes, qui permet aux animaux de digérer la cellulose et s'accompagne d'un dégagement de **méthane**. L'ampleur du phénomène devient très importante dès lors que l'on a affaire à de grands troupeaux d'élevage comme en Australie, aux États-Unis, en Inde et, toute proportion gardée, comme en Irlande et dans certaines parties de la France. L'ampleur du phénomène est aussi renforcée par le fait que le **méthane** a un pouvoir réchauffant qui est environ 28 fois supérieur à celui du gaz carbonique (CO_2). Réduire les émissions de **méthane** dans l'agriculture ne peut se faire qu'en réduisant significativement le nombre des animaux d'élevage, ce qui suppose en retour que nous adoptions une alimentation plus végétale. Nous reviendrons sur ce point ultérieurement (voir section 11.2.3).

Le protoxyde d'azote est le second **gaz à effet de serre** par ordre d'importance qu'émet l'agriculture. Bien que ses émissions soient moins importantes que celles du **méthane**, son pouvoir réchauffant dans l'**atmosphère** est encore plus élevé puisqu'il est environ 260 fois supérieur à celui du gaz carbonique (voir section 7.3). Les émissions de protoxyde d'azote ont deux origines. Il provient, d'une part, de déjections animales et d'autre part, des engrais azotés qui sont épandus dans les zones de culture intensive, que ce soit des engrais issus des déjections animales (les lisiers) ou des engrais industriels. Réduire les émissions de N_2O , c'est donc en premier lieu réduire les déjections animales, ce qui suppose, comme pour le **méthane**, de réduire

le nombre des animaux d'élevage, non seulement celui des ruminants, mais aussi celui des porcs et des volailles. Cependant, réduire les émissions de N_2O , c'est aussi réduire la fertilisation des sols par des engrais azotés.

La réduction des engrais azotés pose les problèmes plus généraux des modes de culture agricole et de ce qu'on appelle la cascade de l'azote (Fig. 11.5). Il est bon de se rappeler qu'historiquement, à la fin du XIX^e siècle, on pensait que la population humaine serait à tout jamais limitée à quelques centaines de millions d'individus, car les quantités d'engrais azotés disponibles pour les cultures et la production agricole étaient elles-mêmes limitées au guano et aux déjections animales. Or, c'est grâce à la synthèse de l'ammoniac que des chimistes ont réussi à capturer l'azote de l'air de façon stable, à l'utiliser pour fabriquer des amino-nitrates et à nourrir une population mondiale qui est passée progressivement du milliard d'êtres humains à plus de sept milliards aujourd'hui. Si ce procédé a donc eu un impact très positif sur l'alimentation humaine, on s'aperçoit néanmoins, un siècle plus tard, que plus de la moitié de cet azote, qu'on utilise sous forme d'engrais azotés, ne profite pas véritablement aux plantes. L'utilisation d'engrais se traduit, en revanche, par des pollutions de l'air, de l'eau et des sols (voir sections 2.3, 2.4 et 2.5) et d'autres effets complexes qui participent à la cascade de l'azote; tenter de régler une des pollutions amène souvent à en recréer d'autres par des processus qui sont des cascades chimiques de transformation. Ce problème de flux biogéochimiques, celui de l'azote en particulier, est l'une des principales limites planétaires au **développement durable** (voir Fig. 10.12). Le traiter nécessite de revenir à des méthodes culturales qui reposent beaucoup plus sur les cycles biologiques « naturels », comme nous allons l'évoquer dans ce qui suit.

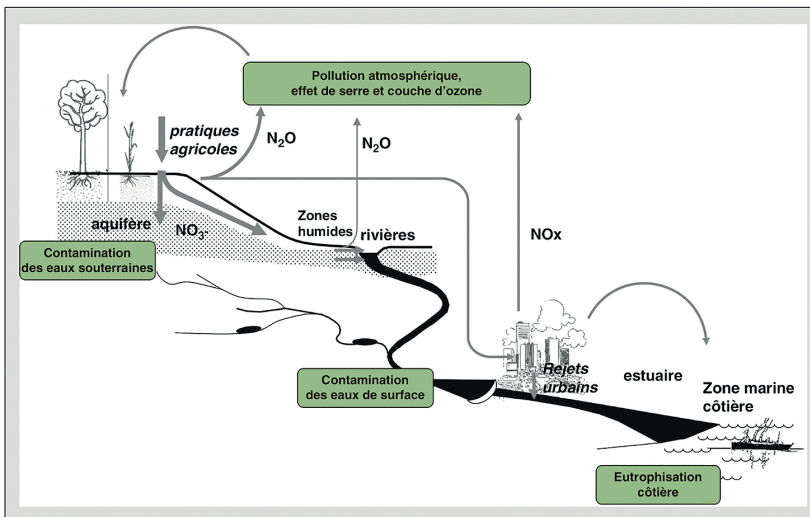


Figure 11.5 : Schéma de principe montrant le cheminement de l'azote depuis les sols agricoles jusqu'aux zones marines côtières à travers le continuum aquatique, les espaces urbains et le réservoir atmosphérique, et les problèmes environnementaux occasionnés par les pertes d'azote réactif à toutes les étapes de ce cheminement. Source : G. Billen *et al.* [5].

11.2.2. L'agroécologie et l'agriculture bio

Comme nous venons de l'évoquer, l'utilisation massive d'engrais et la cascade de l'azote sont des menaces sérieuses pour l'humanité en termes de pollutions. Des exemples emblématiques de pollutions sont ceux de zones maritimes du golfe du Mexique ou de la mer Baltique où l'on assiste à une **eutrophisation** complète des eaux. Comme l'a par ailleurs évoqué Christine Hatté dans un précédent chapitre (voir section 2.6), l'appauvrissement en carbone des sols dues aux pratiques d'**agriculture intensive** se traduit par une **érosion** des sols, qui risque de conduire à terme à des pertes importantes de **rendement** agricole sur une grande partie de la planète (voir Fig. 2.22). Dans ce contexte, l'**agroécologie** est une façon de concevoir des systèmes de production qui s'appuient sur les fonctionnalités offertes par les **écosystèmes** eux-mêmes en visant à la fois à diminuer les pressions sur l'environnement et à préserver les ressources naturelles. Autrement dit, il s'agit d'utiliser au maximum la nature comme facteur de production en maintenant ses capacités de renouvellement.

Limiter les engrais azotés peut ainsi consister à associer à des cultures gourmandes en azote des cultures de légumineuses qui sont capables de capter l'azote de l'air à travers les nodules de leurs racines et de le restituer au sol pour en faire profiter les autres cultures. Augmenter les stocks de carbone dans les sols, c'est d'abord arrêter d'en perdre en cessant progressivement les pratiques où les parties aériennes des plantes ne sont pas rendues au sol et où le labour jusqu'à 30 cm de profondeur contribue à une respiration massive des sols (par oxydation) ainsi qu'à une perte de leur **biodiversité**. Il est, à l'inverse, souhaitable de favoriser le couvert permanent en limitant le labour et en alternant les cultures, ce qui favorisera en retour la **biodiversité** et les apports d'autres nutriments au sol. Limiter le labour ne signifie cependant pas de s'en passer totalement, car le non-labour s'accompagne fréquemment d'emplois d'herbicides pour venir à bout d'adventices (« les mauvaises herbes ») envahissantes, notamment dans les grandes régions céréalières françaises.

Par ailleurs, au lieu de sélectionner systématiquement des plantes et des céréales où le grain est privilégié aux dépens des racines et des parties foliaires qui constituent des **puits de carbone**, un retour à un équilibre plus naturel entre les différentes composantes, grain, feuilles et racines, pourrait enrichir les sols de culture en carbone, sans pour autant diminuer les **rendements** au point que les cultures ne soient plus rentables.

De manière générale, l'**agroécologie** réintroduit ainsi de la diversité dans les systèmes de production agricole, et le rôle de la **biodiversité** comme facteur de production est renforcé, voire restauré. Parmi ces changements de méthode culturelle, on assiste au développement de l'agriculture « bio » qui s'impose peu à peu auprès d'un certain nombre de consommateurs. L'agriculture bio présente, en effet,

l'intérêt de ne plus utiliser de produits chimiques ou d'en utiliser peu, de réduire l'utilisation des engrais, d'associer des cultures complémentaires sur le même sol, de procéder à une rotation des cultures suivant les saisons et/ou de favoriser les cultures qui s'étalent sur un grand nombre d'années.

Cela étant, il faut rester prudent quant à un passage généralisé et rapide de l'agriculture conventionnelle à l'agriculture bio, en Europe par exemple, car sans **pesticides** ni engrais, les **rendements** à court/moyen terme de l'agriculture bio sont un peu plus faibles que ceux de l'agriculture conventionnelle, même si, dans des conditions expérimentales, on arrive à avoir des **rendements** similaires. Il serait regrettable que pour compenser cette baisse éventuelle de **rendement**, on accroisse les exportations, ce qui reviendrait à délocaliser les cultures, ou que l'on abatte les arbres pour disposer de plus de surface à cultiver. Un passage ambitieux à l'agriculture bio doit nécessairement se traduire par un changement de la demande et par des changements de comportements alimentaires, notamment par un meilleur stockage des produits alimentaires, par une diminution du gaspillage et par l'adoption d'une alimentation moins riche en viande et qui tire plus parti du végétal.

11.2.3. Modes de consommation alimentaire et réduction de gaz à effet de serre

Nous présentons ici les modes de consommation alimentaire et leurs effets sur les émissions de **gaz à effet de serre**. Nous allons voir comment manger différemment pour lutter contre le réchauffement climatique.

On sait qu'il y a une grande variabilité de la consommation alimentaire selon les différentes régions du monde et que cette variabilité concerne surtout la consommation de viande. Pour illustrer ce point, le graphique de la **figure 11.6** représente les niveaux de consommation de viande de ruminant (de viande rouge) exprimés en calories par habitant et par jour dans les différentes régions du monde avec en rouge, les niveaux actuels, et en jaune, les niveaux projetés à 2050. Nous constatons, par exemple, que le Brésil est la région du monde où les niveaux de consommation de viande de ruminant sont les plus élevés en atteignant 140 calories par habitant et par jour, alors que le niveau moyen est moins de 10 calories par habitant et par jour en Inde. Certes, l'Inde est un cas particulier en raison de restrictions religieuses sur la consommation de viande dans ce pays. Cela étant, si nous considérons le niveau de consommation par habitant de l'Afrique sub-saharienne, nous voyons qu'elle est deux à trois fois inférieure à celles des régions les plus consommatrices que sont, par exemple, l'Amérique latine, les régions de l'ex-URSS et les pays occidentaux.

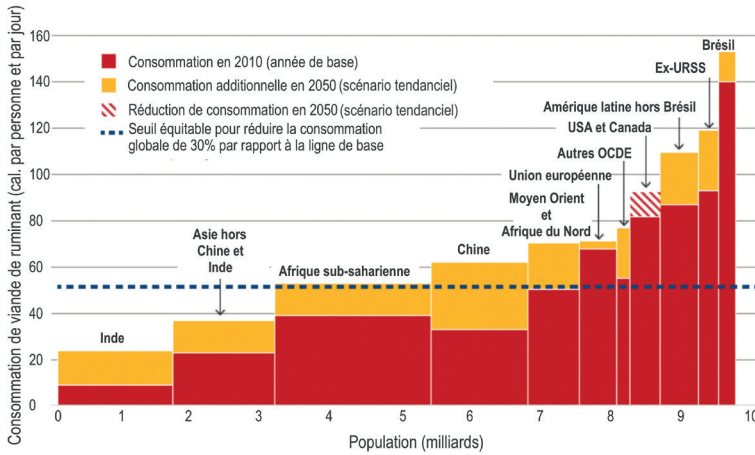


Figure 11.6 : Consommation de viande en calories par personne et par jour suivant les différentes régions du monde. En rouge, les données actuelles. En jaune, les consommations estimées en 2050. Source : GlobAgri-WRR model with source data from FAO (2017a) ; UNDESA (2017) ; FAO (2011b) ; and Alexandratos and Bruinsma (2012) [6].

Alors faut-il réduire notre consommation de viande? Autrement dit, doit-on choisir entre un régime végétarien, c’est-à-dire sans viande et avec des légumes, ou un régime végan où là on n’a plus du tout de produits animaux, y compris œufs et lait? Pour répondre à cette question, considérons les coefficients d’émission, exprimés en kilogrammes d’équivalent CO₂, pour un kilogramme de denrée alimentaire produite (Fig. 11.7).

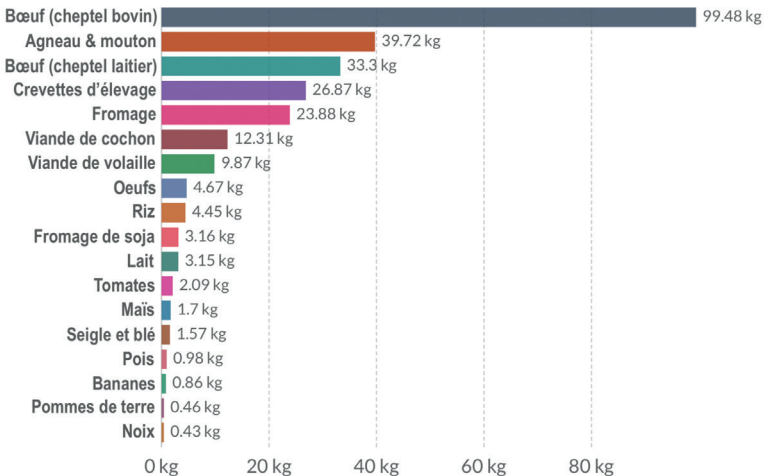


Figure 11.7 : Émissions de gaz à effet de serre pour 100 grammes de protéine. Les gaz à effet de serre sont mesurés en kilogramme équivalent dioxyde de carbone (kg eq. CO₂). Les gaz à effet de serre non CO₂ sont donc inclus en étant pondérés par leur impact de réchauffement relatif. Source : Poore J. & Nemecek T. Additional calculations by Our World in Data. OurWorldInData.org /Environmental-impacts-of-food. CC BY [7].

Nous constatons que la viande de bœuf a un coefficient d'émission très important avec environ cent kilogrammes d'équivalent CO₂ pour un kilogramme de nourriture produite. De même, des coefficients élevés sont estimés pour la viande de mouton et la viande d'agneau ainsi que pour un produit laitier tel que le fromage avec plus de vingt kilogrammes d'équivalent CO₂ pour un kilogramme de nourriture produite. À l'inverse, les coefficients sont bien plus faibles pour les produits végétaux avec des valeurs inférieures à cinq kilogrammes d'équivalent CO₂ pour un kilogramme de nourriture produite. Un point particulièrement intéressant à noter est qu'il y a des différences substantielles de coefficients d'émission pour les différents types de viandes et notamment, entre viandes rouges et viandes blanches. Les viandes blanches, porcs, poulets, ont des coefficients d'émission qui sont relativement plus élevés que les produits végétaux, mais bien moins élevés que la viande rouge ou que certains produits laitiers. Plusieurs études montrent qu'il suffirait de substituer une fois par semaine la viande blanche à la viande rouge pour réduire déjà substantiellement nos émissions liées à notre consommation alimentaire [8].

Pour mieux comprendre les coefficients d'émission qui sont présentés sur la [figure 11.7](#), il est nécessaire d'identifier les principales sources d'émission le long de la chaîne d'approvisionnement. Les études réalisées dans ce but indiquent que pour la viande de bœuf, dont le coefficient est le plus élevé, la principale source est le [méthane](#) produit par les ruminants lors de leur processus de digestion. C'est ce qu'on appelle la fermentation entérique. Ce type d'émission est, en fait, important pour tous les ruminants. Ceci explique les coefficients élevés rapportés sur la [figure 11.7](#) pour tous les produits issus de ces mêmes ruminants, que ce soit la viande de bœuf, le lait, les fromages et la viande de mouton ou d'agneau. Une autre source d'émissions pour les bovins est associée à l'usage des sols. On sait, en effet, que l'élevage de bovins et, de façon générale, l'élevage de ruminants, est très gourmand en terres, que ce soit des terres de pâturage ou des terres de cultures pour l'alimentation des animaux. La création de terres dédiées au pâturage peut, par exemple, conduire à une déforestation locale comme on le rencontre dans le cas de grands troupeaux d'élevage.

Les études indiquent, par ailleurs, que les émissions de [gaz à effet de serre](#) dues aux transports représentent une part très faible pour la plupart des produits qui sont considérés sur la [figure 11.7](#). Cela va à l'encontre de ce que l'on entend souvent, par exemple, à propos des circuits courts. Il y a un véritable consensus scientifique sur le fait que les circuits courts ou l'alimentation locale ne sont effectivement pas des leviers importants de réduction d'émission de [gaz à effet de serre](#) [9]. À l'inverse, les circuits courts et l'alimentation locale sont à encourager, car ils incitent à maintenir la production agricole sur notre territoire.

Considérons maintenant les régimes alimentaires dans leur ensemble au-delà des produits agricoles, comme il a été présenté. La [figure 11.8](#) représente le potentiel d'atténuation des émissions de [gaz à effet de serre](#) pour différents régimes alimentaires types, en supposant que l'ensemble de la population les adopte.

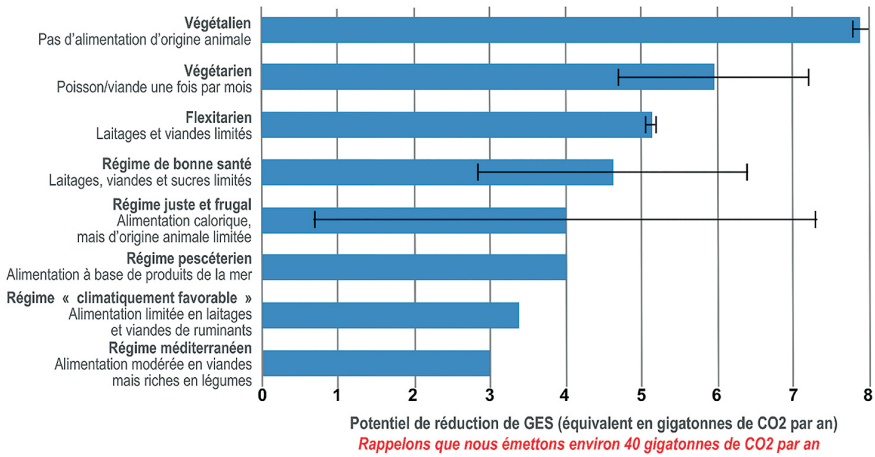


Figure 11.8 : Réduction des gaz à effet de serre envisageable en 2050 par le changement de régime alimentaire selon différents scénarios examinés dans la littérature. Les barres d'erreur correspondent à des effets additionnels, possibles ou non, de stockage de carbone selon l'occupation des sols. Les données sans barre d'erreur sont issues d'une étude unique. Source : IPCC report 2019, p. 488 [10].

Le régime alimentaire qui permet les plus fortes réductions d'émission est le régime végétalien, qui est le régime alimentaire où l'on ne mange aucun produit animal, y compris le lait et les œufs. Ensuite, viennent les régimes végétariens et flexitariens. La consommation de viande est exclue du régime végétarien alors que le régime flexitarien ne l'exclut pas mais consiste néanmoins en une réduction importante de la viande. Probablement le résultat le plus important rapporté sur la figure 11.8, est le fait que les régimes de type méditerranéen ou ce qu'on appelle encore les régimes climatiquement favorables, c'est-à-dire des régimes où l'on consomme moins de viande, mais où on continue tout de même à en consommer, permettent des réductions significatives d'émission. Le niveau de réduction pour ces régimes atteint près de 10% par rapport au régime alimentaire standard, soit environ 4 gigatonnes de CO₂ en moins par an par rapport aux 40 gigatonnes d'émission totale de gaz à effet de serre chaque année.

Pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre, il n'est donc pas nécessaire de devenir tous végétariens ! Il est préférable de privilégier une réduction raisonnable de notre apport en viandes et en particulier en viandes rouges. Cette réduction se traduira d'une manière ou d'une autre par une diminution du nombre d'animaux élevés pour la viande, en particulier des troupeaux de ruminants.

11.2.4. Gaspillage alimentaire et émissions de gaz à effet de serre

Une bonne partie de notre consommation alimentaire est perdue ou gâchée. En réduisant la perte de produits alimentaires, on peut aboutir aussi à d'importantes réductions d'émission de gaz à effet de serre. C'est ce qu'illustre le graphique sur la

figure 11.9 qui représente les différentes pertes et gaspillages alimentaires dans les grandes régions du monde.

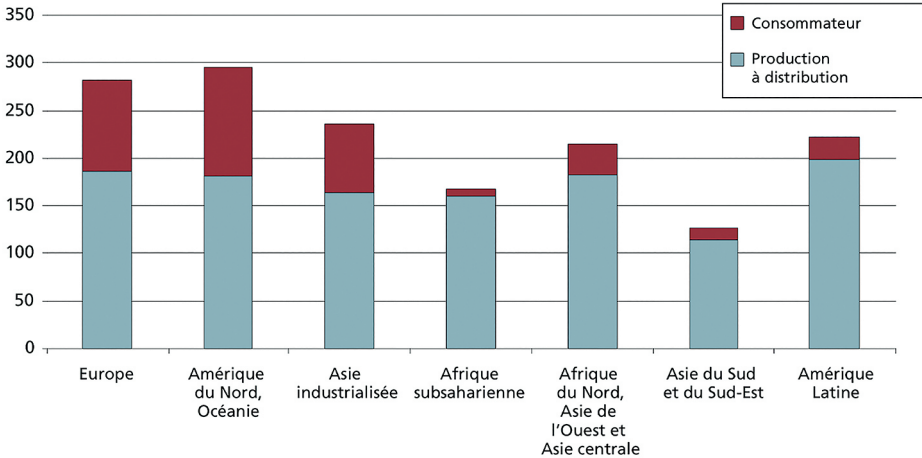


Figure 11.9 : Pertes et gaspillages alimentaires en kilogrammes par habitant, par an et par région, aux stades de la consommation et de l'avant consommation. Source : FAO, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture⁹³.

En bleu sont rapportées les pertes de production jusqu'à la vente au détail et en rouge, les pertes au niveau du consommateur. Ces pertes sont exprimées en kilogrammes par personne et par an. On constate qu'en Europe, il y a presque deux cent soixante-quinze kilos de produits perdus ou gaspillés en moyenne par personne. Les niveaux sont bien inférieurs en Afrique sub-saharienne, par exemple, où les pertes sont d'environ cent soixante kilogrammes en moyenne par personne. L'écart se situe essentiellement dans les pertes au niveau de la consommation. Certes, ces chiffres sont entachés d'une grande incertitude, car ils ont été estimés à partir d'un certain nombre d'hypothèses relativement simplistes. Cependant, ils fournissent une indication réaliste des écarts entre les différentes régions du monde. D'un point de vue global, on estime à 30 % le pourcentage total de pertes et de gaspillages de produits alimentaires dans le monde.

Ce sont, en fait, les fruits et les légumes qui les produits alimentaires que l'on gaspille le plus, car ce sont aussi les produits les plus périssables. Le graphique de la figure 11.10 représente le pourcentage des pertes de production initiale suivant les différentes régions du monde. Contrairement au graphique précédent, on constate globalement peu d'écarts entre les différentes régions. Dans les régions industrialisées, les fruits et légumes sont essentiellement perdus au stade de la production. On constate aussi 15 à 30% de gaspillages sur l'ensemble des achats par les

93. <http://www.fao.org/3/i2697f/i2697f.pdf>

consommateurs. Dans les régions en voie de développement, les pertes principales se situent au niveau de la transformation des produits et de leur distribution.

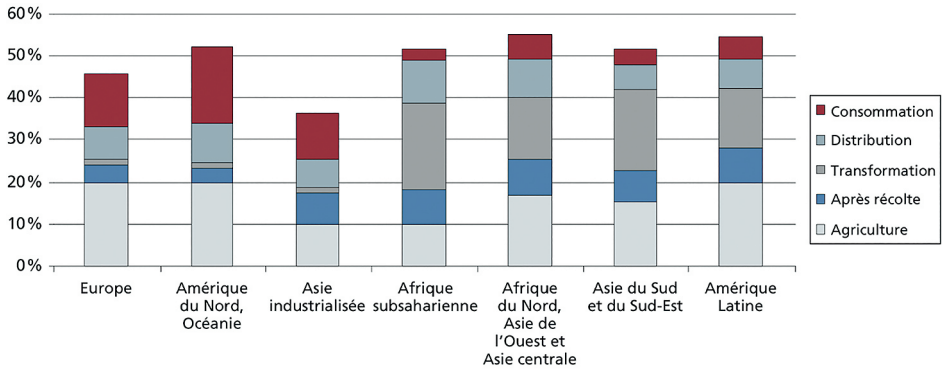


Figure 11.10: Production initiale perdue ou gaspillée aux différents stades de la chaîne alimentaire pour les fruits et légumes dans le monde. Source : FAO, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture⁹⁵.

À l'opposé des fruits et légumes, ce sont les produits laitiers qui sont les moins perdus et les moins gaspillés. La raison principale en est que ce sont des produits moins périssables et surtout plus faciles à conserver. Le pourcentage de production initiale, perdue ou gaspillée, est typiquement de 10 à 20% et intervient principalement au niveau de la consommation.

11.3. Solutions techniques pour réduire les émissions individuelles de gaz à effet de serre – F. Richecœur

Nous décrivons dans cette section certaines des solutions techniques qui peuvent être mises en œuvre pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) que nous produisons individuellement dans la vie de tous les jours. Rappelons qu'entre 1990 et 2017, la France a diminué de 15% ses émissions de gaz à effet de serre et ce, malgré l'augmentation dans le même temps de celles induites par les transports. Le dioxyde de carbone (CO₂), provenant majoritairement de l'utilisation d'énergies fossiles, représente 70% des émissions de GES en France. Trois secteurs prédominent comme dans beaucoup de pays occidentaux : le logement résidentiel, les transports et l'agriculture (Fig. 11.11). Dans ce qui suit, nous nous focaliserons principalement sur les deux premiers secteurs et n'apporterons sur l'agriculture, déjà traitée par ailleurs (sections 10.7 et 11.2), que des commentaires sur les techniques d'analyse des sols et des cultures.

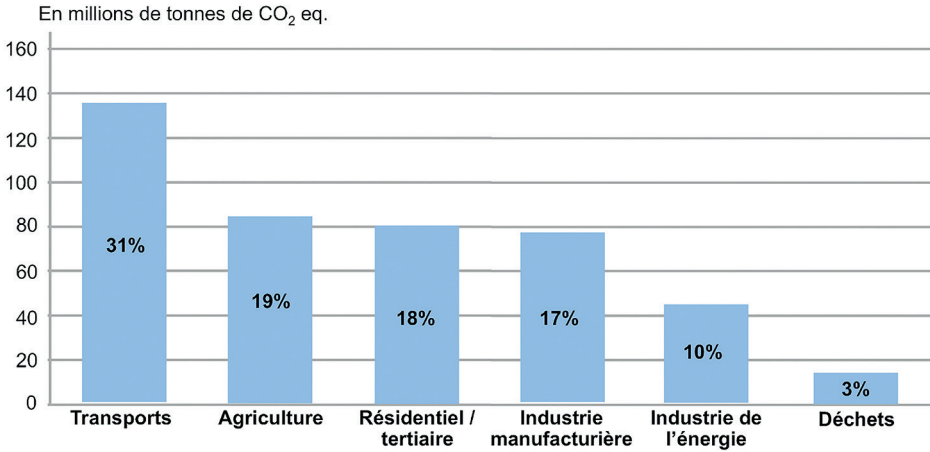


Figure 11.11: Répartition sectorielle des émissions de gaz à effet de serre en France en 2019⁹⁴.

11.3.1. Les technologies pour chauffer et isoler l'habitat individuel

Au-delà de la phase de construction des logements, l'habitat individuel contribue fortement à l'émission de gaz à effet de serre, principalement le CO₂, à travers les solutions de chauffage encore majoritairement utilisées aujourd'hui. L'enjeu est de parvenir à décarboner le chauffage en combinant plusieurs actions. Les émissions de CO₂ peuvent être vues comme le produit de trois termes : les émissions de CO₂ par unité d'énergie utilisée, l'énergie nécessaire par mètre carré de logement et la surface de logement :

$$\text{Quantité de CO}_2 = \overset{1}{\frac{\text{Quantité de CO}_2}{\text{Énergie de chauffage nécessaire}}} \times \overset{2}{\frac{\text{Énergie de chauffage nécessaire}}{\text{Surface des logements}}} \times \overset{3}{\text{Surface des logements}}$$

Réduire les émissions consiste à réduire chacun des trois termes. Commençant par le dernier terme, une première action évidente est d'adopter des logements dont la surface est raisonnable et adaptée aux usages. Intéressons-nous maintenant au premier terme et à l'énergie utilisée. Toutes les sources d'énergie n'ont pas la même empreinte carbone. Pour un kWh destiné au chauffage, la quantité de CO₂ émise peut varier pratiquement du simple au double :

94. <https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/defis-environnementaux/changement-climatique/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/article/les-emissions-des-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-residentiel>

- gaz naturel : 0,198 kg de CO₂ par kWh;
- électricité : 0,213 kg de CO₂ par kWh (méthode « saisonnalisée » EDF-ADEME) ;
- mazout : 0,264 kg de CO₂ par kWh.

Une réduction significative des émissions est obtenue en remplaçant toutes les chaudières au fioul/mazout par des dispositifs de production de chaleur utilisant le gaz naturel ou l'électricité. Ces derniers systèmes ont vu leurs rendements augmenter ces dernières années. Le rendement est le rapport entre l'énergie utilisée en entrée du dispositif et l'énergie de chauffage produite.

Les chaudières au gaz naturel fonctionnent sur un principe simple : le gaz est brûlé, les flammes obtenues chauffent de l'eau qui circule dans un réseau de canalisation alimentant des radiateurs qui transfèrent la chaleur depuis l'eau vers l'air de la pièce. Il existe néanmoins trois types de chaudière :

- Les chaudières traditionnelles où l'énergie thermique issue de combustion du gaz est utilisée pour chauffer l'eau à haute température (de 60 à 90 °C). Leur rendement est compris entre 0,6 et 0,9 ;
- Les chaudières basse température qui sont conçues pour chauffer l'eau à 50 °C. Elles atteignent des rendements entre 0,9 et 0,95 ;
- Les chaudières à condensation, qui permettent d'atteindre des rendements théoriques supérieurs à 1,0 entre 1,05 et 1,1. Il est effectivement possible d'avoir des rendements supérieurs à l'unité en utilisant une grande partie de l'énergie chimique contenue dans le combustible, puis en récupérant en plus, par condensation, l'énergie contenue dans l'air ambiant.

Plusieurs technologies de chauffage électrique sont apparues au cours des cinquante dernières années. L'idée la plus simple pour concevoir un chauffage électrique est d'utiliser l'effet Joule en chauffant une résistance qui convertit l'énergie électrique en chaleur. Depuis les convecteurs de première génération jusqu'aux panneaux radiants actuels, les matériaux et circuits créés ont permis d'améliorer l'efficacité et le confort de ces systèmes, mais leur rendement ne peut pas dépasser l'unité. Le meilleur rendement est obtenu en utilisant une pompe à chaleur qui peut théoriquement fournir trois fois plus de chaleur qu'elle ne consomme d'électricité. Ceci est dû au fait que l'électricité n'est pas transformée en énergie thermique mais elle est utilisée pour transférer à l'intérieur du bâtiment la chaleur contenue dans l'air extérieur. Même quand il fait froid dehors, l'air contient de l'énergie thermique ! Le fonctionnement de la pompe à chaleur consiste donc à réchauffer l'air intérieur en refroidissant l'air extérieur (voir section 11.6 pour plus de détails).

Terminons maintenant par le deuxième terme de l'équation d'émission, qui quantifie l'énergie thermique nécessaire pour chauffer un mètre carré de logement. C'est en améliorant l'isolation du logement que l'on peut réduire ce terme. Spontanément,

la chaleur se propage du milieu chaud (l'intérieur du logement) vers le milieu froid (l'air extérieur en hiver). L'objectif de l'isolation est d'empêcher ce transfert de l'énergie thermique à travers les murs et les menuiseries en créant des barrières thermiques telles que :

- le double vitrage qui emprisonne une lame de gaz à très faible conduction de chaleur ;
- la laine de roche ou de verre qui emprisonne le volume d'air en limitant les transferts vers l'extérieur.

Une maison passive très bien isolée n'a besoin que de 15 kWh/m²/an, ce qui la rend plus performante que :

- la maison dite « à basse consommation » (50 kWh/m²/an) ;
- la maison bioclimatique (entre 40 et 50 kWh/m²/an) ;
- la maison dite « à Très Haute Performance énergétique (THPE) » (moins de 40 kWh/m²/an).

En conclusion, réduire les émissions de gaz à effet de serre, dues au chauffage des logements individuels, est possible en combinant plusieurs actions sur la taille des logements, l'utilisation de sources d'énergie à très faible émission et une isolation performante⁹⁶. Il est possible d'avoir une isolation optimale, mais cela demande une mise en œuvre spéciale et bien souvent une plus grande complexité technique avec, notamment, des matériaux spécifiques ou une gestion fine des flux d'air qui nécessite la ventilation du logement.

11.3.2. Les technologies pour les transports

Lorsque l'on parle d'émissions de GES dans les transports, on considère que 96% des gaz émis sont constitués de CO₂. Pour bien comprendre le problème des émissions, il est nécessaire de regarder les émissions respectives des différents modes de transport (Fig. 11.12) [11-13]. La majorité des émissions provient des voitures particulières et des véhicules légers, dû principalement au fait que ce sont les véhicules les plus nombreux. On note également que le nombre de kilomètres parcourus par personne est en constante augmentation. Les émissions du secteur aérien représentent 2% des émissions en France si l'on ne considère que les vols intérieurs. Cette proportion monte à 4% en prenant en compte les vols extérieurs. Le transport ferroviaire étant majoritairement électrifié, et l'électricité produite en France n'émettant que très peu de gaz à effet de serre, la contribution du train est négligeable.

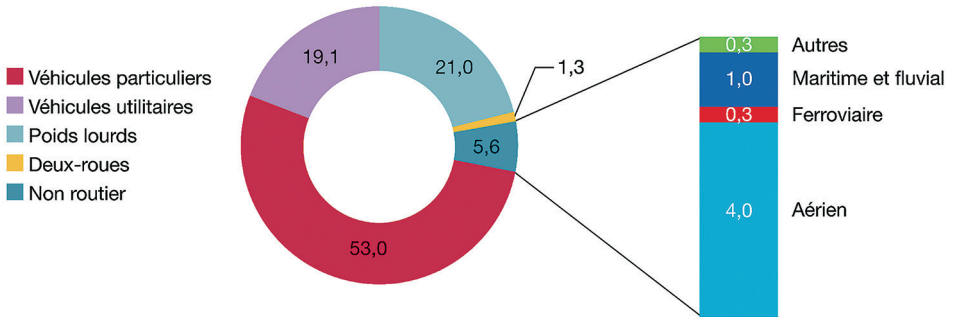


Figure 11.12 : Répartition des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) des transports en France en 2018 en %⁹⁵.

La contribution du transport routier a fortement augmenté depuis 1990. Les deux raisons principales viennent du fait que la population augmente et que chacun parcourt plus de kilomètres (Fig. 11.13, rectangles à droite). Heureusement, certaines technologies ont permis de réduire une partie des émissions grâce à l'amélioration des rendements des moteurs thermiques et au développement de nouveaux modes de propulsion bas carbone (Fig. 11.13, rectangles à gauche).

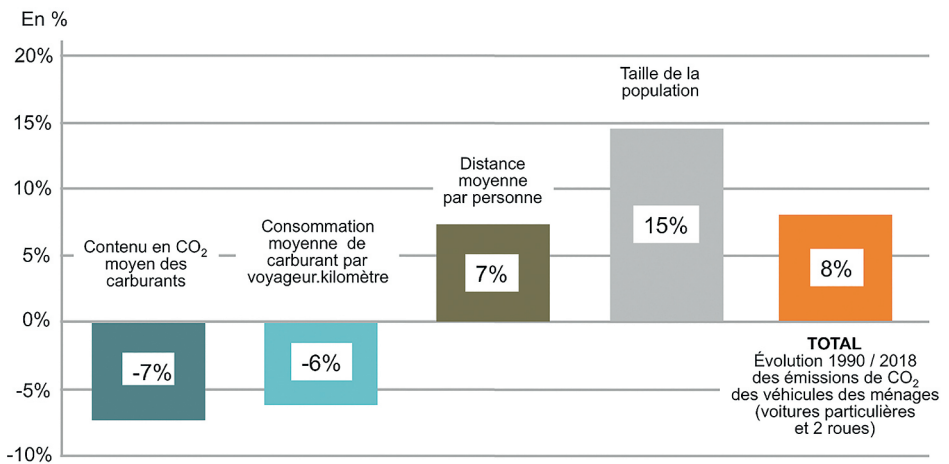


Figure 11.13 : Facteurs explicatifs de l'évolution des émissions de CO₂ des véhicules que possèdent les ménages – France – 1990 / 2018⁹⁵.

Parmi les améliorations technologiques effectuées dans le transport routier, les ingénieurs ont commencé par améliorer l'existant, c'est-à-dire optimiser les moteurs thermiques. Le transport routier a pu se démocratiser grâce au développement de

95. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/11-emissions-de-ges-des-transports>

la production de masse et l'utilisation de l'essence dans les moteurs. Quand un véhicule doit emporter son propre carburant (automobile, avion, bateau, etc.), l'essence est effectivement le candidat le plus performant. En termes d'énergie produite par unité de masse transportée, les performances de l'essence (10 000 Wh/kg) sont, par exemple, sans commune mesure avec celles d'une batterie au lithium (200 Wh/kg). On cherche donc à maximiser le rendement d'un moteur, c'est-à-dire le pourcentage d'énergie du carburant que le moteur va pouvoir utiliser pour propulser le véhicule. Le rendement augmente avec la température et la pression dans le moteur. On doit donc comprimer l'air, par exemple avec l'utilisation du turbo, et réaliser la combustion la plus efficace pour augmenter la température (Fig. 11.14). Seulement, il faut que les matériaux résistent. Actuellement, les rendements des moteurs thermiques ne dépassent pas 33%, dit autrement, 67% de l'énergie contenue dans le carburant est dissipée en chaleur dans l'atmosphère. La thermodynamique nous dit qu'il est très difficile de faire mieux (le rendement de Carnot).

Dans le secteur de l'automobile, pour franchir un cap et tendre vers l'absence d'émissions, il faut une rupture dans la motorisation, c'est-à-dire utiliser d'autres technologies. Un premier saut a été tenté avec les voitures hybrides, mais le gain en termes d'émission est finalement marginal par rapport à l'augmentation de la complexité qu'entraînent à la fois la gestion de deux moteurs et la récupération d'énergie au freinage. La voiture tout électrique a actuellement le vent en poupe, car elle permet de n'avoir localement aucune émission de GES et, en France en particulier, la production électrique bas-carbone aboutit globalement à des émissions très faibles. Techniquement, l'utilisation de moteur électrique est aussi plus simple que celle d'un moteur thermique. Il y a moins d'entretien, mais c'est, en revanche, toute une logistique industrielle et des habitudes de consommation à modifier pour permettre de produire des moteurs et des pièces en masse, de recharger les batteries, de réparer, recycler, partager...

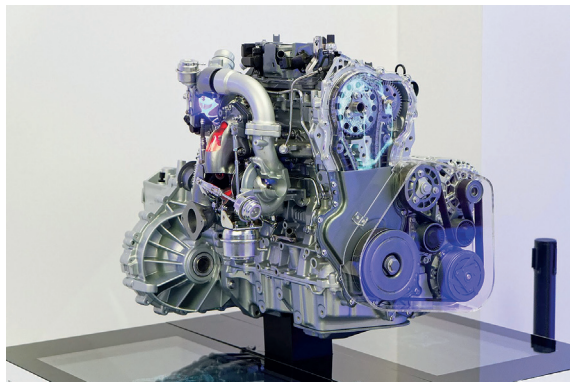


Figure 11.14 : Évolution de la complexité des moteurs thermiques pour augmenter le rendement. À gauche : Citroën A-series 2CV 602cc Engine. Source : Wikimedia Commons (source : Andrew Bone). À droite : Renault moteur energy dCi 160 twin turbo EDC. Source : Wikimedia Common (source : Thesupermat).

Dans le secteur aérien, la chute du trafic aérien pendant le confinement du printemps 2020 en France a fortement impacté l'industrie de l'aéronautique qui, malgré une contribution relativement faible aux émissions globales, est perçue comme un contributeur important du changement climatique. Depuis de nombreuses années, cette industrie s'est lancée dans la conception de l'avion bas-carbone grâce à la combinaison de technologies et d'usages vertueux. À l'heure actuelle, il n'est pas possible de faire voler un avion transportant plusieurs centaines de passagers sur plusieurs milliers de kilomètres avec des moteurs électriques. Comme dans l'automobile, les émissions de [gaz à effet de serre](#) augmentent, car de plus en plus de personnes voyagent en avion et parcourent de plus en plus de kilomètres. Les technologies permettent seulement de réduire les émissions par kilomètre parcouru et par personne, en réduisant la consommation des moteurs : roulage électrique, moteur avec soufflante non carénée (open rotor) (Fig. 11.15), groupe auxiliaire de puissance (APU) électrique, procédure d'approche et réduction du poids total avec des nouveaux matériaux. Le maître mot est d'utiliser les moteurs thermiques avec des biocarburants ou de l'hydrogène uniquement pour ce qui ne peut pas être assuré par une autre technologie à zéro carbone.



Figure 11.15 : Safran open rotor mockup, Paris Air Show 2017. Source : Wikimedia Commons (source : Tiraden).

En conclusion, les solutions techniques existent pour réduire, voire annuler, dans certains cas, les émissions de GES par kilomètre et par passager, mais ce sont les usages croissants des transports routiers, qui ont le plus gros impact. La stratégie d'évolution n'est pas facile à planifier, car les transports sont des « industries du temps long », où les systèmes fonctionnent pendant plusieurs dizaines d'années. Il faudrait, pour ce faire, une planification très élaborée, mais qui serait difficile à tenir dans un environnement fluctuant et incertain.

11.3.3. L'hydrogène, le combustible de demain pour l'énergie et les transports ?

L'hydrogène est régulièrement cité comme une solution pour réduire les émissions de **dioxyde de carbone** dans les transports. L'hydrogène présente effectivement des avantages très séduisants : un kilogramme d'hydrogène possède autant d'**énergie** que trois kilogrammes d'essence, la combustion d'hydrogène n'émet pas de CO₂, l'hydrogène est stockable. Ces caractéristiques permettent d'imaginer deux usages principaux pour l'hydrogène dans le secteur de l'**énergie** : le brûler pour produire de la chaleur ou le faire réagir dans une pile à combustible pour produire de l'électricité. Les fusées fonctionnent déjà avec des moteurs brûlant de l'hydrogène et les piles à combustible sont utilisées dans des trains ou des véhicules expérimentaux.

Le stockage et l'utilisation de l'hydrogène nécessitent cependant de modifier beaucoup de dispositifs industriels, mais c'est encore la production d'hydrogène qui est actuellement la plus problématique. En effet, quand on parle d'hydrogène, on ne parle pas de l'atome d'hydrogène, que l'on retrouve en très grande quantité sur Terre sous la forme d'eau et de **méthane**, mais de la molécule de dihydrogène. La molécule de dihydrogène ne se trouve pas à l'état naturel, il faut la produire. À l'heure actuelle, le dihydrogène est essentiellement produit à partir de molécules de **méthane** desquelles on vient arracher les atomes d'hydrogène (vaporeformage)⁹⁶. Cet arrachage nécessite de l'**énergie** qui, pour l'instant, est fortement émettrice de CO₂ : pour produire un kilogramme d'hydrogène, 10 kg de CO₂ sont émis ! Le bilan n'est donc pas positif. Les procédés électrolytiques semblent, en revanche, plus favorables pour produire l'hydrogène de façon décarbonée et économique, et contribuer aux objectifs que la France s'est fixée en matière de développement des **énergies renouvelables** et de réduction des consommations d'**énergie fossile**⁹⁷.

En conclusion, l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique potentiellement de grand intérêt, c'est-à-dire un moyen efficace de stocker de l'**énergie** et de la restituer quand on le veut et à l'endroit que l'on souhaite. Pour généraliser son usage, il sera cependant nécessaire de le produire en grande quantité et sans émission de GES, de développer les infrastructures de stockage, et d'adapter les dispositifs d'utilisation de l'hydrogène (moteurs ou piles à combustibles).

11.3.4. Les technologies pour l'agriculture

Les émissions de **gaz à effet de serre** de l'agriculture sont spécifiques, car majoritairement composées d'autres molécules que le CO₂ et issues de processus biologiques. Les émissions de protoxyde d'azote N₂O sont principalement issues de l'épandage d'engrais minéraux et organiques, d'excrétions dans les pâturages, de la

96. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Vaporeformage>

97. Plan de développement de l'hydrogène pour la transition énergétique : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf

décomposition des résidus de culture, de l'épandage des boues et des composts. Les bovins sont responsables de 91% des émissions de méthane CH₄, liées au processus digestif et de 57% des émissions de méthane CH₄ liées aux déjections.

Les technologies utilisées dans l'agriculture (tracteurs, moissonneuses, etc.) ont permis, soit d'intensifier des actions qui étaient autrefois réalisées manuellement, soit d'artificialiser des pratiques comme l'arrosage, la production d'engrais, le désherbage chimique, etc. Ce sont des technologies développées pour le rendement et la production, et non pas au service d'une meilleure compréhension de l'agriculture et de la façon de réduire ses émissions de gaz à effet de serre. L'environnement vivant est très complexe, comme dans le domaine de la santé, la technologie est d'une aide très précieuse, mais il faut ici l'utiliser non seulement pour produire mais aussi pour comprendre. Satellites, analyses de sols, mesures et obtentions de données sont indispensables et doivent être déployés à grande échelle. Plus encore que de technologie, c'est aujourd'hui de sciences dont il y a besoin pour mieux comprendre l'agriculture dans toute sa complexité et son fonctionnement systémique [14].

11.3.5. Conclusion

Le logement, les transports et l'agriculture sont les trois secteurs qui contribuent majoritairement aux émissions de gaz à effet de serre en France. Les acteurs de ces secteurs sont sensibles aux enjeux climatiques et de transition énergétique, ils travaillent depuis de nombreuses années à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans leurs activités en optimisant leur fonctionnement par le développement de technologies. Ces développements ont considérablement réduit les émissions par unité produite (kilomètre parcouru, mètre carré de logement, kilo de céréale produit, etc.), mais en même temps les usages ont fortement augmenté jusqu'à annuler les gains technologiques. De plus, l'intégration de nombreuses techniques complexifie les systèmes en les rendant plus difficiles à fabriquer et à maintenir, et en augmentant leur impact sur l'environnement, soit de manière directe par l'utilisation de matériaux rares ou difficiles à extraire, soit de manière indirecte en changeant les conditions de travail. La trajectoire à suivre est donc une simplification technologique grâce à une meilleure compréhension des fonctionnements et à une réduction des usages (kilomètres parcourus, tailles des logements, en particulier). Bien évidemment, cette trajectoire est à suivre en développant la production d'énergie de plus en plus décarbonée (voir section 11.4).

11.4. Produire une énergie décarbonée : les énergies renouvelables (EnR) – J.-M. Lourtioz

Les énergies renouvelables sont souvent considérées comme étant au cœur même de la transition énergétique et de la transition écologique, mais que représentent-elles, en fait, aujourd'hui parmi les énergies que nous produisons et que

nous consommons et quelles perspectives offrent-elles pour notre avenir et l'avenir de la planète? Nous essaierons, dans cette section, de donner quelques éléments de réponse à ces questions.

11.4.1. Les différents types d'énergie renouvelable

Par définition une source d'énergie est dite renouvelable si son renouvellement naturel est assez rapide pour qu'on puisse la considérer comme inépuisable à l'échelle du temps humain. C'est le cas du bois qui se renouvelle à la vitesse de croissance des arbres dès lors que cette croissance est respectée. Ce n'est, par contre, le cas ni du charbon, ni du pétrole ni du gaz dont les réserves ont mis des centaines de millions d'années pour se constituer.

L'énergie renouvelable la plus utilisée aujourd'hui reste encore la biomasse, le bois en particulier, mais aussi les déchets ménagers, végétaux ou animaux qui servent au chauffage avec une partie convertie en électricité. La matière organique, après fermentation ou transformation, sert également à la production de biogaz et de biocarburants pour le transport.

Deuxième énergie renouvelable en termes d'utilisation, l'énergie hydraulique où l'énergie potentielle de l'eau est convertie en électricité. L'hydroélectricité est bien présente en France, les plus gros producteurs étant la Chine, le Canada, le Brésil et les États-Unis. Sa répartition est globalement homogène par continent dans le monde.

Vient en troisième position l'énergie éolienne (Fig. 11.16), où l'énergie mécanique est convertie en électricité. Éoliennes sur terre, mais aussi en mer, ce qui peut être une chance pour des pays comme la France qui, avec 11 millions km² d'espace maritime, se place au deuxième rang mondial après les États-Unis.



Figure 11.16 : Illustration des « nouvelles » énergies renouvelables : l'éolien et la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. Photo @istock.

Enfin, on peut regrouper arbitrairement toutes les **énergies** renouvelables obtenues par extraction d'**énergie** thermique, que ce soit du sol (la géothermie), de l'air extérieur (les pompes à chaleur) ou du soleil pour être utilisée en chauffage ou convertie en électricité (le photovoltaïque - Fig. 11.16). Concernant la géothermie, nous sommes tous familiers de sa forte présence en Islande, où les sources d'eau chaude sont particulièrement nombreuses, mais elle est aussi bien présente en France, notamment sur le site de Paris Saclay où l'eau chaude est extraite du plateau de l'Albien (Fig. 11.17).

Outre le fait que toutes les **énergies** mentionnées précédemment sont renouvelables, donc non épuisables, elles ne présentent pas de risque majeur pour la santé humaine et produisent peu ou pas d'émission de **gaz à effet de serre** dans leur utilisation. Ceci est illustré sur la **figure 11.18** pour ce qui concerne les émissions de CO₂. Il ne faut cependant pas oublier qu'en contrepartie, leur développement implique l'investissement de nouvelles infrastructures qui, elles, ont un coût et nécessitent en grande partie l'utilisation d'**énergie** carbonée pour leur mise en place.

Les **énergies** renouvelables répondent, pour l'essentiel, aux critères d'acceptabilité par nos sociétés même si leur installation peut parfois amener des controverses en termes de pollution visuelle, sonore ou d'occupation d'espaces. Les oppositions de la population à telle ou telle installation, quelle qu'elle soit, doivent nécessairement être prises en compte et la décision retenue doit être le résultat d'une délibération démocratique (voir section 10.5).

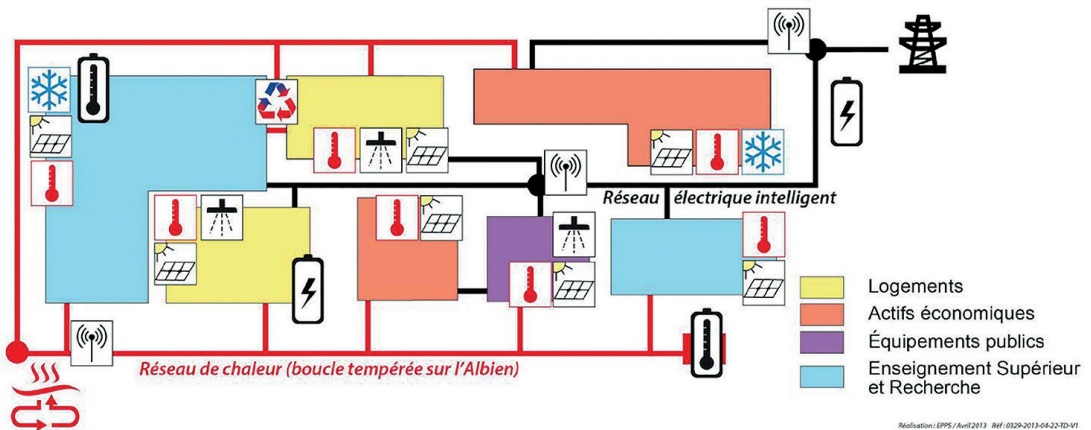


Figure 11.17 : Schéma du réseau de chaleur sur le site Paris Saclay. Source: Établissement Public d'Aménagement Paris Saclay.

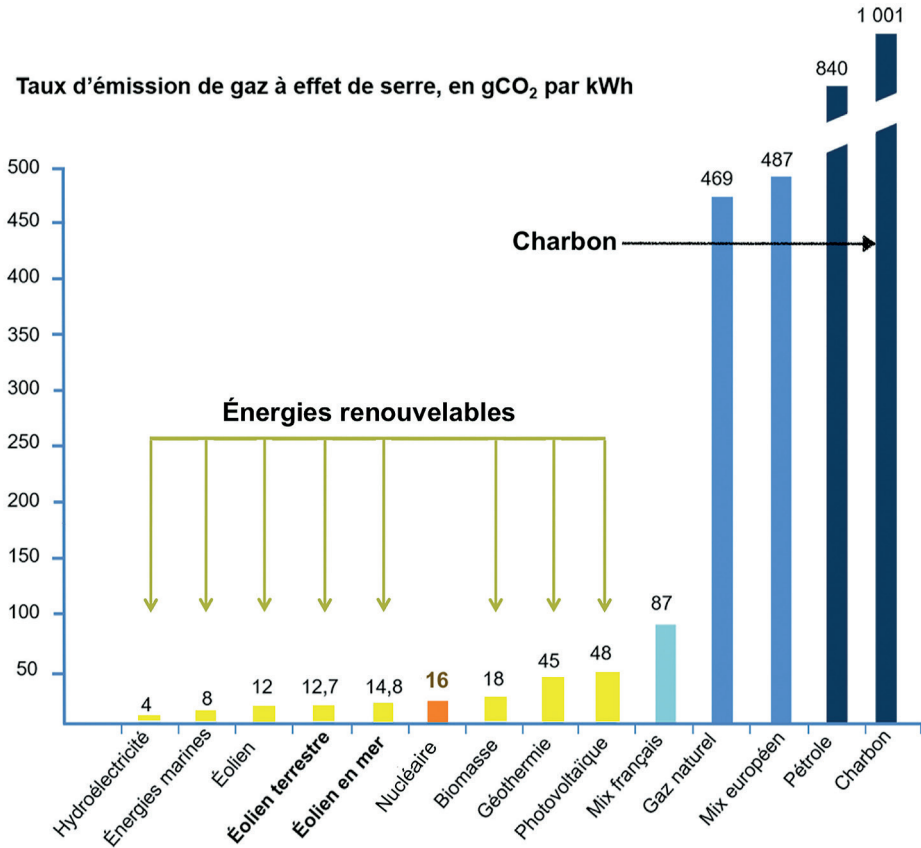


Figure 11.18 : Émissions en équivalent CO₂ par kWh, comparées par source d'énergie. Source : rapport GIEC 2011, Ademe (2015), Ecoinvent (données 2011).

11.4.2. Place des énergies renouvelables en France et dans le monde

En 2019, la part des **énergies** renouvelables dans la production mondiale d'**énergie** était estimée à 18 % en prenant en compte le fait qu'elles ne présentent pas les pertes de conversion des **énergies fossiles**⁹⁸ (Fig. 11.19, à gauche). La valeur estimée passe à 15 % sans cette correction. On peut, en effet, noter que la conversion de l'éolien, du solaire et de l'hydraulique en électricité est directe alors qu'en revanche, la transformation des combustibles fossiles en électricité passe par l'usage et le chauffage d'un liquide caloporteur. Quelle que soit la façon dont l'estimation est faite, la **biomasse** traditionnelle (essentiellement le bois) reste dominante avec une part comprise entre 6,5 et 7 %. Les « nouvelles » **énergies** renouvelables (éolien, solaire thermique

98. <https://ourworldindata.org/renewable-energy>

ou photovoltaïque) apparaissent encore modestes avec une part d'environ 2,5 %. En revanche, leur progression récente est spectaculaire, car les capacités mondiales de production de l'éolien et du solaire ont été multipliées par un facteur 5 de 2010 à 2019 (Fig. 11.19, à droite).

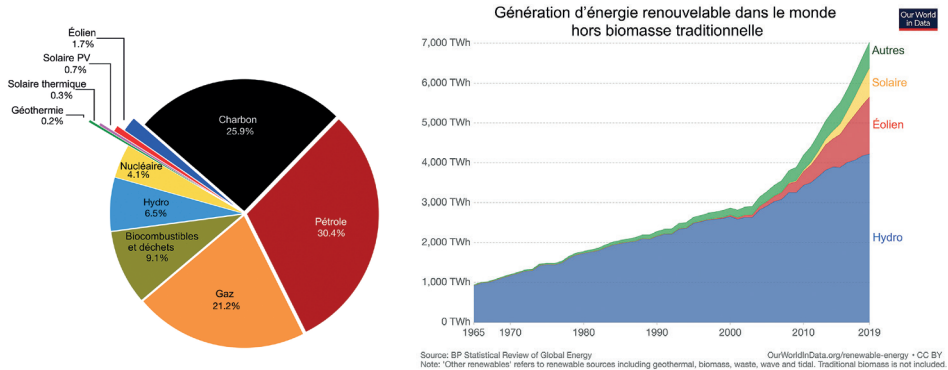


Figure 11.19 : À gauche : part des différentes sources d'énergie dans la production mondiale d'énergie en 2019. Le calcul des énergies primaires est basé sur la « méthode de substitution » qui prend favorablement en compte le fait que les énergies renouvelables ne présentent pas les pertes de conversion des énergies fossiles dans la production d'électricité⁹⁹. À droite : évolution de la génération d'énergies renouvelables hors biomasse traditionnelle de 1965 à 2019. Ce sont ici les chiffres bruts non corrigés par la méthode de substitution. Source : BP Statistical Review of Global Energy¹⁰⁰.

Toutes les énergies renouvelables hormis la biomasse traditionnelle sont en constante progression dans le monde même si dans le bilan des sources d'énergie, cette progression est un peu masquée par l'augmentation simultanée de la demande globale d'énergie et donc de la consommation d'énergies fossiles, qui en résulte (voir Fig. 2.5, section 2.1.5). La croissance des énergies renouvelables n'est, par ailleurs, pas homogène partout dans le monde. Aujourd'hui, c'est en Europe que les EnR représentent la part la plus importante de la consommation énergétique. L'Amérique du Sud s'en sort également bien avec ses grandes infrastructures hydro-électriques, notamment au Brésil où 42 % de la consommation énergétique est d'origine renouvelable. En comparaison, les États-Unis n'atteignent que 10 % de leur consommation énergétique en énergie renouvelable. La Chine et l'Inde plafonnent quant à elles à 10 et 11 % respectivement.

Néanmoins, la baisse des coûts des énergies renouvelables, leur amélioration technologique continue et la prise de conscience écologique devraient pousser les énergies renouvelables vers le haut partout sur la planète dans les années qui viennent. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE)⁹⁹, d'ici 2024, l'énergie renouvelable devrait être le secteur avec la croissance la plus rapide au sein de la production d'électricité pour satisfaire environ 30 % de la demande globale en électricité. Ce positionnement des EnR dans la production d'électricité s'illustre déjà en France où

99. <https://www.iea.org>

elles ont été pour 21,5 % dans la production d'électricité en France métropolitaine en 2019 (Fig. 11.20).

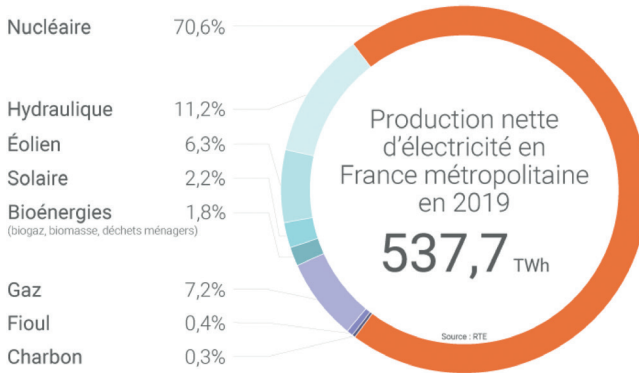


Figure 11.20 : Le mix de production électrique en France métropolitaine est dit « décarboné » à près de 92 %. Source : RTE (Réseau de Transport d'Électricité)¹⁰⁰.

Plus globalement, l'Agence Internationale s'attend à ce que, d'ici 4 ans, les **énergies** renouvelables couvrent jusqu'à 20,5 % de la consommation énergétique (contre 17-18 % aujourd'hui). En Chine et en Inde, elle prévoit notamment des hausses respectives de 16 % et 51 % de la consommation énergétique d'origine renouvelable. En France, la Loi de Transition Énergétique¹⁰¹ prévoit d'atteindre 32 % d'**énergies** renouvelables dans le mix énergétique du pays d'ici 2030.

11.4.3. Limites au développement des nouvelles énergies renouvelables

Si les prévisions sont plus que favorables aux **énergies** renouvelables, on ne peut toutefois omettre quelques freins à leur développement. D'une part, il faut du temps, plusieurs années, pour que de nouvelles sources d'**énergie** se développent au meilleur niveau technologique et dans les meilleures conditions d'acceptation sociale. D'autre part, comme nous l'avons déjà mentionné, ce développement implique des coûts d'investissement, parfois élevés, et des nouvelles infrastructures qui nécessitent l'utilisation d'**énergie** carbonée pour leur installation. Comme pour toute nouvelle infrastructure, leur durabilité peut poser question et il faut, dès le départ, envisager des méthodes de recyclage des matériaux en parallèle. Enfin, et c'est sans doute la principale difficulté : les nouvelles sources d'**énergie** renouvelable sont des sources intermittentes. Le vent ne souffle pas toujours et le soleil n'éclaire pas la nuit.

100. <https://www.connaissancedesenergies.org/la-production-delelectricite-en-france-metropolitaine-tous-les-chiffres-cles-de-2019-200212-0>.

Voir aussi : <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-35995-chiffres-cles-enr-2020.pdf>

101. <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte>

Pour pallier cette intermittence, il faut stocker l'énergie produite lorsque celle-ci ne peut être utilisée immédiatement afin de pouvoir la restituer ultérieurement. Il existe, en fait, de nombreux moyens de stocker l'énergie¹⁰² allant du stockage mécanique au stockage chimique ou électrochimique. Le stockage mécanique consiste, par exemple, à utiliser des stations de pompage¹⁰³, qui transforment l'énergie électrique en énergie de gravitation. Une solution élégante du stockage chimique est de fabriquer de l'hydrogène par électrolyse¹⁰⁴, lequel peut lui-même être utilisé comme source d'énergie (voir section 11.3.3). Le stockage dans des batteries électrochimiques (par exemple, lithium – ion) est sans doute le plus connu aujourd'hui à défaut d'être nécessairement le plus efficace. En fait, le stockage de l'électricité est actuellement un domaine en pleine extension, stimulé en partie par le développement des énergies renouvelables. Sont notamment à l'étude ce qu'on appelle des réseaux électriques « intelligents », capables de gérer l'hétérogénéité des sources de production ainsi que leur décentralisation et de les agréger pour répondre de façon optimale à la demande d'électricité¹⁰⁵. Une architecture de réseau intelligent est schématisée sur la figure 11.21.

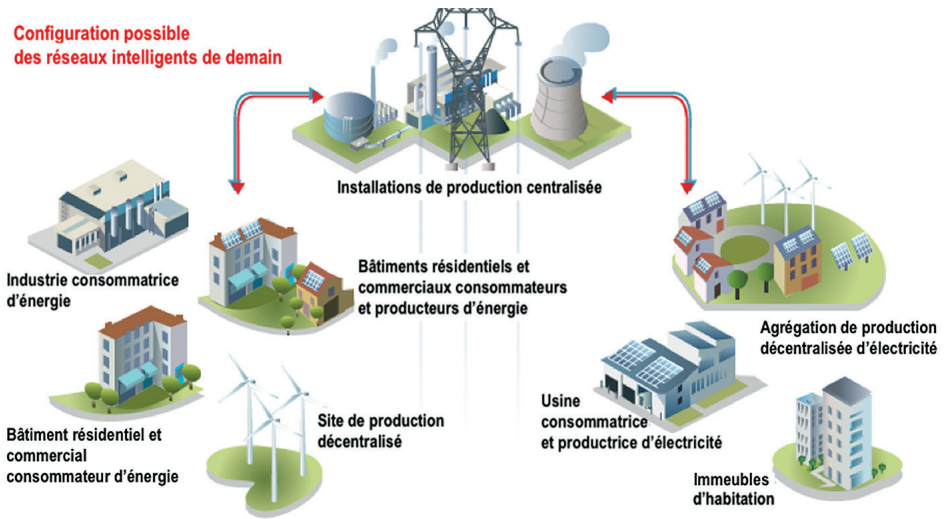


Figure 11.21 : Évolution possible de l'architecture et des fonctionnalités pour les réseaux électriques de demain. Source @ ADEME/P.P.&A./Scriptoria¹⁰⁷.

102. <https://particulier.edf.fr/fr/accueil/guide-energie/electricite/stockage-energie-electricite.html>

103. <https://www.youtube.com/watch?v=UL9kyQP76Q&feature=youtu.be>

104. <https://www.pv-magazine.fr/2020/03/05/lancement-de-projets-de-production-dhydrogene-associant-energie-solaire-et-batterie-en-espagne/>

105. <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/transport-lenergie/reseaux-electriques-intelligents>

11.4.4. Focus sur la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

Nous savons tous que le soleil est la principale source d'énergie de notre planète. Or, si le flux d'énergie solaire représente, en moyenne, plus de 5 000 fois l'énergie globale que l'humanité consomme actuellement¹⁰⁶, le solaire photovoltaïque ne contribue même pas à 1,5% de l'énergie que nous produisons. En fait, avec les panneaux photovoltaïques actuels en silicium, dont le rendement de conversion lumière – électricité est d'environ 20%, produire 100% de notre énergie à partir de la conversion photovoltaïque du rayonnement solaire imposerait de couvrir en panneaux solaires une surface équivalente à 75% du territoire français. Avec une ambition plus mesurée, ne cherchant à répondre qu'à 10% de la demande mondiale en énergie et anticipant une optimisation réaliste du rendement des panneaux d'un facteur 2, la surface à couvrir se limiterait à moins de 4% du territoire français, soit aussi environ 1 à 2% des surfaces urbanisées de par le monde. Des rendements de conversion lumière – électricité s'élevant à plus de 47% ont été effectivement rapportés en 2019 par des équipes de chercheurs¹⁰⁷. Même si le passage à la production industrielle n'est jamais direct, ces chiffres sont prometteurs pour l'avenir.



Figure 11.22: Le soleil est, de loin, la principale source d'énergie sur Terre, mais son exploitation directe ne représente encore qu'une part réduite de la production totale d'énergie. À gauche: lever de soleil. Crédit photo: Chtiperdu (CC-BY-SA-3.0). À droite: panneaux photovoltaïques d'habitations. Source photo: GabrielleMerk (CC-BY-SA-4.0).

11.4.5. Conclusion

Les énergies renouvelables offrent la perspective de produire une énergie qui préserve nos ressources naturelles en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Seules, elles ne pourront pas tout résoudre, mais contribueront pour

106. La puissance reçue du soleil au zénith par unité de surface et en l'absence de nuages est typiquement de l'ordre de 1 000 W/m². Cependant le soleil n'éclaire pas la nuit, l'intensité de l'éclairement dépend des saisons, de la latitude, du créneau horaire concerné et de la présence ou non de nuages si bien que sur une année, la puissance effective reçue par m² est d'environ 200 W. Il « suffit » alors de multiplier ce chiffre par la surface du globe terrestre et par le nombre d'heures dans une année pour trouver la quantité d'énergie que le soleil fournit annuellement. La surface du globe supposé sphérique se calcule à partir de la formule: $4\pi R^2$ où $R = 6371$ km représente le rayon du globe. Tout calcul fait, on obtient une énergie de: 892 millions de térawatts heure (TWh), alors que la consommation d'énergie par l'humanité est actuellement de 170 000 térawatts heure (TWh).

107. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell_efficiency

beaucoup à la transition énergétique si on les associe à d'autres sources décarbonées comme le nucléaire, dont il est question dans la section 11.5 et pourvu qu'il soit sécurisé, ou à des sources fossiles moins carbonées comme le gaz naturel, sachant que les réserves de gaz comme celles du pétrole et du charbon ne sont pas infinies. Sans doute, le plus important est que le développement des énergies renouvelables s'accompagne de transformations profondes de nos modes de vie et de consommation (voir sections 10.2 et 11.6).

11.5. L'énergie nucléaire, une autre source d'énergie décarbonée : principes, avantages et limites – L. Audouin

11.5.1. Principes de l'énergie nucléaire¹⁰⁸

Le terme « énergie nucléaire » est utilisé pour décrire la production d'électricité par le biais de réactions nucléaires dites de fission. S'il est en théorie possible d'utiliser d'autres réactions nucléaires (notamment la fusion, la source d'énergie des étoiles, ou bien la radioactivité), il n'existe aucune mise en application industrielle de ces processus, pour des raisons de complexité technologique ou de simple faisabilité à grande échelle : la fission est la seule voie exploitée.

Principe du réacteur

La fission est une réaction nucléaire particulière, dans laquelle un noyau se fragmente en deux noyaux (Fig. 11.23). Ce processus est fortement exo-énergétique (de l'ordre de 200 MeV, soit 200 millions d'électrons-volts, autrement dit 1 million de fois plus qu'une réaction chimique individuelle) et s'accompagne de l'émission de plusieurs neutrons.

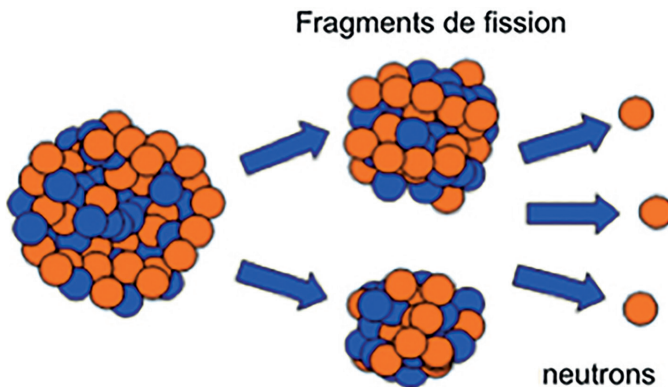


Figure 11.23: Désintégration d'un noyau atomique lourd en deux noyaux plus légers. Source : L. Audouin.

108. <https://www.planete-energies.com/fr/medias/dossiers/comprendre-l-energie-nucleaire>

Or, quelques noyaux se caractérisent par une très forte probabilité de fissionner lorsqu'ils interagissent avec un neutron (on les qualifie de «*fissiles*»). On peut ainsi créer une réaction en chaîne: les fissions libèrent des neutrons, qui entraînent d'autres fissions, etc. (Fig. 11.24). La clé de la conception d'un réacteur nucléaire est de parvenir à provoquer mais aussi stabiliser cette réaction en chaîne: le nombre de noyaux fissionnant doit être constant dans le temps (à l'inverse d'une bombe nucléaire, où il s'agit de provoquer le maximum de réactions dans un temps très bref).

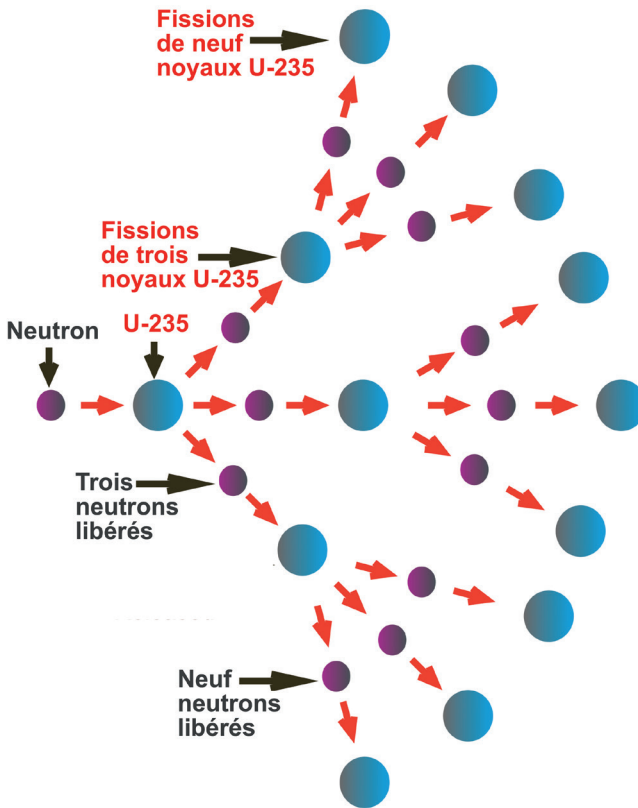


Figure 11.24: La réaction en chaîne au sein des réacteurs nucléaires. Source: SeekPng.com_reaction-png_1234970.

L'énergie libérée par les fissions se retrouve immédiatement sous forme de chaleur, laquelle est extraite du «cœur» du réacteur *via* un fluide (eau le plus souvent, mais des gaz ou des métaux liquides peuvent être utilisés) pour être convertie en électricité, à l'image de ce qui est pratiqué dans une centrale à gaz ou charbon. Pour des raisons de complexité et de rentabilité, l'utilisation directe de la chaleur du réacteur pour des usages classiques (chauffage) n'est pas possible directement.

11.5.2. Centrales nucléaires

Dimensionnement et intégration dans un réseau électrique

Bien qu'il soit techniquement possible de faire des réacteurs nucléaires de toutes dimensions, en pratique, les réacteurs électrogènes civils sont des dispositifs de grande puissance, de 300 à 1 650 MW électriques. Quelques dizaines de réacteurs sont donc suffisants pour produire la quantité d'électricité consommée par un pays de taille moyenne comme la France. Les réacteurs peuvent seulement être construits à proximité d'un grand fleuve, ou de la mer, qui vont jouer un rôle de « source froide » pour le cycle thermodynamique utilisé pour la production d'électricité (Fig. 11.25).

Un réacteur nucléaire est une source dite « pilotable » au même titre que les réacteurs thermiques : il est possible de faire varier la puissance produite en fonction des besoins, jusqu'à $\pm 5\%$ par minute, soit un passage de 0 à la pleine puissance en 20 minutes au mieux (les centrales à gaz sont les plus agiles, avec 20%/min). Cette caractéristique est intéressante à la fois pour suivre les variations de consommation au fil du temps, mais aussi accompagner l'insertion dans le mix de production de ressources non pilotables (éolien, solaire).

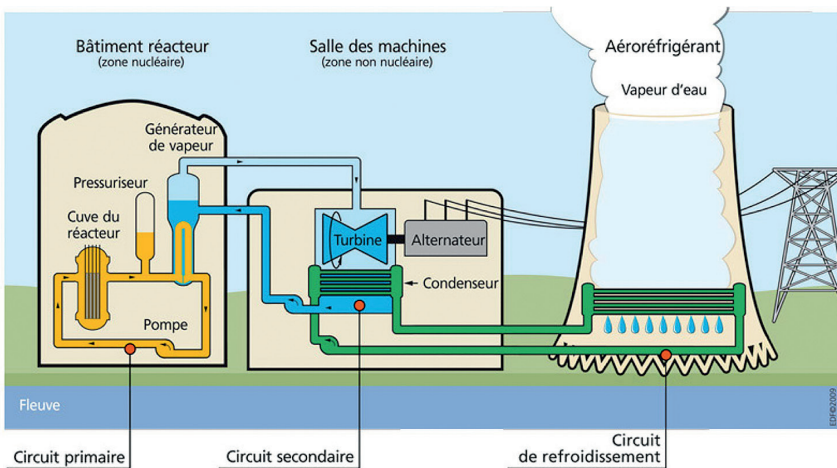


Figure 11.25 : Schéma de principe d'une centrale nucléaire avec aérorefrigérant. Source : IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) EDF@2009

Équation économique

La structure de coût de l'énergie nucléaire (Fig. 11.26) est assez comparable à celle des énergies renouvelables : un très lourd investissement initial (qui est modélisé en France à 35% du coût de l'électricité) et des frais d'investissement et opérationnels conséquents (55%). Le combustible nucléaire ne représente qu'environ 9% du coût de l'électricité.

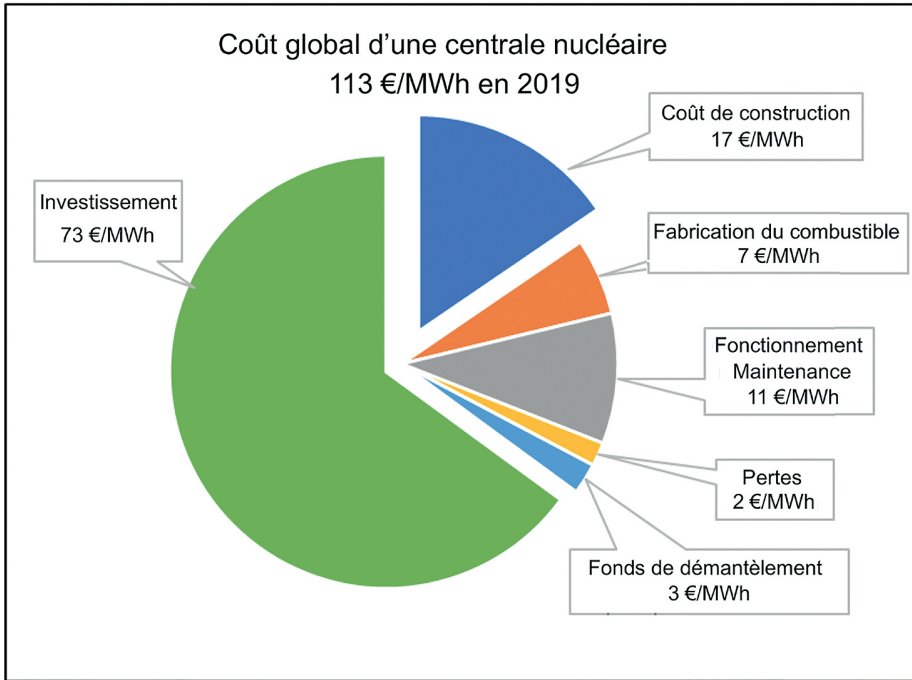


Figure 11.26 : Structure de coût de l'électricité dans le projet britannique Hinkley Point¹⁰⁹.

Les derniers 10% correspondent au provisionnement pour la gestion du combustible usagé et pour le démantèlement des installations à la fin de leur exploitation. L'équation économique de l'électricité nucléaire évolue rapidement ces dernières années, avec des investissements de sûreté qui croissent rapidement, des coûts de construction de centrale mal maîtrisés et des incertitudes fortes sur les sommes réelles qui seront nécessaires pour une gestion sûre du combustible usagé sur de très longues périodes, bien supérieures à la vie des réacteurs. Historiquement, le nucléaire était particulièrement compétitif, avec des prix estimés à 33 €/MWh; on se situe aujourd'hui au-delà de 110 €/MWh pour les réacteurs actuellement construits.

11.5.3. Une énergie à faible émission de CO₂

Émissions de CO₂

Lors de son fonctionnement, un réacteur n'émet pas de **gaz à effet de serre**. En revanche, des GES sont émis lors de la construction, notamment du fait des larges quantités de béton et d'acier utilisées; de plus, l'extraction/raffinage du minerai et

109. <https://medium.com/generation-atomic/the-hinkley-point-c-case-is-nuclear-energy-expensive-f89b1aa05c27> (licence CC BY-SA 4.0)

la fabrication du combustible sont coûteuses énergétiquement. Les estimations du contenu carbone de l'énergie nucléaire sont très variables en fonction du mode de calcul et du mix énergétique du pays étudié : les rapports du GIEC retiennent une valeur moyenne internationale de 12 à 16 g eq. CO₂ par kWh (Fig. 11.27). Le nucléaire se range donc dans la catégorie des énergies très peu émettrices de CO₂.

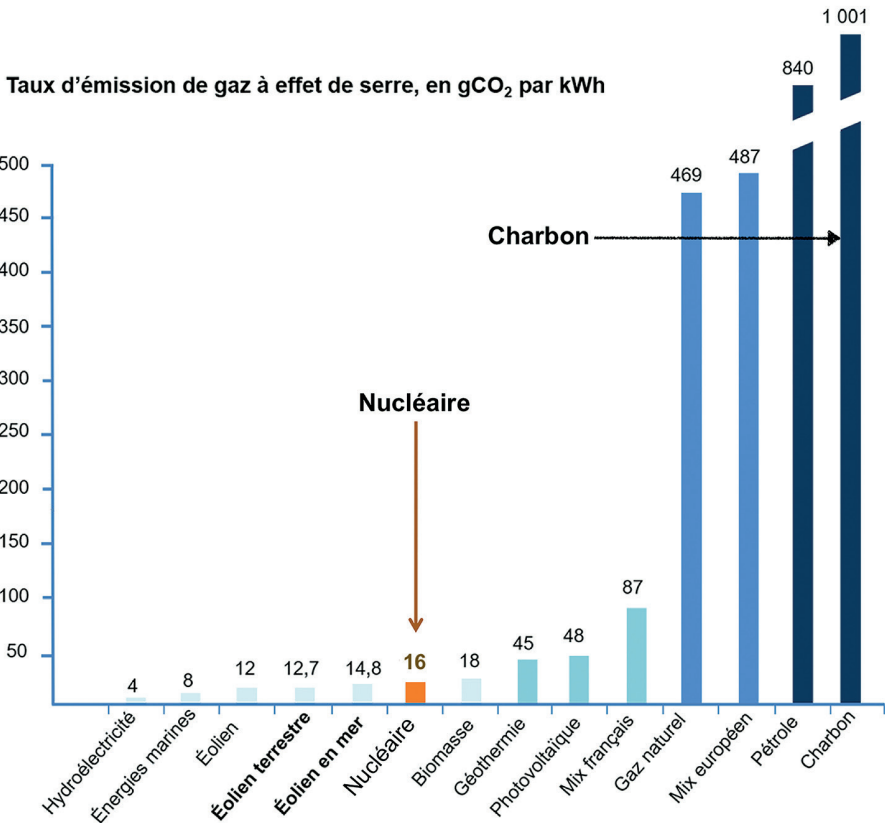


Figure 11.27 : Émissions en équivalent CO₂ par kWh, comparées par source d'énergie. Source : rapport GIEC 2011, Ademe (2015), Ecoinvent (données 2011).

Une énergie à larges réserves

L'énergie nucléaire est basée sur l'utilisation de minerais présents sur Terre : ce n'est pas une énergie renouvelable. L'Uranium est présent en quantité finie, avec des stocks exploitables estimés entre 15 et 25 MT, soit environ 150 ans au rythme de consommation actuel (70 kT/an). Les réserves sont très inégalement réparties (principalement Asie centrale, Afrique centrale, Canada, Australie), ce qui pourrait en faire un enjeu stratégique (Fig. 11.28).

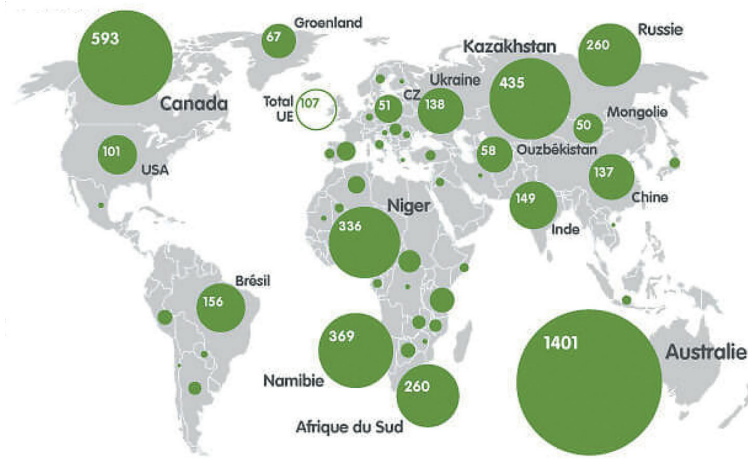


Figure 11.28 : Estimation des réserves d'uranium par zone géographique en 2017. Source : OCDE/AIEA « Red Book » 2028¹¹⁰.

Il n'existe qu'un seul noyau **fissile** dans la nature : ^{235}U . Cet isotope est très mineur dans l'uranium présent sur Terre, il ne représente que 0,7% du total. Certaines technologies de réacteurs permettent d'utiliser comme principal noyau **fissile** ^{239}Pu , un noyau artificiel, formé dans les réacteurs *via* la capture d'un neutron par ^{238}U , l'isotope majoritaire présent dans la nature. Si un tel combustible présente de fortes contraintes (technologie plus complexe, démultiplication des flux de matières hautement dangereuses), son utilisation permettrait de multiplier les réserves de plus d'un ordre de grandeur (ou de préserver plusieurs millénaires de ressources, même dans l'hypothèse d'une forte augmentation de la production mondiale d'**énergie** nucléaire). Un autre axe de recherche, plus exploratoire, porte sur l'utilisation de ^{233}U (formé à partir de ^{232}Th , plus abondant que l'Uranium dans la nature).

11.5.4. Radioactivité et déchets nucléaires

La radioactivité

Certains noyaux, dits radioactifs, ont la propriété d'émettre spontanément un ou plusieurs corpuscules : noyau de ^4He , électron ou positron ; on parle respectivement de **radioactivité** α , β^- ou β^+ (Fig. 11.29). Cette émission peut être suivie de celle d'un ou plusieurs photons. La **radioactivité** est en soi un événement totalement aléatoire, mais sa probabilité dans le temps est parfaitement fixe et unique pour une **espèce** nucléaire donnée : on peut donc prévoir le comportement d'un large ensemble d'une **espèce** nucléaire. On peut montrer qu'il faut un temps fixe, appelé période radioactive, pour que la moitié des noyaux d'un échantillon donné ait émis un corpuscule. Le noyau subsistant (« noyau fils ») peut lui-même être radioactif, conduisant à une

110. https://www.kernenergie.ch/fr/uranium-matiere-premiere-_content---1--1085.html

chaîne de désintégration; mais longue ou courte, une telle chaîne se termine nécessairement par un noyau stable.

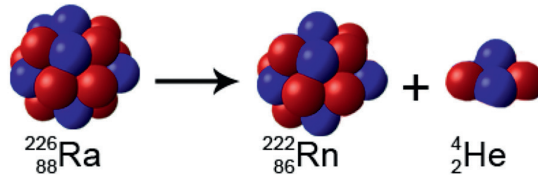


Figure 11.29 : Désintégration alpha du Radium-226 en radon 222. La désintégration génère de plus un noyau d'Hélium 4 et un rayonnement radioactif, composé d'énergie et de particules de matière. Source: Wikilivres

Radioactivité et organismes vivants

Les corpuscules émis lors d'une désintégration radioactive ont la propriété de perturber la matière par leurs collisions sur ses constituants (Fig. 11.30). De très fortes irradiations peuvent perturber un organisme vivant au point de conduire à son décès à court terme. Les irradiations de plus faible intensité n'ont pas d'impact immédiat majeur, mais peuvent conduire à l'apparition de pathologies comme les leucémies et les cancers, après plusieurs années voire plusieurs décennies. Leur survenue est aléatoire, la probabilité étant liée à quantité d'irradiation reçue et au débit de dose.

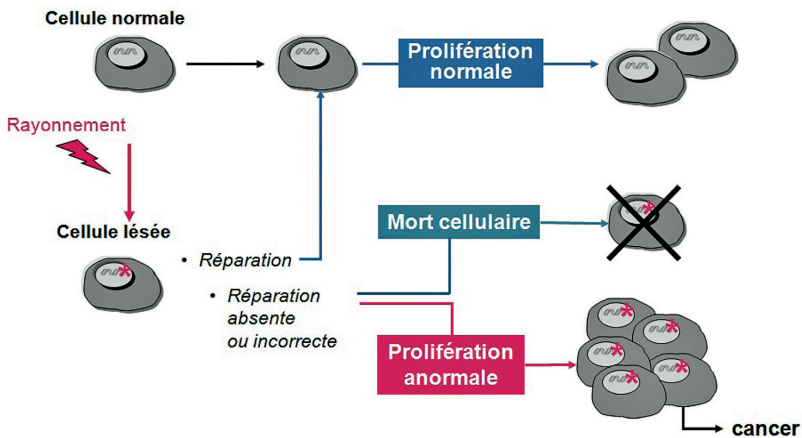


Figure 11.30 : Les conséquences possibles (non équi-probables!) d'une interaction d'une particule ionisante avec un tissu organique¹¹¹. Source : CEA /Direction des Sciences du Vivant.

Il faut noter que la radioactivité est présente naturellement dans l'environnement. Les activités industrielles mettant en jeu des matériaux radioactifs (typiquement, la production d'électricité par le nucléaire) ne doivent jamais conduire à

111. <https://www.encyclopedie-environnement.org/physique/radioactivite-reactions-nucleaires/>

exposer le public à une irradiation supérieure à une fraction de celle due à la **radioactivité** naturelle.

Déchets nucléaires

Comme tout processus industriel, l'**énergie** nucléaire produit des déchets dont une partie présente un danger pour l'homme et le vivant (Fig. 11.31). La spécificité du nucléaire est que ce danger n'est pas seulement chimique, mais principalement dû à la **radioactivité**. Le combustible nucléaire, après son utilisation dans un réacteur, est particulièrement létal : il doit être strictement confiné. Les procédés de fabrication du combustible, les réparations de réacteurs et surtout leur démantèlement vont également produire des déchets plus ou moins radioactifs.

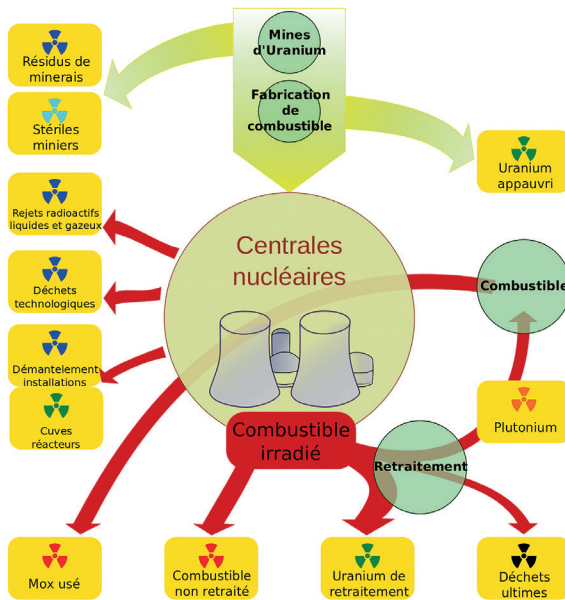


Figure 11.31 : Origines des déchets sur l'ensemble du cycle de production nucléaire. À noter qu'en France, la fraction potentiellement réutilisable n'est pas classée comme déchet, même en l'absence d'usage présent. Source : Biem CC BY-SA 4.0.

La **radioactivité** s'atténue dans le temps, mais les durées peuvent être très longues. Les déchets nucléaires doivent faire l'objet d'un conditionnement et d'un stockage spécifiques, sur des échelles de temps adaptées à leur période radioactive : quelques années pour certains, mais des millions pour d'autres. Leur diversité chimique rend ce conditionnement délicat, et la sûreté d'un confinement sur des échelles de temps géologiques reste un défi technique et scientifique de premier ordre.

La plupart des pays utilisant l'**énergie** nucléaire envisagent aujourd'hui de créer pour les déchets les plus dangereux des sites de stockage en profondeur, dans

lesquels les roches agiraient en barrière de dernier ressort entre les déchets et la biosphère. Malgré de nombreuses actions de recherche en la matière, aucun pays n'a cependant mis en service un tel site de stockage.

Accidents, risques, acceptabilité

Comme pour toute activité industrielle de grande ampleur, un accident peut avoir des conséquences environnementales et sanitaires sérieuses et concerner des zones étendues. Le danger n'est pas celui d'une explosion à la façon d'une bombe (rigoureusement impossible) mais celui de la dispersion de grandes quantités de matières plus ou moins radioactives, créant une contamination durable de vastes étendues, les cas extrêmes (et pour autant difficilement comparables) étant les accidents de Tchernobyl en 1986 (Fig. 11.32) et de Fukushima en 2011. L'estimation de l'impact sanitaire réel de tels événements reste un défi pour les scientifiques, davantage pour des questions de suivi des publics concernés que de description des phénomènes : l'apparition de pathologies est décalée d'années voire de décennies, et peut rarement être imputée sans ambiguïté à l'exposition à la radioactivité. Le caractère invisible et complexe de la radioactivité, son association (pour partie réelle, pour partie fantasmée) avec des technologies à buts militaires et une pesante culture du secret contribuent à renforcer l'inquiétude des populations et a fortement dégradé au fil du temps l'acceptabilité de l'énergie nucléaire par les opinions publiques.

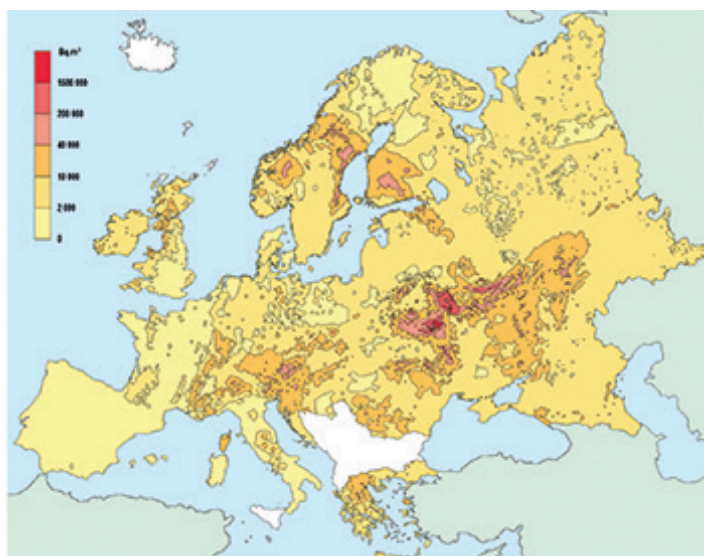


Figure 11.32 : Dépôts de ¹³⁷Cs liés à l'accident de Chernobyl (1986). Source : IRSN¹¹².

112. https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/accident-tchernobyl-1986/2016-Tchernobyl-30ans-apres/Pages/5-Tchernobyl-2016-30ans-apres-accident-France-Europe-impacts.aspx#.YWINLi3pP_Q

11.5.5. Le nucléaire, une source modeste à l'échelle mondiale ; et demain ?¹¹³

En 2019, 10,3% de l'électricité mondiale a été produite par les 457 réacteurs nucléaires en service dans le monde. Ces deux chiffres sont en légère diminution sur les vingt dernières années. Du fait de sa complexité et de son coût d'investissement important, le nucléaire n'est développé que dans les pays industrialisés. La quasi-totalité des réacteurs se situe dans l'OCDE et en Chine, où ils représentent en moyenne autour de 20% de la production électrique. La France est un cas tout à fait singulier avec près de 80% d'électricité produite par le nucléaire. Un recours fortement accru au nucléaire à l'échelle mondiale se heurterait à deux difficultés : sa complexité technologique, qui le réserve aux pays avancés, et les limites des ressources, qui imposeraient une transition vers des technologies encore plus complexes – donc coûteuses et potentiellement risquées.

On voit donc que le nucléaire, du fait de son très faible contenu carbone et de réserves potentiellement abondantes, peut constituer un outil pour produire l'électricité sans émission de [gaz à effet de serre](#). Mais, entre un prix de revient orienté à la hausse qui menace sa compétitivité, l'environnement technique qu'il exige, les inconnues qui pèsent sur la gestion des déchets et une acceptabilité en fort recul, il peut difficilement être la seule solution au défi climatique.

11.6. Changer nos modes de vie : sobriété, efficacité et substitutions dans notre consommation énergétique – F.-M. Bréon

11.6.1. Sobriété dans nos modes de vie

Le changement climatique est engendré par les émissions de [dioxyde de carbone](#) et d'autres [gaz à effet de serre](#). La plus grande partie des émissions de CO₂ sont liées à la consommation des [énergies fossiles](#). Historiquement, ce fut d'abord le charbon, puis le pétrole et enfin le gaz fossile. Cet ordre s'applique aussi aux quantités de CO₂ émises. Stabiliser le [climat](#) nécessite donc de diminuer très fortement la consommation de ces [énergies fossiles](#)¹¹⁴.

Une partie de la solution passe nécessairement par une forme de sobriété. On entend par là un changement important de notre mode de vie. Voici quelques exemples de comportements plus sobres que nous pourrions adopter sans, bien sûr, que cette liste ne soit exhaustive :

113. <https://www.lemondedelenergie.com/avenir-nucleaire-energie/2020/12/27/>.

Voir aussi : <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/la-filiere-epr>

114. F.-M. Bréon. *Réchauffement climatique*. <https://www.humensciences.com/livre/Rechauffement-climatique/51>.

On y aborde plus en détail les questions évoquées ici.

- réduire les déplacements en voiture et le nombre de kilomètres parcourus ;
- limiter la vitesse maximale sur autoroute car, même si le temps de trajet augmente, la consommation d'énergie nécessaire peut être significativement réduite ;
- réduire la surface des logements, ou densifier les logements existants ;
- diminuer la température de confort de ces mêmes logements en hiver, et l'augmenter en été pour limiter l'appel à la climatisation ;
- prendre des douches plutôt que des bains ;
- diminuer la production et la consommation d'objets de toutes sortes. Pour cela, on peut imaginer le partage d'un certain nombre d'objets qui n'ont pas un usage quotidien dans chaque foyer (Fig. 11.33) ;
- on pourrait aussi limiter le nombre d'écrans par foyer, de même que de nombreux autres appareils électroniques, etc.



Figure 11.33: Les objets en tout genre qu'on accumule au fur et à mesure de notre vie de tous les jours. Source : web-ac-reims.

Toutes les modifications, que nous venons de suggérer, ont un impact immédiat, concret, quotidien sur notre façon de nous déplacer, de nous alimenter, de nous habiller, de nous distraire, etc. Les gouvernements peuvent orienter ces comportements individuels, par exemple, en taxant les pratiques énergivores ou mieux, par

l'incitation fiscale. Mais, il est clair que les modifications de comportement passent d'abord par la compréhension de chacun face aux changements globaux et au changement climatique, en particulier. Chacun d'entre nous est tout aussi capable d'ajouter, de façon volontaire, bien d'autres actions à celles qui ont été mentionnées.

La sobriété¹¹⁵ s'applique non seulement aux individus, mais aussi aux entreprises, quel que soit leur secteur d'activité, ainsi qu'aux institutions publiques et aux administrations. Le monde de la recherche, y compris celui des laboratoires de recherche sur le climat, n'échappe pas au champ d'application des mesures de sobriété. La recherche sur le **climat** a, en effet, un coût énergétique : c'est un joli paradoxe ! La **modélisation** (voir section 9.2) nécessite l'utilisation d'ordinateurs puissants, sur de grandes périodes. Or, non seulement ces machines consomment de grosses quantités d'**énergie** et nécessitent d'être refroidies, mais leur fabrication même n'est pas exempte de coûts énergétiques. Par ailleurs, les chercheurs se déplacent, que ce soit pour recueillir des échantillons sur le terrain ou pour échanger leurs résultats avec d'autres collègues. Devrait-on au vu de sa finalité sanctuariser la recherche sur le climat ? Même si le sujet peut faire débat, les efforts doivent être partagés et il n'y a pas de raison objective de favoriser la recherche climatique plutôt que la santé, l'éducation ou le secteur de l'alimentation. La sobriété doit s'appliquer à tous les pans de la société, et c'est à l'État de la mettre en place.

11.6.2. Gain d'efficacité dans le résidentiel et les transports

Clairement, le passage à la sobriété dans nos modes de vie ne peut se faire que très progressivement, car il implique une transformation profonde de nos sociétés (voir section 10.2). Cependant, la sobriété énergétique n'est pas uniquement celle des usages. Il est possible de diminuer notre consommation d'**énergie** grâce à l'amélioration de processus, sans que cela n'ait un impact notable sur notre mode de vie¹¹⁶. L'isolation des bâtiments est l'exemple même des progrès que l'on peut accomplir dans le secteur du résidentiel. La consommation d'**énergie** liée au chauffage représente, en effet, près du tiers des usages énergétiques en France. Or, les technologies d'isolation ont fortement progressé ces vingt dernières années et on sait désormais construire des bâtiments qui, à confort égal, consomment beaucoup moins d'**énergie**. Ceci a été décrit précédemment par Franck Richeœur (section 11.3). Des normes ont été instaurées qui visent à interdire de construire des « passoirs thermiques ». L'enjeu se porte désormais sur les bâtiments anciens qui devraient être également isolés, ce qui pose à la fois des problèmes de financement et de recours à des professionnels compétents.

115. C. Florian. *De la sobriété énergétique à la sobriété matière : un concept clé pour la transition mais aux contours encore mal définis*. <https://apc-climat.fr/de-la-sobriete-energetique-a-la-sobriete-matiere-un-concept-cle-pour-la-transition-mais-aux-contours-encore-mal-definis/>.

116. La vision du gouvernement français sur la définition de l'efficacité énergétique. <https://www.ecologie.gouv.fr/action-france-lefficacite-energetique>.

L'autre grand chantier concerne les transports. Les efforts ont surtout porté sur la technologie par le développement de moteurs plus efficaces. Mais le gain d'efficacité a été partiellement compensé par une augmentation du poids des véhicules. La consommation moyenne des voitures ces dernières années a même augmenté du fait de la part croissante des gros SUV (*Sport Utility Vehicle*) dans le parc automobile ainsi que du nombre croissant de kilomètres parcourus en moyenne par les automobilistes. Ceci vous a été également commenté par Franck Richecœur (voir section 11.3). Il semble ainsi nécessaire de passer à des mesures supplémentaires pour la mise en place de normes environnementales qui limitent la masse des voitures. La limitation de la vitesse, déjà évoquée pour les aspects de sobriété (section 11.6.1), pourrait aussi conduire à la fabrication de voitures allégées, moins exigeantes en termes de matériaux de structure, et donc d'avoir des consommations plus faibles au km parcouru.

On peut aussi chercher à limiter le transport des marchandises et donc à consommer des biens qui sont produits localement plutôt qu'à l'autre bout du monde. Il faut, cependant, être attentif à cette mesure, car la production locale est parfois plus énergivore que le transport, même sur de longues distances. Ainsi, il peut être plus efficace de faire venir des légumes du sud de la France ou même d'Espagne que de chercher à les faire pousser sur place sous des serres qui seraient chauffées au gaz. Consommer local doit s'accompagner d'une réflexion sur les modes de production des produits alimentaires et leur saisonnalité.

11.6.3. Une meilleure efficacité dans notre consommation d'énergie : le tout électrique ?

En résumé des paragraphes précédents, il faut viser à une consommation plus sobre et des technologies optimisées pour consommer moins d'énergie pour le même service. Mais la marge de progression n'est pas infinie. Nous sommes face à un défi immense¹¹⁷, car la stabilisation du climat nécessite une diminution énorme des émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre. On sait que la nature et certaines technologies peuvent absorber une partie de nos émissions et l'objectif affiché est de n'émettre pas plus que cette absorption. On parle alors de « neutralité carbone ». Bien évidemment, cela demande des transformations profondes de notre société dont la mise en place prendra du temps.

En France, nous nous sommes fixés l'objectif d'arriver à la neutralité carbone à l'échéance 2050. Pour y arriver, il faudra donc se passer de plus en plus de combustibles fossiles. Nous avons vu qu'en termes de sources primaires d'énergie, l'exploitation de la biomasse et le développement de nouvelles énergies renouvelables figuraient parmi les solutions envisagées (section 11.4). Le bois des forêts et des

117. Résumé du rapport du GIEC SR15. Traduction Française par Citoyens pour le Climat : https://drive.google.com/file/d/1mH_LyAmLujMiSwZ8MmxiuDRKu32vrCv5/view (avec une présentation des scénarios envisageables pour le futur).

broussailles est d'ailleurs utilisé pour le chauffage ou la cuisson depuis que les humains ont domestiqué le feu. On peut évidemment envisager d'autres usages énergétiques de la **biomasse**, y compris pour la production d'électricité. La **biomasse** peut elle-même être considérée comme une source d'**énergie** renouvelable, mais à la condition que l'on ne coupe pas les forêts plus vite qu'elles ne repoussent. La **biomasse** produite par déforestation ne répond évidemment pas au critère de soutenabilité!

Une autre option possible est l'usage plus intensif de l'électricité comme source secondaire d'**énergie**. L'électricité est, en effet, un outil extraordinaire pour être substitué aux combustibles fossiles, car elle peut s'appliquer à pratiquement tous les usages¹¹⁸. Elle permet de se déplacer dans des trains ou dans des voitures équipées de batteries. Elle permet de fabriquer des objets, de s'éclairer, de faire fonctionner les appareils numériques ou encore de se chauffer. En revanche, elle a un gros défaut, car elle se « conserve » mal. Par exemple, pour stocker l'**énergie** contenue dans un litre d'essence, il faut une batterie de la technologie lithium-ion d'environ 50 kilogrammes. Clairement, il est plus facile de transporter son **énergie** sous forme liquide que dans une batterie, ce qui limite donc l'usage de l'électricité si nous souhaitons garder le niveau de mobilité dont nous bénéficions aujourd'hui avec les véhicules individuels. Néanmoins, les concepteurs de batteries ont accompli de grands progrès au cours de ces dernières années, et il est raisonnable d'envisager un futur proche dans lequel les déplacements terrestres seront majoritairement électriques. À l'inverse, à moins d'une rupture technologique majeure, cela ne semble pas crédible pour le transport aérien. La masse des batteries nécessaires n'est pas compatible avec les avions tels que nous les connaissons.

En ce qui concerne le chauffage, l'électricité est souvent présentée comme une aberration. Le chauffage électrique est d'ailleurs interdit dans de nombreux pays. L'électricité est considérée comme une **énergie** noble et la transformer en chaleur alors même qu'elle a souvent été générée à partir de chaleur – avec un **rendement** d'ailleurs assez mauvais – semble pour le moins absurde. Cependant, l'électricité peut être utilisée pour chauffer un bâtiment sur le principe inverse du réfrigérateur : la pompe à chaleur qui va extraire les calories de l'air extérieur ou du sol pour les injecter dans la pièce. Cette pompe fonctionne donc à l'électricité et permet un **rendement** global impressionnant (Fig. 11.34). Pour une calorie apportée par l'électricité, deux ou plus viennent de l'extérieur et peuvent donc être considérées comme renouvelables. Cette technologie, qui existe depuis longtemps et qui se répand actuellement, fait nettement gagner en efficacité et rend l'électricité attractive même pour le chauffage. La pompe à chaleur permet ainsi de regagner le **rendement** énergétique qui a été perdu au moment de la génération de l'électricité.

118. Chaîne YouTube de « Le Reveilleur » (sur climat et **énergie**) : <https://www.youtube.com/channel/UC1EacOJoqsKaYxaDomTCTEQ>.

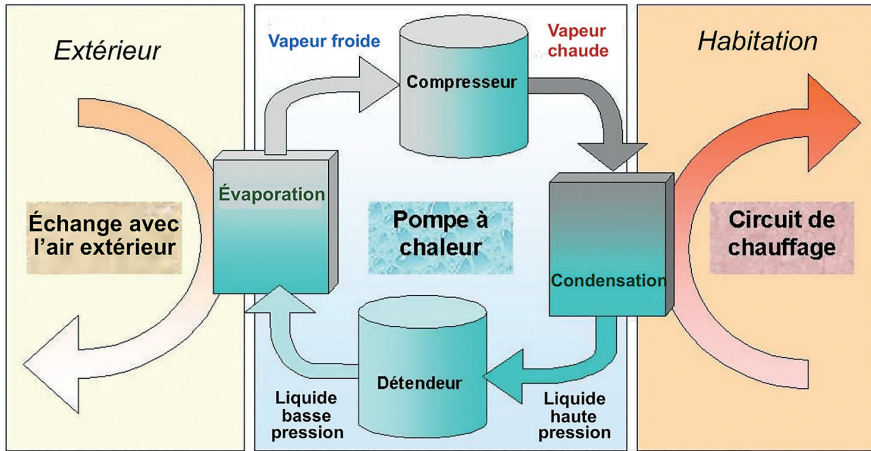


Figure 11.34 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur. Le liquide frigorigène (le même que dans un réfrigérateur) est vaporisé lors de l'échange avec l'air extérieur. Un compresseur comprime la vapeur et élève sa température. La vapeur chaude cède sa chaleur au circuit de chauffage de l'habitation. Le liquide obtenu par condensation est alors refroidi grâce à un détendeur, et un nouveau cycle peut recommencer. Source : Luna04 at fr.wikipedia.

Il nous faut cependant revenir sur le fait que l'électricité n'est pas une source primaire d'énergie, mais qu'elle est obtenue par conversion d'une énergie primaire (chaleur, mouvement, lumière, gravité, chimique, nucléaire...) en énergie électrique. Il faut donc d'abord la « fabriquer » afin de permettre les divers usages, que nous avons mentionnés. Aujourd'hui, une grande majorité de l'électricité produite dans le monde repose sur la combustion du charbon et, dans une moindre mesure, sur celle du gaz. Si nous voulons la neutralité carbone, il faudra nous en passer, ce qui nécessite de développer soit les énergies renouvelables, soit le nucléaire¹¹⁹.

Insistons quelque peu sur ce point en guise de conclusion. Limiter le changement climatique nécessite de diminuer fortement nos usages des énergies fossiles. On fait vite l'amalgame en affirmant qu'il faut donc diminuer notre consommation d'énergie, et donc notre consommation d'électricité. C'est une erreur puisque l'électricité peut être produite avec de très faibles émissions de CO₂, que ce soit par des énergies renouvelables (section 11.4) ou du nucléaire (section 11.5). On peut donc parfaitement imaginer un futur dans lequel notre consommation totale d'énergie diminue, mais avec un transfert de nombreux usages fossiles vers de l'électrique, et donc une augmentation de la consommation de cette forme d'énergie.

Contrairement à ce qui est souvent affirmé, la lutte contre le changement climatique ne passe pas nécessairement par la diminution de la consommation électrique, mais par une sobriété énergétique, dans laquelle, potentiellement, l'électricité produite de manière décarbonée, prendrait une part majoritaire.

119. Résumé du rapport du GIEC SR15. Traduction Française : https://drive.google.com/file/d/1mH_lyAmLujMiSwZ8MmxuDRKu32vrCv5/view.

11.7. Émissions négatives de CO₂ – C. Even

Les émissions négatives font partie de ce que l'on appelle la «géo-ingénierie». Ce sont des procédés à grande échelle, qui visent à modifier le [climat](#) de manière volontaire, en particulier pour atténuer le réchauffement climatique dû aux activités humaines.

11.7.1. Géo-ingénierie : traitements directs et indirects du réchauffement climatique

La géo ingénierie se subdivise en deux grandes catégories de techniques :

(1) Celles qui visent à traiter directement le réchauffement climatique lui-même. Le but est alors d'aboutir à une diminution du rayonnement solaire incident sur la Terre et de refroidir ainsi la surface de celle-ci. Une façon d'obtenir ce résultat est d'augmenter la part du rayonnement solaire qui est renvoyé dans l'espace. Plusieurs processus peuvent être imaginés dans ce but, comme l'illustre la [figure 11.35](#). Par exemple, l'un des processus (b) consiste à injecter des petites particules d'aérosols dans la haute [atmosphère](#). Accumulées sous forme de nuages, elles réfléchiront en partie la lumière solaire incidente et réduiront, de ce fait, l'intensité solaire qui arrive à la surface de la Terre.

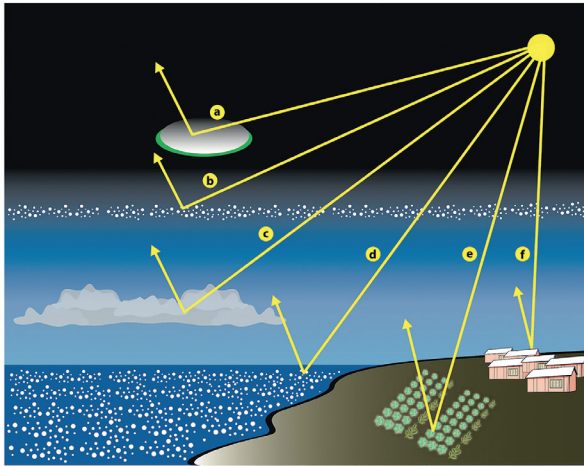


Figure 11.35 : Processus imaginés pour réfléchir le rayonnement solaire et éviter qu'il ne soit absorbé à la surface de la Terre. (a) : utilisation de satellites dans l'espace, (b) : injection d'aérosols dans la stratosphère, (c) : «ensemencement» de nuages au-dessus de l'océan, (d) : accroissement de la réflectivité de l'océan, (e) : plantation de végétation réfléchissante, (f) : application de peinture blanche sur les toits et sur d'autres infrastructures de bâtiment. Source : [15].

Le principal avantage potentiel de ces techniques de refroidissement est leur rapidité. Elles pourraient agir à l'échelle de quelques années seulement avec une baisse de la température de quelques degrés en une décennie. Leur principal inconvénient est que, par exemple dans le cas des aérosols, il faudrait en réinjecter très régulièrement

dans l'**atmosphère**. Si pour une raison ou pour une autre ce n'était pas fait, un réchauffement très rapide et de grande ampleur s'ensuivrait. À ceci s'ajoute la possible dangerosité des particules d'aérosols pour la santé humaine (voir section 2.3).

(2) La deuxième catégorie de techniques vise à agir sur la cause du réchauffement climatique, à savoir la trop grande quantité de gaz carbonique dans l'**atmosphère**, non pas par une baisse de nos émissions de CO₂ (qui est de toute façon nécessaire), mais par des procédés de capture du CO₂ en excès dans l'**atmosphère**. On parle ainsi d'« *émissions négatives* », par opposition aux émissions (positives) qui consistent à ajouter du CO₂ dans l'**atmosphère**. Ces techniques indirectes agiront plus lentement que celles visant au refroidissement direct, à l'échelle de plusieurs dizaines d'années au lieu de quelques années, mais elles auront le grand mérite de s'attaquer directement à la cause du réchauffement.

Le GIEC envisage dès à présent la réalisation d'émissions négatives dans différents **scénarios** de **modélisation** climatique (voir section 9.4.3), bien que pour l'instant aucune technique d'émissions négatives n'ait été mise en place à grande échelle. La **figure 11.36** représente les émissions annuelles de CO₂ qui sont prévues pour la fin de ce siècle selon différents **scénarios**, partant des émissions actuelles d'environ 40 Gt pour les années 2020 (courbe noire). Sont aussi indiqués sur la figure les niveaux d'augmentation de température moyenne correspondant aux différents **scénarios**.

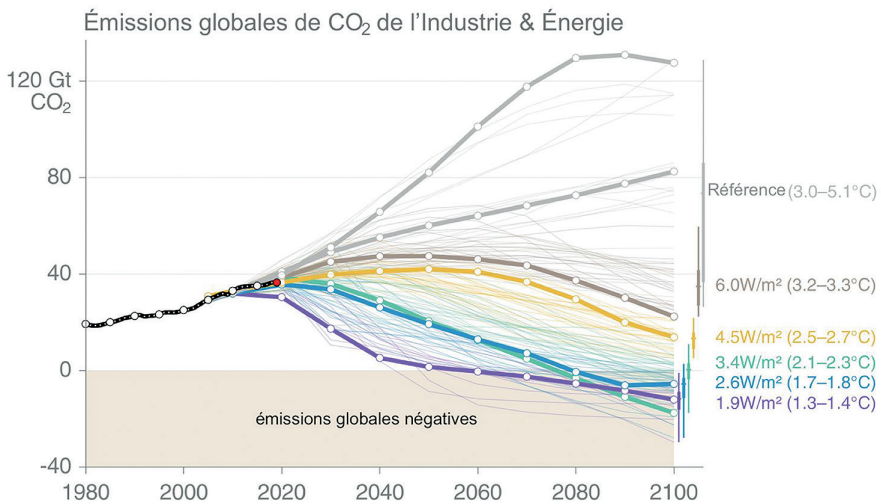


Figure 11.36 : Évolutions des émissions globales de CO₂ prévues jusqu'à la fin du siècle suivant les différents **scénarios** envisagés dans les modèles climatiques. Sont mis en correspondance les niveaux d'augmentation de la température moyenne qui seront atteints en 2100 par rapport à la température de l'ère préindustrielle. La courbe noire correspond à l'évolution enregistrée depuis le début du siècle jusqu'à 2019. Les autres courbes en traits gras correspondent aux **scénarios** considérés plus particulièrement dans le programme CMIP6 (programme d'intercomparaison entre modèles climatiques). Source : Global Carbon Project¹²⁰.

120. https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2019/GCP_CarbonBudget_2019.pdf

On constate que les scénarios, pour lesquels l'augmentation de température à l'horizon 2100 reste limitée à moins de 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle, sont ceux qui incluent des techniques d'émissions négatives à grande échelle. La zone en ocre clair correspond aux scénarios pour lesquels les émissions globales de CO₂ sont négatives.

11.7.2. Émissions négatives par capture du CO₂ atmosphérique [16]

Les émissions négatives se subdivisent aussi en deux catégories :

(1) Celles qui consistent en un captage direct du CO₂ atmosphérique par des procédés physico-chimiques. Par exemple, l'adsorption du CO₂ atmosphérique sur un solide et son absorption par une solution liquide sont parmi les procédés chimiques envisagés. Il nous faut souligner que ces techniques sont très énergivores, car il faut traiter de grandes quantités d'air afin d'extraire des quantités non négligeables de CO₂. En effet, on rappelle que celui-ci ne représente qu'environ 0,04% de l'atmosphère. Le CO₂ ainsi récupéré pourra être, soit utilisé à des fins industrielles, soit stocké géologiquement. Ces techniques sont actuellement en cours de développement dans certaines usines d'Europe ou d'Amérique du Nord, par exemple.

(2) Les techniques de capture indirecte du CO₂ atmosphérique, par le procédé biologique de photosynthèse. Rappelons à cet égard que la photosynthèse est à la base de la vie. En effet, c'est grâce à elle que les plantes peuvent pousser en produisant leur propre nourriture en présence de lumière et ce, à partir du CO₂ de l'air et de l'eau venant du sol ou des précipitations. Les plantes sont elles-mêmes à la base de la chaîne alimentaire. La réaction chimique de la photosynthèse est la suivante :



dans laquelle CH₂O est la formule d'un sucre élémentaire, qui va servir à nourrir la plante. L'oxygène de l'air est produit uniquement par photosynthèse et renouvelé en permanence. En fait, il n'y a pas que les plantes qui réalisent la photosynthèse, mais aussi certains micro-organismes unicellulaires appelés micro-algues, qui comprennent aussi des bactéries et que l'on trouve dans l'eau, douce ou salée. Au total, environ la moitié de la photosynthèse est réalisée par les plantes et l'autre moitié par les microorganismes.

Revenons aux techniques d'émissions négatives basées sur la photosynthèse, qui sont essentiellement les suivantes :

- *L'afforestation et la reforestation*, qui consistent à planter des forêts, soit là où il n'y en avait pas avant (*afforestation*), soit là où il y en avait auparavant (*reforestation*). Ce sont les techniques les plus faciles à mettre en œuvre et les mieux maîtrisées. Cependant, leur effet sur le climat est controversé : en effet, l'*afforestation* dans les régions tempérées et boréales pourrait réduire l'albédo et résulter en un réchauffement net malgré la capture de carbone.

Par contre, l'**afforestation** dans les régions tropicales tendrait à refroidir le **climat** grâce à la formation de nuages qui augmenteraient l'**albédo**, ainsi que par le captage du carbone.

- *La fertilisation des océans*: l'idée est de « booster » la **photosynthèse** réalisée par les micro-organismes marins, grâce à l'addition de nutriments dans l'océan, notamment du fer. Des études portant sur cette technique montrent que son potentiel de séquestration de carbone reste limité. De plus, une forte production de **biomasse** à la surface des océans cacherait la lumière pour les organismes marins vivant en-dessous et les empêcherait de réaliser eux aussi la **photosynthèse**. Cette technique aurait donc sans doute un fort impact sur la **biodiversité** marine.
- *Les BECCS (BioEnergy with Carbon Capture and Storage)*, amplement cités par le rapport du **GIEC** d'août 2019 « *Climate change and land* »¹²¹. De quoi s'agit-il? On fait pousser de la végétation (plantes ou arbres), ce qui permet d'absorber du CO₂ atmosphérique. On l'utilise ensuite comme combustible, par exemple pour alimenter une centrale thermique, ce qui fournit de l'électricité et/ou de la chaleur. Le CO₂ réémis lors de la combustion est capté et stocké géologiquement. Cependant, d'après le rapport du **GIEC** cité ci-dessus, dans l'objectif d'un réchauffement de 1,5 °C en 2100, il faudrait utiliser jusqu'à 7 millions de km² de terres arables, ce qui représente environ 11% de la surface agricole mondiale actuelle. De plus, le besoin en eau pour le même objectif serait de deux fois la consommation mondiale d'eau pour l'agriculture. On voit ainsi que la mise en œuvre de cette technique à grande échelle apparaît comme largement irréaliste.

En conclusion, vraisemblablement, aucune des techniques d'émission négative citées ne sera appliquée à grande échelle seule. On peut, par contre, imaginer qu'une combinaison de techniques pourra être utilisée. Enfin, il ne faut pas oublier que si les **scénarios** du **GIEC** prévoient des émissions négatives, la réduction de nos émissions (positives) reste l'objectif primordial.

Références

- [1] F. Sarrazin, J. Lecomte. 2021. Transition évolutive et naturalité, in Protéger l'environnement. De la science à l'action (eds. Mermans, E. & Dussault, A.-C.). Éditions Matériologiques.
- [2] B. Morizot. 2016. *Les diplomates*. Wildproject.
- [3] E.O. Wilson. 2016. *Half-earth: our planet's fight for life*. WW Norton & Company.

121. Rapport du **GIEC** d'août 2019 « *Climate change and land* » : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf

- [4] S. Durand. 2018. *20 000 ans : ou la grande histoire de la nature*. Éditions Mondes Sauvages.
- [5] G. Billen, J. Garnier, M. Benoît, J. Anglade. 2013. La cascade de l'azote dans es territoires de grande culture du nord de la France. *Cah. Agric* **22**(4).
- [6] World resources report: creating a sustainable food future - A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050, Synthesis report p.17 (Dec. 2018).
https://research.wri.org/sites/default/files/2019-07/creating-sustainable-food-future_2_5.pdf
- [7] H. Ritchie, M. Roser. 2020. – "Environmental impacts of food production". *Published online at OurWorldInData.org*. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food> [Online Resource].
- [8] C.L. Weber, H.S. Matthews. 2008. Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environ. Sci. Technol.* **42**, 3508-3513. <https://doi.org/10.1021/es702969f>.
- [9] T. Brunelle, M. Coat, V. Viguié . 2017. Demand-side mitigation options of the agricultural sector: potential, barriers and ways forward. *OCL* **24**. <https://doi.org/10.1051/ocli/2016051>.
- [10] IPCC Report 2019, Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, p. 488. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>
- [11] M. Khouchane. 2014. *Réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les transports*. Éditions Universitaires Européennes.
- [12] A. Madani, C. Bryant. 2019. *L'adaptation aux changements climatiques dans le transport terrestre, «Regards croisés»*. Editions Econotrends Ltd.
- [13] S. Porte. 2020. *Le Dernier Avion - L'impact du trafic aérien sur l'environnement : mondialisation, tourisme, santé, dérèglement climatique - Voyager moins pour voyager mieux*. Tana Editions.
- [14] S. Pellerin, L. Bamière, L. Pardon. 2015. *Agriculture et gaz à effet de serre - Dix actions pour réduire les émissions*. Éditions Quae.
- [15] K. Caldeira, *et al.* 2013. "The Science of geoengineering". *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **41**, 231--56.
- [16] J.C.M. Pires. 2019. Negative emissions technologies: A complementary solution for climate change mitigation., *Science of the Total Environment* **672**, 502--514 (2019).