



HAL
open science

Energies et pollutions

Catherine Even, Guillaume Roux, Frédéric Lantz, Jean-Eudes Petit, Sophie Laval-Szopa, Yves Levi, Jean-Christophe Bureau, Christine Hatté

► **To cite this version:**

Catherine Even, Guillaume Roux, Frédéric Lantz, Jean-Eudes Petit, Sophie Laval-Szopa, et al.. Energies et pollutions. Enjeux de la transition écologique, EDP Sciences, pp.43, 2021, 978-2-7598-2662-9. hal-03478978

HAL Id: hal-03478978

<https://universite-paris-saclay.hal.science/hal-03478978>

Submitted on 14 Dec 2021

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 2

Énergies et pollutions

Dans ce chapitre, nous discuterons du rôle de l'énergie dans nos sociétés pour aborder ensuite les pollutions qu'engendrent nos modes de vie et de consommation énergétique. L'énergie est un facteur essentiel du développement économique des sociétés. La domination actuelle du charbon, du pétrole et du gaz comme ressources d'énergie contribue de façon majeure au réchauffement climatique, comme nous l'analyserons plus en détail dans la partie III de cet ouvrage. Mais, l'exploitation de ces ressources fossiles, donc non renouvelables, participent aussi d'un développement économique qui se fait aux dépens de l'environnement, et donc d'autres ressources essentielles que sont l'air, l'eau et les sols. Nous verrons à travers ce présent chapitre que la qualité de l'air, l'accès à l'eau pour tous et la préservation des sols pour la sécurité alimentaire sont les conditions d'un développement durable pour l'humanité, c'est-à-dire d'un développement « qui permette de satisfaire les besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ».

2.1. Production et consommation d'énergie : la domination des énergies fossiles – C. Even et G. Roux

2.1.1. L'énergie en physique

L'énergie est une grandeur physique, qui a été introduite par les physiciens pour pouvoir effectuer des bilans lors de l'évolution des systèmes [1]. À la différence d'une position, d'une vitesse ou d'une température, c'est un concept abstrait que l'on peut voir comme une unité comptable. Imaginons qu'on tienne une balle dans une main puis qu'on la lâche, elle va tomber à cause de la gravité, et elle prend de la vitesse au cours de sa chute.

Lorsqu'elle est dans la main, la balle est déjà attirée par la Terre, par gravitation : on dit qu'elle possède une certaine **énergie** potentielle de gravitation. Quand elle tombe, cette **énergie** potentielle diminue parce qu'elle se rapproche de la Terre. En même temps, elle prend de la vitesse et on associe une **énergie** dite « cinétique » à cette vitesse ; et cette **énergie** cinétique augmente au cours de la chute.

On a ainsi une transformation d'**énergie** potentielle de gravitation en une **énergie** cinétique associée à la vitesse, transformation au cours de laquelle l'**énergie** totale (**énergie** potentielle + **énergie** cinétique) se conserve. C'est la conservation de l'**énergie**. Retenons l'idée suivante : « l'**énergie** est une **unité comptable** qui intervient dans toute transformation d'un système, c'est-à-dire dans tout changement d'état de ce système ».

L'**énergie** possède sa propre unité, le **Joule**, mais pour des raisons pratiques, nous allons utiliser le kilowattheure (**kWh**) qui est l'unité utile pour les questions de société. Cette unité est associée à la puissance des machines, qui s'exprime en watts. La puissance est l'**énergie** par unité de temps, une forme de débit d'**énergie**. Un **kWh** correspond à la consommation d'**énergie** d'une machine de 1 kW, c'est-à-dire 1000 W, pendant 1 h. Les factures d'électricité ou de gaz contiennent une estimation du nombre de **kWh** consommés.

L'**énergie** se retrouve sous de nombreuses formes. Citons les plus courantes pour notre vie de tous les jours : **énergie** cinétique associée à une vitesse, **énergie** potentielle de gravitation, travail mécanique associé à la pression, chaleur, **énergie** électrique, **énergie** chimique, **énergie** associée au rayonnement...

2.1.2. Chaîne de production de l'énergie : l'exemple de la voiture

Dès lors que l'on parle de machines et du rôle de l'**énergie** dans la société, nous prenons un point de vue anthropocentrique qui va attribuer une certaine valeur subjective aux mots employés et aux définitions. On appelle source d'**énergie** un système physico-chimique à l'origine d'une chaîne de transformations qui, au final, satisfait un besoin humain.

Afin d'illustrer cela, décomposons toutes les formes d'**énergie** et les transformations qui interviennent dans l'utilisation d'une voiture à essence. Le cœur du système est le moteur, au centre sur la **figure 2.1**. Le moteur comporte plusieurs cylindres où est injecté un gaz, mélange d'air et de carburant, et des pistons, qui viennent comprimer le gaz dans les cylindres. Dans chaque cylindre, à tour de rôle, une bougie d'allumage crée une étincelle qui entraîne la combustion violente du gaz, son explosion. La pression devient alors si forte qu'elle repousse le piston et l'entraîne en mouvement. Ensuite, toute une mécanique permet de transformer le mouvement rectiligne du piston en mouvement de rotation de l'arbre moteur, ce qui fait tourner les roues de la voiture et la fait avancer.

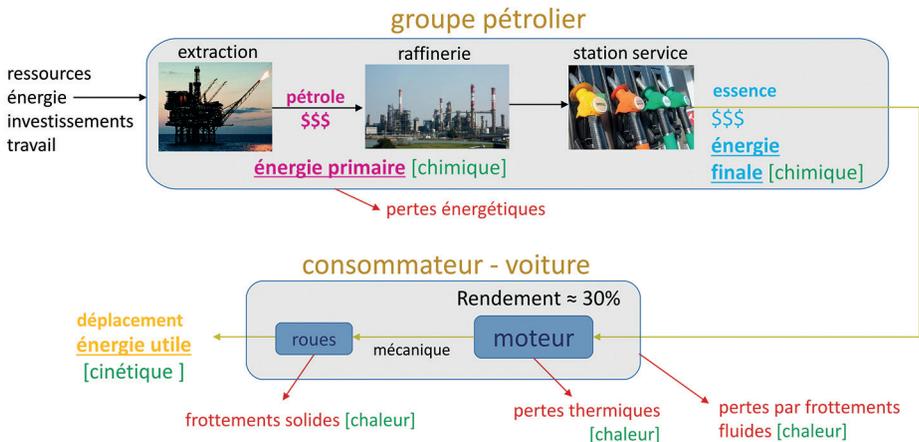


Figure 2.1 : Formes et transformations d'énergie qui interviennent dans l'utilisation d'une voiture. Source : Catherine Even & Guillaume Roux.

Si on résume, le moteur agit donc comme un convertisseur d'énergie qui transforme l'énergie chimique de l'essence en énergie cinétique de la voiture, associée à son déplacement. Déplacer la voiture, c'était bien le but, donc on appelle cette énergie cinétique « énergie utile », en jaune sur le dessin. Mais l'énergie utile n'est jamais mesurée en pratique, c'est plus une notion qui intéresse l'ingénieur ou le physicien. Pour le consommateur, ce qui compte c'est l'énergie qu'il paie pour ce service, c'est-à-dire l'essence : on parle d'énergie finale, en bleu sur le dessin.

Si l'on revient sur la notion de convertisseur d'énergie de manière générale, toute l'énergie introduite dans un convertisseur ne se transforme pas en énergie utile. Le rapport entre les deux est appelé le rendement. Pour un moteur de voiture à essence, le rendement est typiquement de 30% dans la conversion d'énergie chimique en énergie mécanique sur l'arbre moteur. L'énergie « perdue » pour l'utilisateur se retrouve sous forme de chaleur : le moteur chauffe, les gaz d'échappement sont chauds, les frottements mécaniques échauffent les pièces... À chaque étape, il y a des pertes.

Remontons maintenant la chaîne de production de l'énergie, en haut sur le dessin. L'essence ne se trouve pas dans la nature. Elle est issue de l'extraction du pétrole qui est ensuite raffiné et dont l'essence n'est qu'un des sous-produits distribués par un réseau de stations-service. Du point de vue économique, le pétrole est une matière première qui contient de l'énergie sous forme chimique : cette énergie contenue dans le pétrole, qui se trouve en amont de la chaîne de production d'énergie est appelée énergie primaire, en violet sur le dessin.

En résumé, si l'énergie utile caractérise le service rendu, ce sont les énergies primaire et finale qui apparaissent dans les statistiques. En effet, elles font l'objet de transactions économiques et donc sont systématiquement comptabilisées.

2.1.3. Chaîne de production de l'énergie : généralisation

Les statistiques de l'énergie sont basées sur les énergies primaires qui sont bien répertoriées. Ces énergies primaires, ce sont les sources d'énergies présentes naturellement et gratuitement dans l'environnement, en vert sur la figure 2.2. Elles se divisent entre énergies de type stock, non renouvelables à notre échelle de temps humaine, et énergies de type flux, renouvelables. Les énergies de stock sont les fossiles – charbon, pétrole et gaz, on en reparlera un peu plus loin – et les fissiles, c'est-à-dire le nucléaire – l'uranium, notamment. D'autre part, les énergies de flux renouvelables sont l'énergie solaire et ses sous-produits – hydraulique, vent, houle, biomasse –, l'énergie géothermique et l'énergie des marées.

Notons au passage que la mise en œuvre des énergies renouvelables met en jeu des dispositifs qui utilisent des matériaux non renouvelables: panneaux solaires, cuivre, aluminium, aimants, matières plastiques, béton, etc.

La distinction flux / stock se retrouve également dans les vecteurs d'énergie, qui sont des formes intermédiaires d'énergie assurant un transport efficace. L'électricité en est un exemple: elle est à la fois un flux, à la prise de courant, et un stock, sous forme électrochimique dans les batteries.

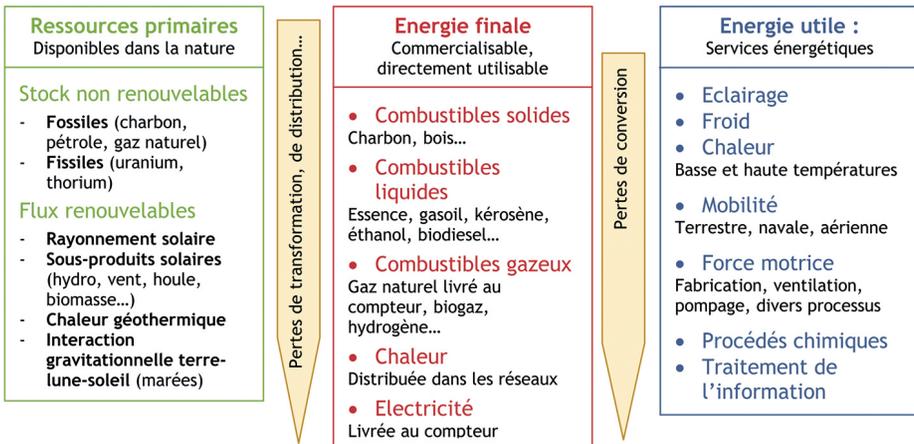


Figure 2.2: Chaîne de production d'énergie et classification des différents types d'énergie: des ressources primaires à l'énergie utile au consommateur¹⁸.

Quand on passe d'une source d'énergie primaire à l'énergie finale associée, en rouge sur la figure 2.2, il y a des pertes associées à la transformation, la distribution, etc. Si l'on reprend l'exemple précédent de la voiture, il faut transporter le pétrole

18. https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/concepts-chiffres-de-lenergie-comment-definir-le-rendement-dun-convertisseur-denergie

brut depuis les puits d'extraction, puis le raffiner en essence et distribuer l'essence pour que le consommateur puisse remplir le réservoir de sa voiture.

Enfin, le passage de l'énergie finale à l'énergie utile – en bleu sur la figure 2.2 – entraîne d'autres pertes lors de la conversion. C'est la notion de rendement, qu'on a déjà vue.

Insistons sur le fait que toute chaîne de production énergétique nécessite, pour exister, d'avoir une infrastructure, des investissements financiers, mais aussi de l'énergie pour en assurer l'extraction, les transformations et le transport ! Ces activités ont des impacts sociétaux et environnementaux non négligeables : emplois dangereux, pollution et rejets de gaz à effet de serre, destruction de biodiversité, occupation des sols, pression sur les réserves d'eau...

Intermède

<https://www.youtube.com/watch?v=S4O5voOCqAQ>

2.1.4. Consommation d'énergie : échelle individuelle

Nous allons maintenant parler de consommation d'énergie sous différentes formes correspondant à différents usages. Nous partirons d'ordres de grandeur par personne et par jour avant de discuter la consommation à l'échelle mondiale.

Dans nos sociétés développées, toutes les fonctions essentielles comme s'alimenter, se déplacer, se chauffer, produire et travailler sont assurées à l'aide de machines nourries à l'énergie. Cela a été rendu possible en puisant dans les stocks abondants de matières fossiles – le charbon, le pétrole et le gaz – qui alimentent la grande majorité des machines, y compris les machines électriques comme nous le verrons ci-après.

En considérant l'homme comme une machine, l'alimentation lui apporte environ 3 kWh par jour et nous pouvons fournir typiquement 100 W de puissance mécanique ; l'essentiel étant dissipé en chaleur, ce qui permet de compenser nos pertes et de maintenir la température de notre corps à 37 °C. Une puissance de 100 W nous permet de pédaler sans trop forcer. C'est une puissance significativement inférieure à celle de la plupart des machines qui nous entourent. Sur une journée et après 10 h de travail harassant, un manœuvre fournit environ un travail mécanique de l'ordre de 1 kWh.

Les machines nous permettent de faire plus et plus vite, mais aussi des choses que nous ne pourrions faire sans leur puissance, comme faire décoller un avion. Comme l'énergie n'est pas chère, nos usages favorisent la rapidité au détriment de la sobriété : les batteurs électriques de 300 W sont beaucoup plus puissants que nos avant-bras.

Reprenons l'exemple de la voiture. Un déplacement typique en région parisienne fait 12 km aller-retour. Vous pouvez l'effectuer en 1 h de vélo avec vos 100 W de jambes, en consommant donc en tout 0,1 kWh. Vous pouvez l'effectuer en 30 min de voiture, en consommant 1 L d'essence. Ce litre fournit environ 10 kWh d'énergie finale. C'est donc environ 100 fois plus d'énergie pour diviser par seulement deux le temps de déplacement (Tab. 2.1).

	vélo		voiture
durée du trajet	1 heure	$\frac{1}{2}$	30 mins
énergie consommée	0.1 kWh	$\times 100$	1L essence ≈ 10 kWh
puissance moyenne	100 W	$\times 200$	20 kW
puissance maximale	350 W	$\times 200$	70 kW
coût énergie	0		1,5 €

Tableau 2.1: Comparaison du vélo et de la voiture en termes de consommation d'énergie sur un trajet typique de 12 kms en milieu urbain. Source : Guillaume Roux.

Comme l'indique le tableau 2.2 (à gauche), notre consommation typique journalière d'énergie est l'addition de contributions très variées dont on donne ici quelques exemples. Dans l'addition finale, il est important de noter qu'il y a une part de consommation personnelle, mais aussi une part collective. Au total, la consommation moyenne par jour et par habitant dans le monde est de l'ordre de 40 kWh (Tab. 2.2, à droite). Cependant, on constate de grandes disparités selon les modes de vie. Dans tous les cas, l'électricité représente une fraction importante mais non dominante de la consommation d'énergie finale.

Exemples de consommations journalières typiques d'énergie

Forme d'énergie	Conso/production journalière en kWh	Puissance typique en kW
grille pain	0.08	1
frigo	0.13	0.1
ordinateur portable	1	0.1
eau chaude	2.2	2
chauffage	5	10
voiture	10	100

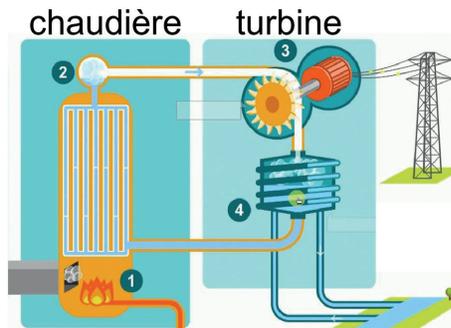
Énergie moyenne consommée par jour et par habitant en kWh			
région	primaire	finale	dont électrique
Monde	59	41	8
USA	210	149	32
France	117	73	20

Tableaux 2.2: Ordres de grandeur de notre consommation quotidienne d'énergie (pour l'estimation de ces chiffres¹⁹) et consommation moyenne d'énergie par personne et par jour selon le type d'énergie. Source : Guillaume Roux.

19. D. MacKay. *Sustainable Energy - without the hot air*. <https://www.withouthotair.com/>

2.1.5. Consommation d'énergie : échelle mondiale

Si l'on souhaite satisfaire les besoins énergétiques de tous, le simple facteur démographique va déterminer la taille des moyens de production collectifs. Leur choix est donc un enjeu politique et stratégique majeur qui doit se planifier. Prenons l'exemple de la production d'électricité. Elle est principalement assurée par les centrales thermiques qui convertissent de la chaleur issue d'un combustible (charbon, gaz, fioul, uranium, déchets, ou biomasse) en électricité à l'aide d'une turbine à vapeur (Fig. 2.3). En France, la consommation d'électricité par habitant et par jour est typiquement de 20 kWh (Tab. 2.2, à droite), soit 20 kWh/24 h \approx 1 kW de puissance moyenne, ce qui correspond sensiblement à un grille-pain allumé en permanence. Pour 70 millions de Français, il faut donc disposer d'au moins 70 GW de centrales électriques, ce qui est proche de la puissance fournie par notre parc de réacteurs nucléaires. En réalité, le double de puissance de production est installé pour pallier les pertes d'acheminement et l'intermittence de la consommation et de la production.



consommation moyenne d'électricité
1 kW x 70 millions de français = 70 GW

Figure 2.3: Production d'électricité par une centrale thermique et puissance électrique moyenne typiquement consommée en France (figure adaptée²⁰). La puissance nucléaire installée est de 63 GW, la puissance totale installée est de 133 GW. Source : Guillaume Roux.

Discutons maintenant l'évolution historique de la consommation mondiale d'énergie. Comme on le voit sur la figure 2.4, depuis 150 ans, la contribution de la biomasse dans la consommation d'énergie par habitant diminue au profit de la contribution des énergies fossiles : d'abord le charbon, puis le pétrole et enfin le gaz naturel. Leurs utilisations se sont empilées sans se substituer. Finalement, la consommation d'énergie primaire par personne a été multipliée par presque 3,5.

20. Figure adaptée d'une figure du site web : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/jeunes-enseignants/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite> (dans sa version de 2017). Voir aussi la vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=bnF8q94T9d8>

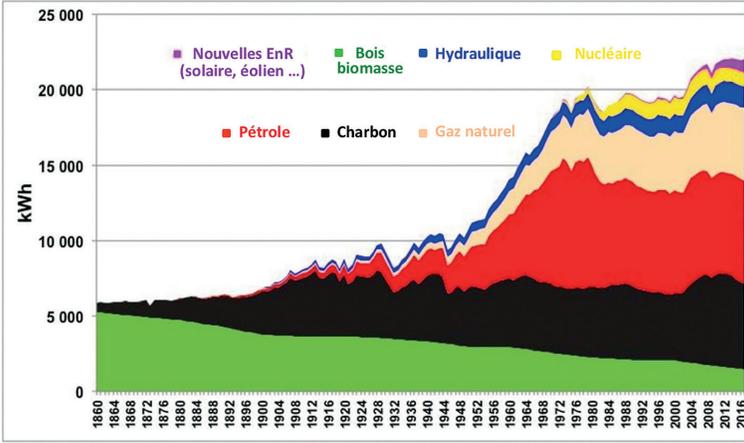


Figure 2.4 : Évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire par habitant et par source d'énergie depuis 150 ans²¹. Noter l'ordre de grandeur 22 000 kWh/an ≈ 60 kWh/jour. Source : Jean-Marc Jancovici.

En prenant en compte la démographie, l'énergie totale suit une augmentation très rapide (Fig. 2.5). Les chiffres moyens sont évidemment à relativiser en raison de la grande disparité, à la fois historique et géographique, de l'utilisation de l'énergie. Cette augmentation a été principalement portée jusqu'au début des années 2000 par les pays développés, Amérique du Nord, Europe, Russie et Japon. La Chine et les pays émergents tirent maintenant la production vers le haut.

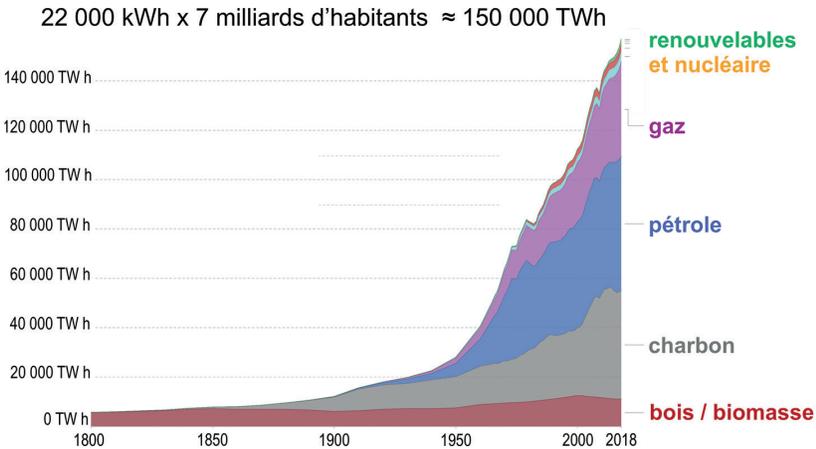


Figure 2.5 : Évolution globale de la consommation d'énergie primaire par source d'énergie dans le monde. Source : Our World in data, dossier sur l'énergie : <https://ourworldindata.org/energy>²².

21. <https://jancovici.com/transition-energetique/l-energie-et-nous/lenergie-de-quoi-sagit-il-exactement/>

22. Our World in data, dossier sur l'énergie : <https://ourworldindata.org/energy>

2.1.6. Domination des énergies fossiles

Nous allons maintenant faire un focus sur les **ressources fossiles** : le charbon, le pétrole et le gaz. Toutes trois proviennent de la lente fossilisation d'organismes vivants. Celle-ci produit des matières riches en carbone que l'on retrouve enfouies dans des couches géologiques après un processus qui s'est étendu sur des dizaines à des centaines de millions d'années.

Du point de vue de son utilisation, le charbon sert surtout à la métallurgie et à la production d'électricité dans les centrales thermiques. Le pétrole sert surtout aux transports. L'utilisation du gaz se partage à parts presque égales entre production électrique, usage domestique (chauffage, cuisson) et usage industriel.

Dans tous les cas, l'exploitation majoritaire des matières fossiles consiste à les brûler. Comme elles contiennent toutes trois du carbone, la réaction de combustion peut s'écrire de manière très simplifiée :



L'intérêt de cette réaction est qu'elle dégage une grande quantité d'énergie. Si on reprend l'exemple de la voiture, avec un plein d'essence, soit 50 litres d'essence environ, qui se fait en quelques minutes et coûte de l'ordre de 70 euros, on a de quoi déplacer une voiture sur 1000 km à 100 km/h environ.

Les **énergies fossiles** ont donc de grands atouts. Elles subviennent à la majorité des besoins, depuis l'échelle individuelle jusqu'à l'échelle industrielle, elles sont disponibles et peu chères, stockables et concentrées, et leur utilisation est pilotable et optimisée. Pas étonnant qu'elles représentent 80% de l'énergie primaire consommée dans le monde !

Le revers de la médaille est que la réaction chimique de combustion des matières fossiles conduit à la formation de CO_2 . Par exemple, si un particulier fait 15 000 km en voiture par an, il consomme environ 20 pleins de réservoir et émet 2 tonnes de CO_2 . Cette quantité représente environ le quart du CO_2 émis en moyenne par un français sur une année. Si l'on considère l'ensemble de nos activités, les émissions de CO_2 dues à la combustion de matières fossiles représentent 95% du total de nos émissions.

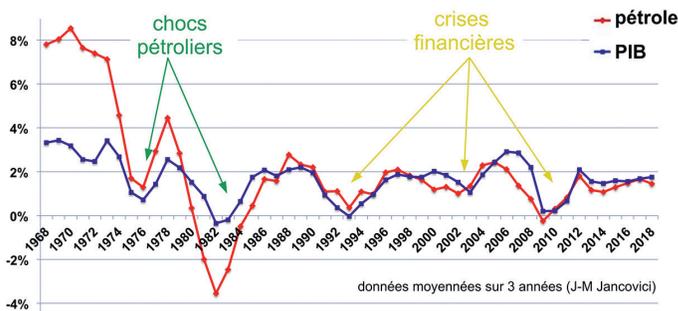
Nous verrons plus précisément dans la partie III de cet ouvrage que nos émissions de CO_2 sont largement responsables du réchauffement climatique actuel. Comme nos émissions de CO_2 sont largement dues aux **énergies fossiles**, on pourra alors en conclure que l'utilisation massive de ces **énergies** est une des causes principales du changement climatique.

2.1.7. Énergie et économie

L'accès à des sources d'énergie abondantes nous permet d'extraire, de transformer et de déplacer facilement la matière. L'énergie est donc déterminante pour les productions agricoles et industrielles. De même, le transport mondialisé de matières premières et de biens de consommation est sous perfusion du pétrole. Enfin, n'oublions pas que le secteur des services, le commerce, le tourisme, les services publics, etc., repose sur la mobilité des personnes et l'usage intensif du chauffage, de l'électricité et de la construction, ce qu'on appelle le secteur résidentiel. Même dans les pays riches, qui ont une économie fondée sur les services, on observe de très forts besoins énergétiques. Ce n'est donc pas qu'une affaire de mode de production, mais bien de mode de vie.

Notre production de richesses et donc nos revenus, mesurés par le PIB (produit intérieur brut), sont dépendants de l'énergie, et notamment du pétrole. Cela se manifeste particulièrement lors des crises économiques. Comme le montre la figure 2.6, on observe une bonne corrélation entre le taux de croissance du PIB et celui de la consommation du pétrole. D'un côté, les chocs pétroliers ont conduit à des récessions, et de l'autre, les crises financières, comme en 2008, ou sanitaires, comme en 2020, ont conduit à une diminution de la consommation de pétrole. Au final, on parle d'intensité énergétique de l'économie pour caractériser cette dépendance de l'économie envers l'énergie. À l'échelle mondiale, il faut typiquement 1,5 kWh pour produire 1 dollar de richesse.

Le fait que la croissance économique et ses bienfaits sociétaux reposent jusqu'à présent sur l'exploitation des énergies fossiles pose deux problèmes: le premier est celui de leur épuisement. Cela concerne particulièrement le pétrole qui est aussi soumis à des enjeux financiers, géopolitiques et sanitaires très forts. Le second problème est la contrainte climatique qui impose d'utiliser de l'énergie décarbonée, comme les énergies renouvelables ou l'énergie nucléaire. Ce sont là les enjeux techniques de la transition énergétique.



Intensité énergétique de l'économie : on utilise 1,5 kWh pour produire 1\$ de richesses

Figure 2.6: Taux de croissance du PIB mondial et de la consommation mondiale de pétrole. D'après Jean-Marc Jancovici

2.2. Le pétrole, enjeux économiques et environnementaux – F. Lantz

2.2.1. Le pétrole, ses usages et ses enjeux

Le pétrole est une ressource fossile, liquide, provenant de dépôts sédimentaires constitués principalement de carbone et d'hydrogène, d'où le nom d'hydrocarbure. Il est utilisé, après transformation en un ensemble de produits pour un usage énergétique comme carburant ou combustible (85%) ou pour un usage non énergétique (bases pétrochimiques transformées en plastiques, bitumes, lubrifiants, etc.).

Le pétrole a joué un rôle majeur dans le développement des sociétés industrialisées, notamment pour son utilisation comme carburant dans les moteurs. La progression de la consommation mondiale de pétrole est spectaculaire tout au long du XX^e siècle et dépasse 4 500 millions de tonnes par an en 2018 [2].

Le pétrole a progressé en termes de quantités utilisées, mais sa part dans l'approvisionnement mondial d'énergie s'est réduite pour représenter un tiers de celui-ci après avoir culminé à 48% de l'approvisionnement mondial d'énergie en 1973.

À cette époque de rareté de la ressource, la concentration des réserves est principalement dans les pays de l'Organisation des Pays Producteurs de pétrole (OPEP) et la demande se situe dans les pays industrialisés. Des tensions sur les marchés et des tensions géopolitiques vont apparaître. La substitution du pétrole va s'amorcer dans ses usages fixes tels que le chauffage ou la production d'électricité, et sa demande va venir pour l'essentiel du secteur des transports. Ce secteur représente 66% du pétrole consommé sachant que près de 96% de l'énergie utilisée dans les transports provient de produits pétroliers.

Il faut noter qu'on parle de pétrole en tonne (en masse) mais aussi en litre ou en **baril** (en volume). Au dix-neuvième siècle, le pétrole a été transporté des champs de pétrole vers les raffineries, où il était transformé en produits pétroliers, grâce à des **barils** qui avaient auparavant servi au transport de boisson. Le **baril** correspond à une mesure exacte en pouce cube et fait... 159 litres. Le **baril** reste aujourd'hui la mesure utilisée dans les transactions de pétrole. Une tonne de pétrole correspond approximativement à 7,34 **barils**.

Nous aborderons plusieurs questions majeures concernant cette ressource au travers de sa production, sa transformation et de son utilisation dans les produits pétroliers. Nous aborderons ensuite le problème des réserves et de leur épuisement. Pour finir, nous aborderons la question des ressources non conventionnelles (huile de schiste) et des défis environnementaux liés à l'usage du pétrole.

2.2.2. La production de pétrole

La production mondiale de pétrole, qui a presque doublé entre 1970 et 2018 (+90%), est réalisée dans quelques régions du monde avec trois grands acteurs, les États-Unis d'Amérique (16% de la production mondiale en 2018), l'Arabie Saoudite (13%) et la Fédération de Russie (12%) (Fig. 2.7). La Communauté des États Indépendants (CIS) représentée sur le graphique inclut les anciens pays limitrophes de la Russie. La part des pays de l'OPEP dans la production a fortement augmenté dans les années 1970 (51% en 1974). À la suite des crises pétrolières de cette période, la production en mer (off-shore) est développée en mer du Nord, dans le Golfe de Guinée et dans le golfe du Mexique, réduisant le poids de l'OPEP qui garde néanmoins plus de 40% de la production mondiale.

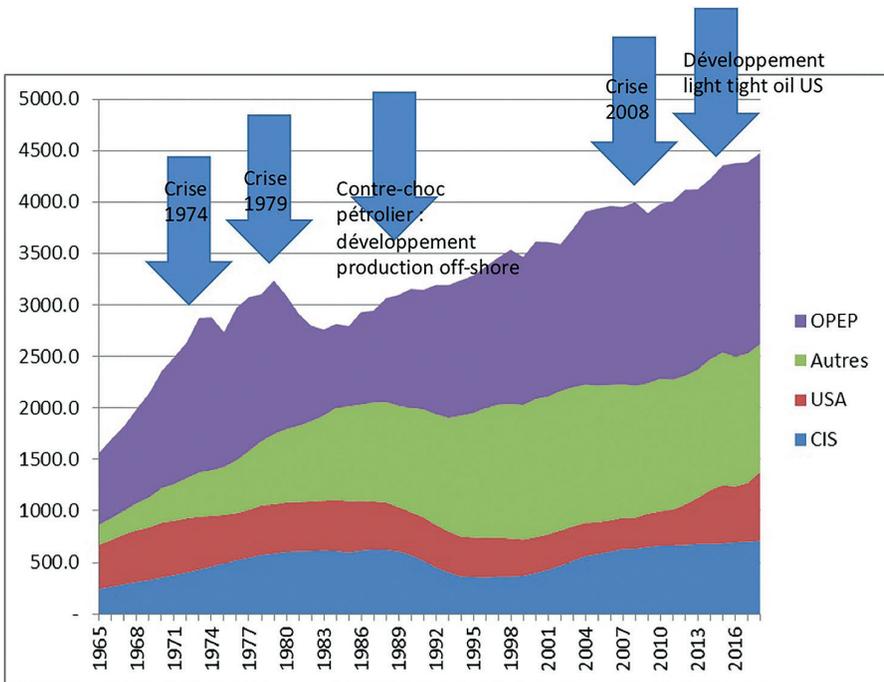


Figure 2.7 : Évolution de la production mondiale de pétrole brut, mesurée en millions de tonnes. Source: BP Statistical Review of the World Energy (2020), 68 p. www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html.

Les pétroles bruts sont de qualité très différente suivant les champs pétrolifères. Les principales caractéristiques qui permettent d'apprécier celles-ci sont la densité (degré API), sa teneur en soufre et ses rendements en essence et distillat dans le processus de raffinage. Un pétrole léger et peu soufré comme le brut algérien est donc mieux valorisé que le pétrole extra-lourd vénézuélien.

2.2.3. Les réserves de pétrole

Les ressources en hydrocarbures sont des ressources épuisables dont la quantité disponible se réduit au fur et à mesure qu'elles sont consommées. Ainsi, avant que ne soient posées les questions sur les émissions de [gaz à effet de serre](#) liées à la consommation de pétrole, la question de l'épuisement des ressources a été soulevée notamment par Hubbert (1956) [3]. Dans la [théorie du pic pétrolier](#) (*peak oil*), la production pétrolière d'une zone géographique donnée connaît une première période de croissance avant d'atteindre un pic puis de décliner.

Quand on parle de réserve, il faut avoir à l'esprit que les ressources ne sont qu'estimées et que les réserves exploitables dépendent du niveau de technologie. On parle ainsi de réserve prouvée lorsqu'on a une probabilité de 90% de récupérer l'huile. Ainsi, comme le montre le graphique de la [figure 2.8](#), ces réserves augmentent régulièrement en raison principalement du progrès technologique dans la production off-shore et la récupération de pétrole brut.

Les plus grandes réserves se situent au Vénézuéla, en Arabie Saoudite et au Canada ([Fig. 2.8](#)). Avec un total estimé de plus de 1 700 milliards de [barils](#), les réserves correspondent à 50 ans de consommation de pétrole au rythme actuel.

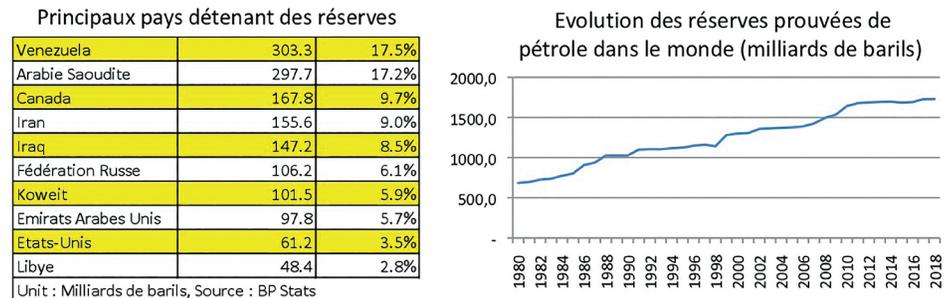


Figure 2.8 : Réserves de pétrole brut dans le monde. À gauche : Principaux pays détenant les réserves (d'après BP Stats [2]). À droite : Évolution des réserves prouvées de 1980 à 2018 (d'après BP Stats [2]).

2.2.4. La transformation du pétrole et les produits finis

En fait, le pétrole n'est pas utilisé directement. Il va être raffiné en produits pétroliers, en carburants pour le secteur des transports, en combustibles ainsi qu'en d'autres produits pour un usage non énergétique (plastiques, bitume, ...) ([Fig. 2.9](#)). On part d'une ressource, qui a des caractéristiques différentes (densité, teneur en soufre) pour la transformer en un produit dont les qualités doivent être homogènes [4]. Il y a longtemps qu'on ne se plaint plus d'avoir une essence de mauvaise qualité qui fait tomber le moteur de sa voiture en panne.

Au fur et à mesure des crises pétrolières et de la montée des préoccupations écologiques, les produits pétroliers ont été de moins en moins utilisés comme combustibles. Désormais, près des deux tiers de la consommation finale de produits pétroliers répond aux besoins du secteur des transports (route, aviation, navigation). Comme on le voit sur le graphique de droite de la [figure 2.9](#), la consommation du secteur routier correspond à environ la moitié de la demande de produits pétroliers. C'est donc dans ce domaine que l'effort principal doit être porté pour réduire notre dépendance au pétrole pour les transports de marchandises et de passagers.

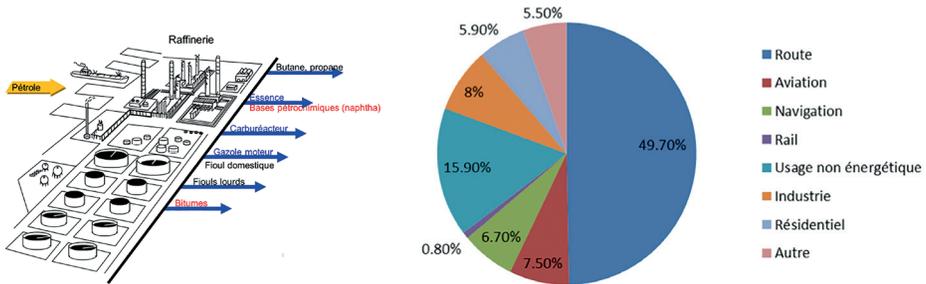


Figure 2.9 : Raffinage du pétrole (à gauche) et répartition de la demande finale de produits pétroliers (à droite). (d'après BP Stats [2]).

Notons que de très grands efforts ont été réalisés dans l'amélioration des carburants, en particulier en Europe avec la très forte réduction de la teneur en soufre de l'essence qui est passée de 150 parties par million (ppm) jusqu'en 2005 à 10 ppm depuis 2009. Nous reviendrons sur cette question environnementale plus loin.

2.2.5. Les ressources non conventionnelles

L'épuisement des ressources pétrolières, qui sont des **ressources fossiles** épuisables par nature, s'est vu contrebalancé par l'exploitation de ressources dites non conventionnelles, dont les ressources en place sont du même ordre de grandeur que les ressources conventionnelles [5].

Les ressources non conventionnelles de pétrole regroupent des pétroles de natures très différentes : *light-tight oil*, brut extra-lourds et sables bitumineux. Les schistes bitumineux (*shale oil*), sont quant à eux très peu exploités. Le pétrole lourd résulte de l'oxydation bactérienne de brut conventionnel qui a été piégé dans le réservoir, et ses caractéristiques physico-chimiques sont généralement de moins bonne qualité que celles des pétroles conventionnels avec une viscosité plus élevée et des taux supérieurs de **métaux lourds**, de soufre et d'azote.

Le Venezuela et le Canada sont les deux pays clés en termes de réserves, le premier pour le brut extra-lourd et le second pour les sables asphaltiques ([Fig. 2.10](#)). La répartition des réserves de pétrole non conventionnel au niveau mondial montre que ces

ressources modifient profondément l'équilibre des marchés pétroliers. Les *light tight oil* qui sont exploités aux États-Unis ont eu un très fort impact sur le prix du pétrole.

L'exploitation de ces ressources non conventionnelles a été rendue possible par la maîtrise de deux techniques : le forage horizontal et la fracturation hydraulique.

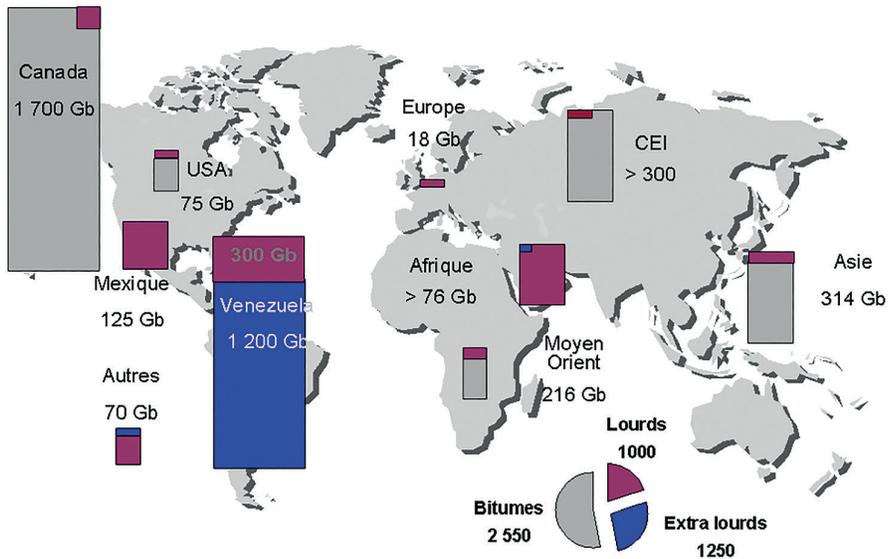


Figure 2.10: Répartition des ressources en place de pétrole brut lourd, extra-lourd et de bitume, estimées en milliards de barils (Gb). Source : D'après : [6].

2.2.6. Les enjeux environnementaux

L'utilisation du pétrole a été marquée par de très nettes évolutions liées aux enjeux environnementaux. Outre la suppression du plomb dans les essences, un des plus anciens challenges environnementaux a été la réduction de la teneur en soufre des produits pétroliers, considérée comme responsable des pluies acides (Fig. 2.11). La notion du temps est importante dans la mise en œuvre des politiques de protection de l'environnement. Le protocole des Nations Unies sur la réduction des émissions de soufre date de 1979. La dernière phase avec mise en place des spécifications des fiouls utilisés par les navires n'a eu lieu qu'en 2020 [7].

Les produits pétroliers sont au milieu de nombreux enjeux environnementaux, que ce soit en termes de recyclage des plastiques ou bien de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il faut avoir en tête que c'est un facteur de l'ordre de 3 qui relie les consommations de carburant et les émissions de CO₂ qui proviennent de leur usage (Fig. 2.11). Autrement dit, la combustion d'une tonne de carburant produit environ trois tonnes de gaz carbonique dans l'atmosphère.

Produit pétrolier	Masse de CO ₂ émis par kg de carburant
Essence	3,066 kg
Diesel	3,150 kg
Fioul lourd	3,276 kg



Figure 2.11: Problèmes environnementaux du pétrole: émissions de CO₂ dues à la combustion des carburants (à gauche) et forêts victimes des pluies acides dues à la teneur en soufre des produits pétroliers (à droite). (Photo @istock).

2.2.7. Conclusion

En résumé, le pétrole fournit des produits qui sont utilisés dans de nombreux domaines comme les carburants ou les combustibles ou dans des usages non énergétiques. Les chocs pétroliers et la montée des enjeux environnementaux ont poussé à leur trouver des substituts.

C'est le secteur des transports qui reste très largement dépendant des carburants issus du pétrole et qui correspond à la plus grande part du pétrole consommé dans le monde. C'est donc dans ce secteur qu'il faut envisager des substitutions.

L'épuisement des ressources conventionnelles est contrebalancé par la découverte de ressources non conventionnelles. Si les réserves globales ne peuvent que s'amenuiser au fur et à mesure de l'extraction du pétrole, les questions environnementales se posent de manière plus pressante, que ce soit au niveau de sa production que de son utilisation.

2.3. Pollution atmosphérique – J.-E. Petit et S. Szopa

2.3.1. Les enjeux liés à la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique est une altération de la qualité de l'air dont les enjeux ont d'abord été perçus à l'échelle des villes avec des événements aux conséquences immédiates et dramatiques. Ce fut notamment le cas du [smog](#) de Los Angeles dans les années 1950 ou de l'hiver 1952 à Londres, qui a vu plus de 4 000 morts en une semaine en raison d'un épais brouillard acide. Ce n'est qu'un peu plus tard que l'on a pris conscience du caractère continental, voire intercontinental, de la pollution atmosphérique, en particulier avec les pluies acides. Cette pollution est liée à des composés présents en très petites quantités dans l'air, de l'ordre d'une molécule sur un million ou un milliard, mais toxiques pour les humains et/ou les [écosystèmes](#).

Les polluants atmosphériques présentent, en effet, des dangers pour notre santé. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) lui attribue 4 millions de morts prématurées dans le monde chaque année, avec une très grande partie de ces décès dans les pays en voie de développement. En France, on estime qu'environ 50 000 décès prématurés par an sont liés à ce type de pollution²³.

La surveillance de la qualité de l'air en France est confiée à des associations régionales, indépendantes et agréées (ASQA). Ces ASQA ont l'obligation réglementaire de publier annuellement le bilan annuel de la qualité de l'air et de le mettre à disposition du grand public. Pour ce faire, les ASQA gèrent un réseau de stations de mesure fixes réparties sur leur territoire, des camions de mesures mobiles pour des campagnes spécifiques et des [modèles de chimie-transport](#). En Île-de-France, Airparif est chargé de cette surveillance²⁴. Airparif publie en temps réel les cartographies des principaux polluants atmosphériques que nous présenterons dans le paragraphe suivant 2.3.2. La qualité de l'air est considérée comme acceptable dès lors que les concentrations de polluants ne dépassent pas des valeurs critiques, exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et fixées par des normes européennes. Airparif est également tenu à réaliser des cartographies annuelles pour l'ozone, le dioxyde d'azote et les microparticules en estimant la superficie et la population résidente concernées par un dépassement des valeurs réglementaires²⁴.

2.3.2. Les polluants atmosphériques et leurs sources

Certaines pollutions sporadiques liées, par exemple, à des accidents industriels peuvent relarguer dans l'[atmosphère](#) de grandes quantités de composés très spécifiques et présenter transitoirement des risques importants pour notre santé selon la nature des composés émis. Cela étant, sur la durée, ces pollutions restent extrêmement marginales en termes de bilan des masses de composés émis et des impacts sanitaires globaux. Majoritairement, la pollution de l'air résulte des activités impliquant de la combustion (véhicules, usines thermiques ou feux de [biomasse](#)), de certains processus industriels et notamment avec usage de solvants, et des activités agricoles. Toutes ces activités conduisent à l'émission de gaz tels le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (acronyme : COV), les oxydes d'azote (NOx), l'ammoniac (NH_3), le dioxyde de soufre (SO_2), les composés aromatiques polycycliques, etc. ou de particules en suspension – les aérosols – comme par exemple les particules de suie. On caractérise souvent particules et aérosols par leurs tailles; les abréviations [PM10](#), [PM2,5](#) correspondent, par exemple, à des tailles de particules inférieures à 10 et 2,5 μm , respectivement. La [figure 2.12](#) représente les parts respectives des secteurs d'activité dans les émissions de polluants d'origine humaine pour quatre polluants majeurs.

23. <https://agirpoulatransition.ademe.fr/particuliers/pollution-lair>

24. <https://www.airparif.asso.fr/surveiller-la-pollution/bilan-et-cartes-annuels-de-pollution>
<https://www.airparif.asso.fr/>.

Tous les polluants émis vont eux-mêmes conduire à la formation d'autres polluants (ozone, aérosols acides, etc.) par l'intermédiaire d'une chimie complexe. L'ozone (O_3) est l'exemple même de la « chimie intense » qui a lieu dans l'*atmosphère*. Sur ce point, il faut distinguer le « bon ozone », la *couche d'ozone* qui nous protège des rayonnements UV et se forme « chimiquement » dans la haute *atmosphère*, du « mauvais ozone », mauvais pour notre santé et l'environnement, qui se forme « chimiquement » dans la basse *atmosphère*, notamment par transformation chimique des oxydes d'azote et des composés organiques volatils.

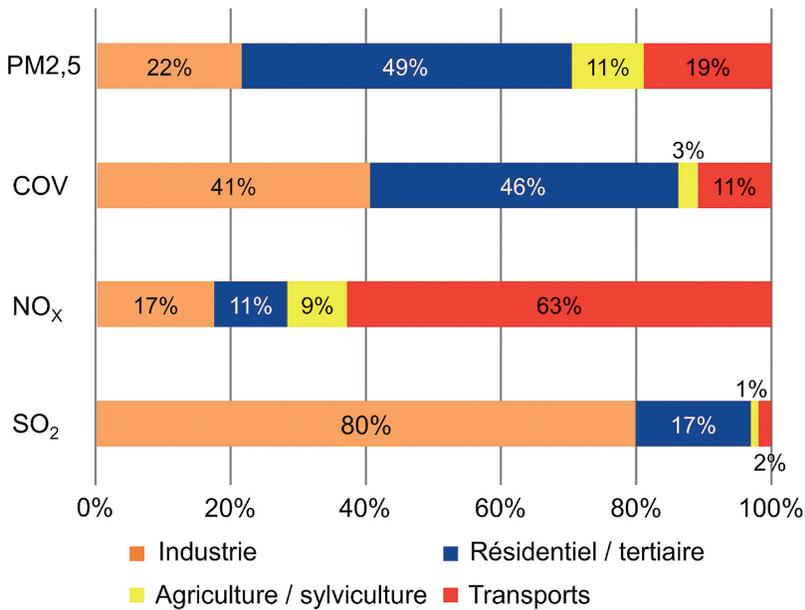


Figure 2.12 : Parts respectives des différents secteurs d'activité dans les émissions de certains des principaux polluants atmosphériques. Sources : CITEPA et Annales de Mines [8].

De manière générale, la pollution de l'air a diminué ces trente dernières années en France, mais la France reste au-delà des seuils recommandés par l'OMS, notamment pour l'ozone, les oxydes d'azote et les particules. Elle a d'ailleurs été condamnée récemment par la Commission Européenne pour ces dépassements²⁵. Cependant, la nature chimique des polluants évolue au gré des développements de nouveaux procédés industriels, d'une part, et des normes réglementaires décidées pour limiter tel ou tel polluant, d'autre part. Ainsi le dioxyde de soufre, polluant majeur des années 1970-80 à l'origine de fortes pollutions acides, a été strictement réglementé et sa concentration ainsi que celles des sulfates, qu'il produit, ont fortement baissé en Europe et aux États-Unis au cours de ces dernières décennies. La même diminution

25. <https://curia.europa.eu/juris/document/document.jsf?docid=219452&doclang=fr>

est en train de se produire en Asie. Néanmoins, l'application de normes, visant à la réduction des particules émises par les moteurs thermiques durant ces dernières années, a conduit à l'apparition d'autres formes de pollution avec des particules ultra-fines plus difficiles à détecter mais aussi plus invasives pour le système respiratoire.

En Île-de-France, le chauffage résidentiel au bois et le transport routier sont des contributeurs majeurs aux particules en suspension et aux oxydes d'azote.

Les sources **anthropiques** des polluants chroniques sont, pour beaucoup d'entre elles, les mêmes que les sources de **gaz à effet de serre** que nous aborderons dans une autre partie de cet ouvrage (voir section 7.3). Trois grands types d'activité émettent, à la fois, des polluants et des **gaz à effet de serre** :

- La production d'**énergie** par la combustion de fuel fossile, comme c'est le cas des centrales thermiques de production d'électricité, ou d'autres activités industrielles principalement sources de CO₂ qui n'est pas, à proprement parler, un polluant mais un **gaz à effet de serre** ;
- Les transports routiers, fluviaux, maritimes ou aériens ;
- L'activité agricole, source majoritaire d'ammoniac et qui émet aussi du protoxyde d'azote et du **méthane**, comme **gaz à effet de serre**.

Si ces sources font l'objet de réglementation, par exemple pour décarboner la production d'**énergie** dans le cadre de la limitation du changement climatique, cela aura donc aussi des bénéfices pour la pollution de l'air²⁶.

2.3.3. Influence des polluants sur le climat

Certains des polluants influencent le **climat** en interagissant avec la lumière du soleil, le rayonnement infrarouge terrestre et les nuages (voir section 7.2 sur le bilan radiatif par Florence Raffin et Marielle Saunois). Les interactions sont diverses, avec certains polluants qui réchauffent l'**atmosphère**, et d'autres la refroidissent. On parle alors de **forçages** radiatif respectivement positif ou négatif.

Ainsi, les aérosols ont un pouvoir refroidissant. Faut-il, pour autant, conserver les aérosols dans l'air pour lutter contre le réchauffement climatique ? On s'en doute, la réponse est non. Et même un double non. D'une part, parce que les aérosols, qui ont un effet refroidissant, sont des aérosols acides comme les sulfates, dont la toxicité pour les organismes vivants, les humains entre autres, et les **écosystèmes** est importante. Pour cette raison, ils ont été fortement régulés et leur effet de « masquage » du changement climatique s'est fortement atténué au cours de ces dernières décennies. D'autre part, parce que le **climat** ne se résume pas à l'élévation ou l'abaissement de la température et que les aérosols ont également modifié les précipitations et sont, par exemple, à l'origine de la **sécheresse** au Sahel dans les années 1980.

26. <https://www.metropolegrandparis.fr/fr/plan-climat-air-energie-132>

Il arrive néanmoins que des phénomènes naturels injectent une grande quantité de ces aérosols dans la haute [atmosphère](#), notamment lors des éruptions volcaniques, comme celle du Pinatubo dans les années 1980. Ces quantités phénoménales de matière bloquent les radiations solaires depuis la haute [atmosphère](#), comme on peut le voir sur la [figure 2.13](#). Mais cet effet ne dure généralement qu'assez peu de temps (1-2 ans). Plus récemment, les feux exceptionnels en Australie ont conduit à un refroidissement dans l'hémisphère sud, mais là encore de courte durée.

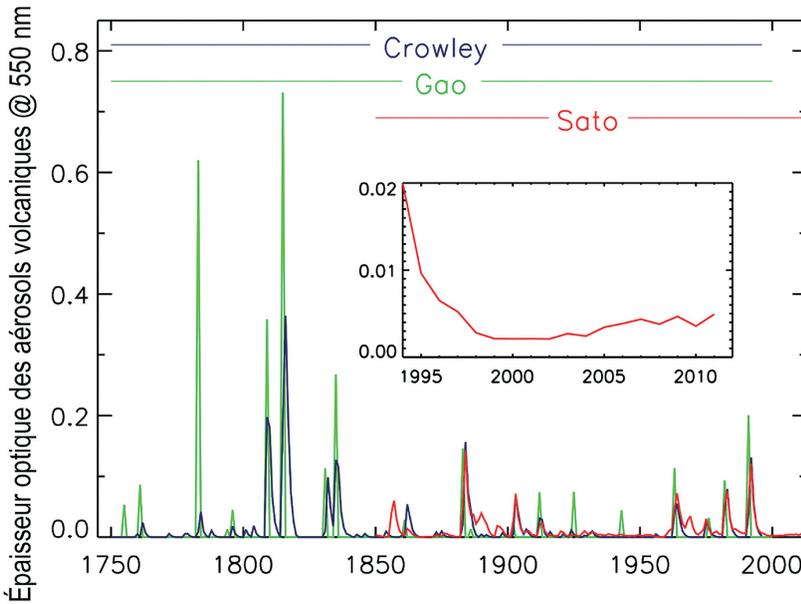


Figure 2.13: Évolution de l'épaisseur optique des aérosols volcaniques, reconstruite de 1750 à nos jours, celle-ci caractérisant l'atténuation du rayonnement solaire lors des éruptions. Les courbes en vert (Gao) et en bleu (Crowley) ont été reconstruites à partir de mesures dans des carottes glaciaires, celle en rouge (Sato) a été reconstruite à partir de données de surface et de mesures par satellite. Source : IPCC – WGI AR5 Chapter 8.

Les polluants, dont le temps de vie dans l'[atmosphère](#) est court, voient leur répartition fluctuer de manière importante dans le temps et dans l'espace. Ces changements peuvent être initiés par différents facteurs. Tout d'abord, les sources d'émission, les activités humaines notamment, sont celles qui permettent, en premier lieu, l'injection de polluants dans l'[atmosphère](#). Mais aussi les conditions météorologiques qui vont, par exemple, favoriser la formation de pollution secondaire, et donc de nouveaux composés chimiques. Indirectement, ces conditions météorologiques influencent la temporalité de certaines sources : par exemple, plus de chauffage en hiver, lorsqu'il fait froid, ou plus de trafic routier en automne, à la sortie des « beaux jours », synonyme de forte reprise des activités. Le seul levier d'action pour diminuer cette pollution se situe au niveau des sources ([Fig. 2.14](#)).

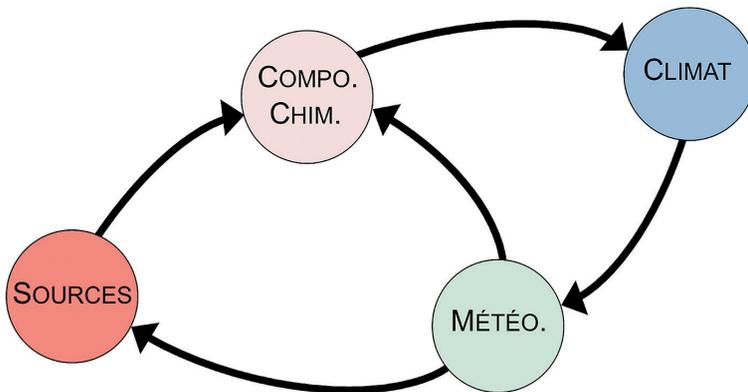


Figure 2.14 : Diagramme montrant les interactions entre les sources de pollution atmosphérique et le climat. Source : Jean-Eudes Petit.

Que peut-on retenir de l'épisode de baisse des émissions de polluants liées à la pandémie ?

Les effets d'une réduction peuvent être surprenants. Pour illustrer cela, prenons l'exemple du confinement lié à la pandémie du SARS-COV-2 de 2020. Nous avons tous observé une baisse très forte du trafic automobile dans la plupart des zones urbaines en France, mais aussi ailleurs en Europe et dans le monde. Cette baisse du trafic est directement liée à une baisse des aérosols et des concentrations d'oxydes d'azote de plusieurs dizaines de pourcents. C'est donc un bénéfice net du point de vue de la pollution. Néanmoins, la chimie de l'ozone est une chimie complexe. Les oxydes d'azote participent à la formation d'ozone, mais aussi à sa destruction dans les zones très polluées ! Dès lors, si la réduction des oxydes d'azote a entraîné une baisse de l'ozone en moyenne dans le monde, elle a pu localement induire une augmentation des concentrations en ozone. Cela illustre toute la difficulté à mettre en place des politiques pertinentes à toutes les échelles spatiales.

Pour résumer, la lutte contre la pollution de l'air est indispensable pour permettre de soustraire une grande partie de la population mondiale (90% selon l'OMS) à une qualité de l'air dégradée. Cette lutte doit être menée même si, paradoxalement, la présence de certains polluants comme les aérosols peut entraîner un bénéfice involontaire en refroidissant légèrement le **climat** et en masquant le réchauffement climatique « de fond ». Parce que souvent, les sources de CO₂ sont en même temps des sources de polluants atmosphériques, les mesures de décarbonisation s'accompagnent nécessairement de bénéfices au profit de la qualité de l'air. Cela étant, nos efforts de décarbonisation ne doivent pas nous affranchir de politiques spécifiques de lutte contre la pollution, ne serait-ce qu'en raison des effets non linéaires de la chimie atmosphérique et de la formation de polluants secondaires qui en résulte.

2.4. Pollution de l'eau – Y. Lévi

2.4.1. De quelles eaux parlons-nous ?

La pollution d'origine **anthropique** des eaux concerne malheureusement toutes les ressources car les humains ont, depuis toujours, compris que l'eau était la voie leur permettant d'évacuer leurs déchets au plus loin. Les contaminations chimiques ou biologiques touchent donc tous les types de ressources en eau. Les constructions des villages, des sites industriels et des villes se sont toujours réalisées près des eaux pour les usages d'alimentation, d'hygiène, d'**énergie**, de sécurité et de transport. Les eaux superficielles continentales (rivières, fleuves, lacs) sont donc les plus polluées mais les eaux souterraines les moins protégées le sont aussi. Les plus profondes, mieux protégées, sont en général moins contaminées mais peuvent contenir des éléments naturels indésirables pour certains usages (fer, manganèse, calcium, arsenic...). Il en va nécessairement de même pour les eaux littorales saumâtres ou marines qui récoltent ce que les fleuves déversent. Ainsi, la planète n'a jamais connu dans son histoire une **pollution chimique** d'origine **anthropique** aussi considérable et diversifiée telle qu'elle est observée depuis les années 1950.

Parler des eaux revient donc à évoquer des eaux douces superficielles, des lacs, des rivières, des fleuves, des glaciers et des eaux souterraines qui sont toutes les masses d'eau contenues dans le sol. Il en va de même avec les eaux saumâtres des estuaires et les eaux salées des mers et océans. Ces masses d'eau sont en interaction les unes avec les autres ainsi qu'avec la pollution atmosphérique et la pollution des sols. Toute pollution déversée par les activités humaines finit par arriver, à un moment ou à un autre, dans les eaux.

Deux cycles liés à l'eau sont classiquement décrits : le grand cycle naturel et le cycle des usages ou « petit » cycle.

- Le cycle naturel (ou « grand » cycle) de l'eau commence avec l'évaporation depuis les surfaces de la planète sous forme de vapeur, puis, selon les conditions atmosphériques, la vapeur se condense en précipitations (pluies, neige, grêle) qui tombent au sol. Ensuite, l'eau de pluie va lessiver les sols et être captée par la végétation. Une partie est renvoyée dans l'**atmosphère** par les plantes ce que l'on appelle l'**évapotranspiration**. Le reste diffuse dans les sols et sous-sols et le cycle se boucle par le retour de l'eau aux rivières, aux fleuves et à la mer (Fig. 2.15). La pluie peut déjà se contaminer avec la pollution atmosphérique. De nouvelles contaminations se produisent par le **lessivage** des sols, le passage sur toutes les surfaces, notamment les surfaces imperméables, les routes, les toitures, etc.

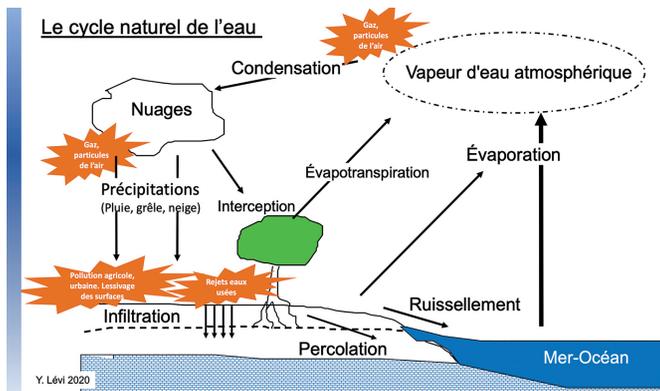


Figure 2.15: Cycle naturel de l'eau (ou « grand » cycle) et sources de contaminations. Source : Yves Lévi.

- Le cycle des usages de l'eau (« petit » cycle) (Fig. 2.16) se décrit de la manière suivante : après prélèvement dans la nature, l'eau est traitée pour fabriquer de l'eau potable (pour les pays qui en ont les moyens) qui est ensuite distribuée dans des canalisations pour alimenter les populations. Après usage, l'eau usée est collectée dans des réseaux d'assainissement (égouts) et transportée vers des stations d'assainissement où elles sont traitées avant rejet au milieu naturel. Ce schéma est extrêmement variable selon les moyens économiques disponibles. Dans la majorité des pays, il n'existe pas ou peu d'assainissement et les eaux usées se dirigent directement vers les milieux aquatiques. Tous les rejets industriels, urbains, ou agricoles partent dans l'environnement de manière ponctuelle (rejet d'égout, déversement volontaire ou accidentel, etc.) ou diffuse (déversements de pesticides dans les champs, pollution urbaine générale...). Ainsi, l'humain émet, chaque jour, des masses considérables de polluants, qui finissent, à un moment ou à un autre, par rejoindre les masses d'eaux.

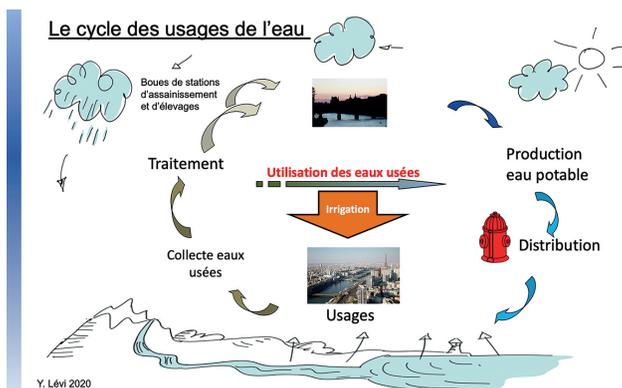


Figure 2.16: Cycle des usages de l'eau ou « petit » cycle des eaux. Source : Yves Lévi.

Globalement, pour étudier la qualité des eaux de ces deux cycles imbriqués, il faut raisonner par bassin versant (Fig. 2.17). Celui-ci constitue la surface « entonnoir » qui récupère toutes les eaux qui se dirigent pour constituer un cours d'eau (ruisseau, rivière, fleuve) et donc constitue la zone géographique à l'origine des contaminations observées.

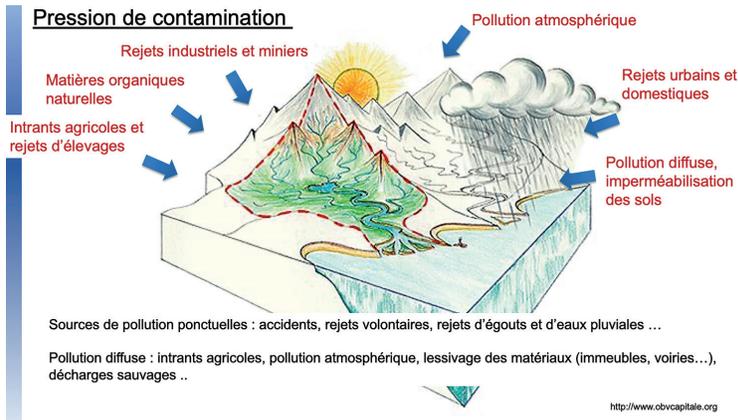


Figure 2.17 : Notion de bassin versant. D'après : Organisme des bassins versants de la Capitale (OBV - Capitale).

2.4.2. De quelle pollution parlons-nous ?

Les contaminations de l'eau peuvent être de différentes natures²⁷.

Il existe une contamination naturelle de certaines eaux souterraines par des éléments natifs provenant des sols (arsenic, fer, manganèse...). Dans certains pays comme le Bangladesh ou le Vietnam, le pompage intensif des eaux souterraines a attiré de l'arsenic naturel dans les eaux destinées aux populations. À trop pomper, les populations risquent de ne plus avoir d'alternative. Impossible de boire directement l'eau des rivières et mal gérer les eaux souterraines induit des risques si elles ne sont pas traitées.

La pollution provient en grande partie des activités humaines : industries, agriculture dont l'élevage, transports, urbanisation, imperméabilisation des sols, etc.

27. La pollution des milieux aquatiques :

- Site Service public de l'information sur l'eau Eaufrance : <https://www.eaufrance.fr/les-impacts-de-la-pollution-de-leau>
- Agence de l'eau Seine Normandie : <http://www.eau-seine-normandie.fr/les-cycles-de-l-eau>
- Portail technique de l'Office français de la biodiversité : <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/322>
- Rapport de la banque mondiale sur la pollution de l'eau : <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2019/08/20/quality-unknown>
- Association GRAIE : <http://www.graie.org/portail/>

Outre les rejets directs ou les rejets après épuration, le **lessivage** des sols par la pluie conduit à des pollutions diffuses (engrais et **pesticides**) et ponctuelles (rejets d'égouts et de déversoirs d'eaux d'orage).

Les polluants contaminants peuvent être chimiques (**pesticides**, plastifiants, hydrocarbures, solvants, résidus de médicaments, engrais, etc.), microbiologiques (déchets humains et animaux), physique (chaleur en aval des centrales de production d'électricité), radiologique (déversements tels que ceux provenant de la centrale nucléaire de Fukushima) (**Fig. 2.18**). Tous ces éléments, la plupart du temps en mélanges complexes, constituent des dangers. Les dangers induisent, selon les doses et les organismes, des effets biologiques pouvant être toxiques pour l'environnement (écotoxicité animale et végétale) et pour la santé humaine (boisson, baignade, irrigation des cultures vivrières...).

Depuis les années 1950, la diversité des produits chimiques inventés par la chimie moderne est prodigieuse. Ceux-ci ont apporté nombre de bienfaits pour l'humanité, car porteurs de progrès, mais la contrepartie est la présence de polluants chimiques partout. Outre les **pesticides** qui sont déversés volontairement, les plastifiants, les retardateurs de flamme, des hydrocarbures, des résidus de médicaments... sont trouvés partout dans l'environnement, souvent à très faible trace.

Comme décrit au paragraphe 2.2.4 ci-après, pour les détecter, il existe des méthodes analytiques, dont les progrès ont été considérables ces 20 dernières années. Il est possible de quantifier des traces de polluants chimiques inférieures au nanogramme par litre (10^{-9} g/L). Par ailleurs, sont aussi bien détectés les polluants eux-mêmes que leurs produits de dégradation, ce qui augmente le nombre de polluants connus.



Figure 2.18 : Exemples de la diversité des familles de contaminants chimiques présents dans les eaux.
 Source : Yves Levi.

2.4.3. De quels effets et de quels risques parlons-nous ?

La **pollution chimique** est rarement constituée de polluants isolés, mais il s'agit en général de mélanges de tout ce qui est déversé dans l'environnement. Face à cette diversité, il faut s'interroger sur les effets et tenter de quantifier les risques pour l'environnement et pour la santé humaine.

Parmi les effets biologiques, sont identifiés :

- des perturbations du **système endocrinien** par des polluants et mélanges de polluants qui agissent comme des hormones ou qui inhibent l'action des hormones naturelles (cancers, troubles de la croissance et de la reproduction, diabète...);
- la toxicité cellulaire dégradant le fonctionnement des cellules et pouvant conduire à leur mort, à celle des organes et donc à celle des organismes;
- la **génotoxicité** qui agit sur le patrimoine génétique et conduit à des mutations et des cancers;
- le **stress oxydant**, etc.

De nombreuses pathologies humaines sont ainsi attribuables aux eaux contaminées, sachant que l'humain est aussi exposé aux contaminants de l'air, des sols, de l'alimentation... :

- les effets à court terme (12 à 72 h), les maladies étant essentiellement liées aux microorganismes : choléra, gastro-entérites, salmonellose, légionellose (infections pulmonaires causées par la respiration de gouttelettes contaminées à proximité de tours aéro-réfrigérantes ou dans les douches), cryptosporidioses et giardiasis qui sont des diarrhées violentes dues aux **protistes** *Cryptosporidium* et *Giardia*, ...;
- les effets à moyen terme (quelques mois), les maladies pouvant être de nature microbiologique, par des contaminations chroniques, et de nature chimique;
- les effets à long terme (plusieurs années) dues à des contaminations chimiques qui peuvent induire des cancers (arsenic, chrome VI, **perturbateurs endocriniens**, ...), des troubles du développement, des baisses du quotient intellectuel...

Les effets toxiques sur la faune et la flore²⁸ sont évidemment de même ampleur. Ils concernent directement tous les organismes végétaux et animaux vivant dans les milieux aquatiques pollués ou dans des espaces qui subissent des irrigations par des eaux contaminées. Ils peuvent aussi être observés lorsque des matières organiques sont déversées dans les eaux, conduisant à une réduction de leur teneur en oxygène

28. Impacts de la pollution des eaux sur la **biodiversité** :

- Portail « eau et biodiversité » : <https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/>

et à un dérèglement écologique (**eutrophisation**). Ces effets toxiques peuvent évidemment aboutir à une mortalité directe, végétale et animale, mais ils peuvent aussi conduire indirectement à la contamination de toute la chaîne alimentaire dès lors que des **espèces** se nourrissent d'organismes aquatiques.

Certains contaminants chimiques sont **bio-accumulateurs** ce qui leur donne la propriété de remonter toute la chaîne alimentaire. Ils sont alors détectés chez des animaux vivant dans des zones extrêmement reculées de la planète, où l'industrie chimique est absente, car ils auront franchi toutes les barrières alimentaires. On a donc affaire à un risque global de **pollution chimique** pour la planète de même niveau de gravité et de globalité qu'est le changement climatique. Le concept «One Health-une santé» illustre en particulier l'interconnectivité et l'interdépendance des humains, des animaux et des **écosystèmes** en termes de santé. Il s'agit d'une bonne santé de l'environnement, des animaux et des humains, sachant que l'Humain est un animal parmi les animaux (Fig. 2.19).

Identifier les effets toxiques des produits chimiques à partir de leur structure est un premier préalable pour évaluer le niveau de risque d'une pollution des eaux due à ces produits. La deuxième étape est de quantifier les niveaux de toxicité des produits par des analyses et mesures sur des cellules ou des animaux (essais *in vitro* et *in vivo*). L'étape complémentaire est de déterminer les quantités de produits présentes dans les milieux aquatiques ou dans l'eau potable ainsi que le niveau d'exposition des organismes susceptibles d'être contaminés. C'est l'ensemble des données effet – dose – exposition, qui permettra de calculer plus précisément le risque pour prendre les mesures de gestion adéquates visant à améliorer la qualité de l'eau et de l'environnement. Le risque est une probabilité qu'arrive un effet biologique à la suite d'une exposition à un ou plusieurs danger(s) (microorganismes, molécules, métaux, rayonnements...).

Globalité des expositions et des effets : One health – Une santé

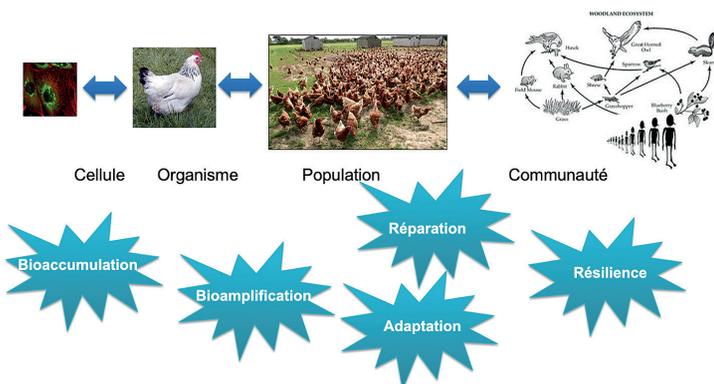


Figure 2.19: Illustration d'un volet du concept «one health-une santé» dans le continuum des relations entre santé animale et santé humaine et exemples de facteurs induisant des aggravations ou des améliorations de la situation sanitaire. Source: Yves Levi.

2.4.4. Savons-nous analyser ces contaminations ?

Les méthodes en chimie analytique ont fait des progrès considérables et le couplage des **chromatographies** en phase gazeuse ou liquide avec la **spectrométrie de masse** permet de doser des traces infimes de molécules même dans des matrices aussi chargées en matières organiques que sont les eaux d'égout. C'est pourquoi, la diversité incroyable de la **pollution chimique** est bien révélée, mais encore faut-il pouvoir l'interpréter en termes de risques toxiques biologiques.

En microbiologie, les analyses bactériologiques se font soit selon des méthodes de culture sur milieux nutritifs (*in vitro*) soit par biologie moléculaire. La première a l'avantage de permettre de dénombrer des bactéries réellement viables alors que la seconde détecte aussi des bactéries mortes mais dont le génome est encore présent. Pour les virus ou les **protistes**, les méthodes de culture sont plus longues et difficiles et parfois impossibles.

Pour les effets biologiques globaux, des essais sont menés *in vitro* sur des cellules, des bactéries ou des embryons ou *in vivo* sur divers types d'animaux allant des crustacés aux souris. L'avantage des essais biologiques est de donner une réponse concernant les effets toxiques liés aux mélanges réels tels que présents dans les eaux à analyser.

2.4.5. Comment sont traitées les eaux d'égout avant de les rejeter dans le milieu naturel ?

Dans la majorité des pays, les eaux usées urbaines ou industrielles sont directement rejetées dans les rivières ou la mer sans aucun traitement. Même dans les pays équipés, il existe des déversoirs d'orages qui évitent que les eaux d'orage se dirigent vers la station d'assainissement et nuisent à son efficacité, elles sont alors rejetées sans traitement dans la nature.

Très succinctement, dans les pays où il existe des réseaux d'égouts reliés à une station d'assainissement, les eaux usées sont d'abord collectées, puis amenées à la station d'assainissement (Fig. 2.20)²⁹. Les eaux brutes sont alors passées sur des grilles pour retenir les solides de taille significative. L'eau est ensuite débarrassée de son sable par simple **décantation gravitaire** au fond d'une fosse, puis les huiles et

29. Assainissement des eaux usées :

- Ministère en charge de l'environnement :
<http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/>
<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/assainissement>
- L'assainissement des eaux usées vue par le Centre d'information sur l'eau (Organisation privée)
<https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/assainissement-eau-usees/>
- Les grandes usines d'assainissement des eaux usées en Île-de-France : Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne :
<https://www.siaap.fr/equipements/les-usines/>

graisses sont remontées en surface par injection de fines bulles d'air et éliminées. L'eau ainsi traitée passe ensuite dans un premier ouvrage de décantation (un décanteur) qui va laisser sédimenter les particules. Celles-ci vont former une première boue qui sera ensuite traitée.

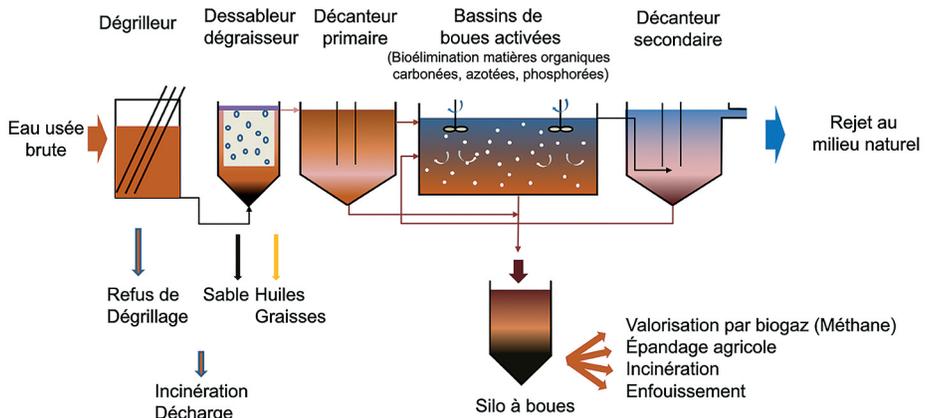


Figure 2.20: Filière-type de traitement des eaux usées dans les stations d'assainissement et de traitement des boues. Source : Yves Levi.

Une fois éclaircie, l'eau passe dans des bassins de boue activée avec une forte concentration de bactéries qui vont consommer les matières organiques biodégradables (élimination du carbone). Certaines usines sont équipées de bassins capables d'éliminer les matières azotées et phosphorées. Après cette (ou ces) étape(s), l'eau repasse par un décanteur qui va récupérer les boues bactériennes et l'eau peut être rejetée dans le milieu récepteur en ayant perdu au moins 90% de sa charge en contaminants chimiques et microbiologiques. Toutefois, certains contaminants peuvent ne pas être suffisamment éliminés.

Les boues produites sont ensuite déshydratées puis, si elles ne sont pas trop contaminées, elles sont épandues dans des champs comme engrais agricoles. Cependant, la diversité des polluants est devenue telle que certains pays, comme l'Allemagne, envisagent d'interdire totalement l'usage de ces boues. De même, en raison de la présence de nombreux polluants résiduels dans les eaux traitées, la Suisse a récemment décidé d'ajouter, après les traitements « classiques », une étape d'oxydation par le gaz ozone, qui casse certaines molécules, et un passage sur du charbon actif qui fixe les micropolluants. Il s'agit d'une purification onéreuse et très complète, mais très protectrice pour les milieux aquatiques. Notons aussi que dans les zones « fragiles », par exemple, à proximité de parcs à huîtres, des procédés de désinfection sont mis en œuvre pour ne pas contaminer l'environnement et les produits destinés à l'alimentation.

2.4.6. Existe-t-il une réglementation ?

En Europe une directive cadre impose aux États membres une politique conduisant au bon état chimique et biologique des eaux et chaque pays doit faire des investissements pour tenter de redonner aux eaux continentales une meilleure qualité. Les grands pays économiquement développés ont bâti des politiques visant à restaurer et protéger la qualité des ressources, mais les intérêts économiques influencent largement leurs mises en œuvre. Par exemple, la pollution des ressources en eau par les nitrates d'origine agricole est un problème qui dure en France depuis plus de 30 ans sans véritable réduction. La pollution par les **pesticides** partout dans le monde est une constante.

Toutefois, une grande partie des nations du monde polluent les eaux sans véritables contraintes et sans moyens pour investir dans l'assainissement.

2.4.7. Conclusion

La chimie moderne a apporté d'immenses bienfaits pour l'humanité, mais aussi largement pollué l'environnement. Les eaux sont malheureusement le réceptacle final de toutes nos pollutions et nombre de ces molécules se dégradent très peu dans l'environnement et contaminent les eaux potables, les aliments irrigués. Il s'agit d'un problème global, car les transferts de polluants se font à travers les continents et au sein des mers et océans. La chaîne alimentaire contribue à contaminer des animaux vivant dans des zones très protégées par les polluants organiques persistants (POPs). La planète n'a ainsi jamais connu une telle diversité de pollution dont les effets toxiques impactent les organismes vivants.

Parallèlement, la pollution microbiologique est toujours significative par les rejets humains et animaux et nécessite des désinfections.

Pour améliorer la situation, il faut réduire les déversements de polluants vers les eaux continentales et marines et cela ne se fait que par la réduction des rejets, la réglementation pour interdire la vente de produits les plus à risque, la collecte et le traitement efficace des eaux usées et une bonne gestion des boues des stations d'assainissement. Cela doit s'accompagner d'une surveillance des rejets avec les pénalités pour les pollueurs. Plus largement, les sociétés doivent en concertation et de manière globale, ce qui est encore loin d'être le cas, mettre en œuvre une politique de **développement durable** qui intègre la réduction des usages des molécules et produits les plus polluants.

La situation de la **pollution chimique** des eaux est grave en raison des nombreux effets biologiques induits par les mélanges complexes, même aux très faibles concentrations, et doit être considérée comme une pression globale sur le vivant aussi importante et globalisée que celle liée au changement climatique. C'est un investissement global d'importance qui est à réaliser sur l'ensemble de la planète afin de protéger nos ressources en eau.

2.5. Occupation et pollution des sols – J.Ch. Bureau

Nous proposons de présenter brièvement les différents types d'occupation des sols sur notre planète en montrant, à partir de quelques exemples, les problèmes d'artificialisation, de dégradation et de pollution auxquels ces sols peuvent être soumis.

2.5.1. Diversité des sols

Les surfaces terrestres couvrent 13 milliards d'hectares, un hectare (ha) représentant un carré de 100m x 100m, soit 10 000 m². À titre de comparaison un terrain de football de Ligue 1 occupe environ 0,7 ha. Environ 13% sont utilisés pour les cultures, 28% pour la forêt et 35% sont constitués de pâtures et de savanes. Malgré de fortes disparités entre les pays, les pays les plus pauvres sont globalement dotés de 22% de la surface terrestre pour 38% de la population, alors que les pays les plus riches ont environ 25% des surfaces pour 15% de la population [9].

En Europe de l'ouest et centrale, les forêts, les pâturages et les terres arables représentent des proportions équivalentes des terres, soit un peu plus de 30% chacune, mais il faut souligner la part croissante des terres artificialisées, qui représentent désormais environ 4% des surfaces au niveau mondial.

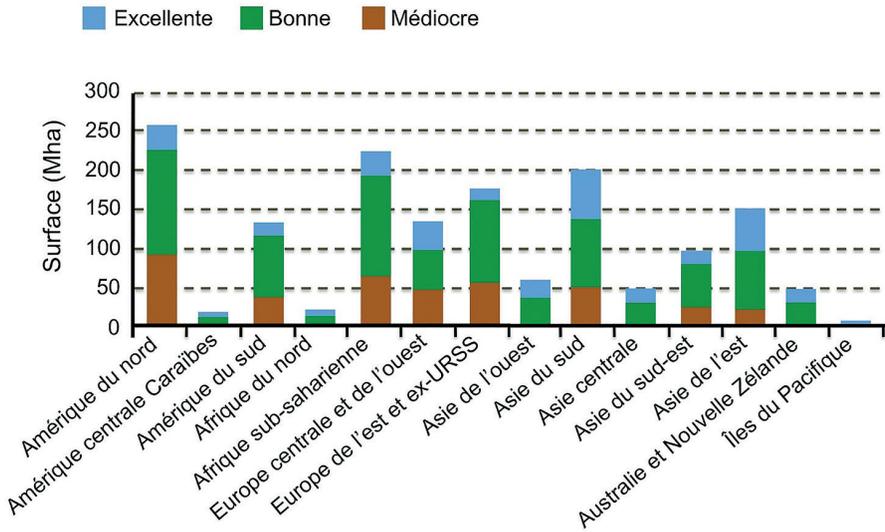
En France, cette part atteint 9,5% et progresse rapidement; l'accroissement est de 13% sur la dernière décennie, alors que la population n'a crû que de 5%. Cet accroissement résulte principalement de l'extension des infrastructures de transport et de la construction immobilière. Sur une période de 10 ans et à l'échelle de la France métropolitaine, les surfaces nouvellement artificialisées sont évaluées en moyenne à 137 000 ha, soit plus que la superficie d'un département comme le Val-d'Oise³⁰. Cette artificialisation se fait essentiellement au détriment de terres agricoles, et le potentiel de production pourrait être affecté significativement si ce rythme ne diminuait pas. D'autre part, l'artificialisation des sols se traduit à la fois par une imperméabilisation des surfaces, qui accroît les dégâts des crues, par une baisse de la biodiversité qui souffre terriblement de la construction pavillonnaire et de la multiplication des infrastructures (routes, lignes TGV, etc.) et par la formation de microclimats (îlots de chaleur) tout en limitant la capacité globale des sols à stocker du carbone.

2.5.2. Les surfaces agricoles et forestières

Concernant les surfaces agricoles, leur mesure est très sensible à la définition puisqu'il y a un gradient entre terres peu productives et déserts. La FAO (Organisations des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation) a une définition qui lui est propre, en termes de capacité de production d'un panier de biens, et classe de

30. Voir l'atlas régional de l'occupation des sols en France. Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer (2016). <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-01/datalab-2-atlas-regional-de-l'occupation-des-sols-en-france%20%28cl%29-octobre2016.pdf>

plus les terres en fonction de leur qualité. On voit sur le graphique de la figure 2.21 que la surface de terres agricoles productives est élevée en Amérique du Nord et en Europe, pays de l'ex-URSS inclus. La carte de la figure 2.21 illustre la diversité des systèmes de production agricole dans le monde.



- Terres arables ; Systèmes méditerranéens ; Plantations ; Systèmes périurbains ; Grands périmètres irrigués
- Forêts ; Savanes ; Prairies ; Déserts ; Montagnes ; Milieux arctiques ; Grands biomes humides

Figure 2.21: En haut: graphique montrant la qualité des sols dans le monde. En bas: carte des systèmes agricoles. Source: Creative commons, <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/a-la-une/carte-a-la-une/systemes-agricoles-monde>.

Au niveau mondial, durant les 50 dernières années, la superficie cultivée nette a augmenté de 12 %, principalement au détriment des forêts, des zones humides et des prairies. Les savanes arborées et les forêts tropicales sont les principales sources de nouvelles terres agricoles et disparaissent rapidement, en particulier, les forêts primaires. D'ici 2050, en raison de la pression démographique, du changement de régime alimentaire et de la demande de biocarburant, la demande de nouvelles terres agricoles devrait augmenter d'environ 50 % [10]. Il est très probable que les forêts tropicales seront la principale zone d'expansion et qu'une nouvelle déforestation est à prévoir sur des sols propices à une **érosion**. Ces estimations sont néanmoins dépendantes de l'intensification de l'agriculture à venir, ainsi que du commerce mondial. Les mécanismes sont complexes puisque l'on peut imaginer, par exemple, que la protection de certains **écosystèmes** à un endroit donné pousse à des importations qui occasionnent une dégradation ailleurs sur la planète [11].

Parmi les facteurs qui déterminent le potentiel agricole et forestier d'un sol, la capacité à retenir les nutriments est importante. Dans les sols des régions de forêts tropicales, en particulier dans de nombreux pays d'Afrique subsaharienne, au Brésil, en Australie ou dans les pays nordiques d'Europe, c'est la principale contrainte à la production agricole. En exportant des nutriments, l'exploitation de ces sols par une production agricole ou forestière les appauvrit rapidement. Ainsi, la transformation d'une forêt tropicale en plantations agricoles épuise souvent rapidement la matière organique. La faible profondeur des sols est une autre contrainte forte pour l'agriculture, par exemple sur le pourtour méditerranéen, par opposition aux très profondes terres noires d'Ukraine ou certains sols de plaines en Amérique centrale. La mauvaise capacité de drainage au nord de la Russie et de l'Europe centrale, par exemple, et les forts dénivelés en Asie du sud-est et dans les pays andins sont également des contraintes.

Les sols sont sujets à de nombreuses agressions **anthropiques**. La **salinité** croissante au sud des États-Unis, au Moyen-Orient, au Bangladesh ou sur les pourtours de l'Australie, est surtout provoquée par l'irrigation qui vide les nappes phréatiques et y fait entrer des eaux salines. Dans le pourtour méditerranéen, en Espagne par exemple, des terres devenues plus salées deviennent impropres à la culture. Plus généralement, dans les terres exploitées par une **agriculture intensive**, la diminution de la teneur en matière organique carbonée est un phénomène mondial, qui fait que le sol en perd sa fertilité et que sa structure et sa porosité se modifient. Il retient moins bien l'eau et perd sa capacité à filtrer et à recycler les effluents et les polluants et devient plus sensible à l'**érosion**.

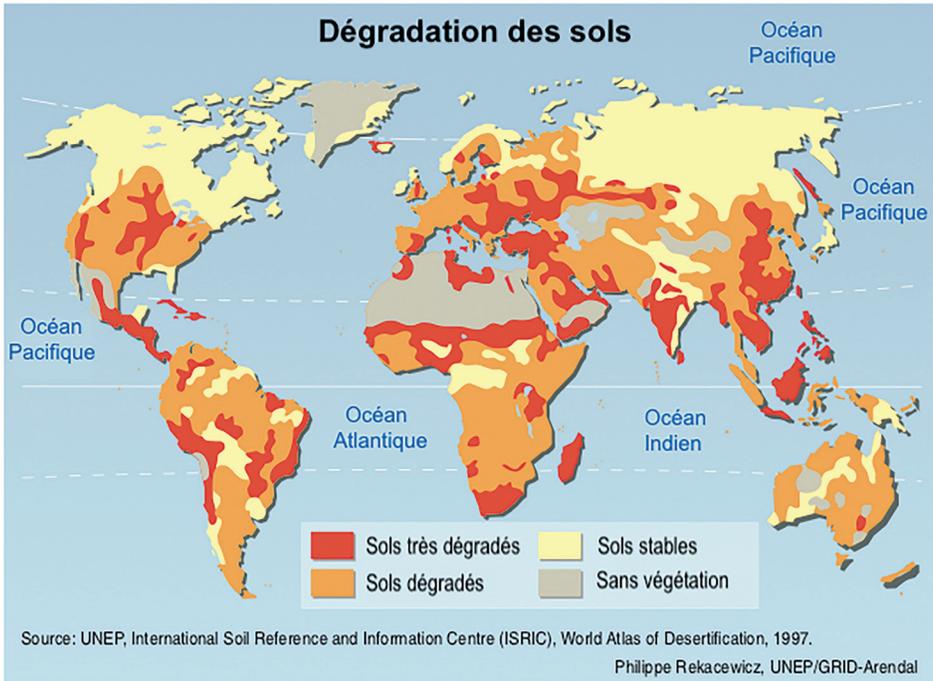


Figure 2.22 : Dégradation des sols dans le monde. Source : United Nations Environmental Programme – GRID.

2.5.3. L'érosion des sols

L'**érosion** est une menace majeure. La FAO estime que près du quart des sols agricoles dans le monde est hautement dégradé (Fig. 2.22) et que cela constitue une menace majeure pour la sécurité alimentaire, en particulier dans les pays sous forte pression **anthropique**. Ainsi, l'Inde représente 18% de la population mondiale alors qu'elle ne dispose que de seulement 2% des terres agricoles. Des estimations portent à près de 80% la surface des terres agricoles mondiales touchées par une **érosion** modérée ou sévère [12]. En France, une étude de l'INRAE montre que de l'ordre de 18% des sols cultivés sont sujets à des problèmes d'**érosion**, de faibles à graves.

Les conséquences sont importantes, car des sols érodés sont moins productifs. Des pertes de **rendement** dues à l'**érosion** de l'ordre de 20% à 40% ont été mesurées aux États-Unis. De plus, les sols érodés ont une plus faible capacité de rétention d'eau et précipitent des coulées de boue et favorisent les inondations. L'**érosion** des sols limite aussi la capacité de l'agriculture à s'adapter au changement climatique et réduit fortement la **biodiversité** qu'ils contiennent. Or, ces sols ne se régénèrent que très lentement, sur une échelle de plusieurs siècles, voire millénaires.

Les causes de l'**érosion** des sols varient selon les régions et n'appellent pas à une seule réponse. Dans certaines régions, elle est liée à un pâturage trop intensif par rapport à la capacité de régénération des milieux (pourtour méditerranéen). Les pratiques culturales comme le labour, la monoculture, et plus généralement l'exportation de nutriments par les cultures dans des sols peu profonds appauvrissent et érodent les sols de nombreux pays. Dans d'autres pays, c'est l'**érosion** éolienne, causée par le vent, qui est en cause, en particulier dans les régions de grandes plaines cultivées d'Amérique du Nord. L'**érosion** par l'eau peut être aussi une source de fuite des sols, comme en témoignent les rivières chargées de particules. La France n'y échappe pas. On observe notamment des coulées de boue et du **ravinage** même dans des régions de plaines comme le Bassin parisien, le Nord et la Normandie. Au niveau mondial, la destruction des couvertures végétales de type forêts ou savanes est souvent en cause dans l'**érosion** par l'eau.

2.5.4. La pollution des sols

La pollution des sols est très variable selon les pays, et souvent en relation avec la pollution de l'eau. Ainsi au Bangladesh, la gigantesque pollution à l'arsenic, des puits, des eaux de surfaces et des nappes phréatiques, mais aussi des sols, a pour origine la remontée de cet élément présent naturellement dans une roche souterraine, par les puits et forages (voir section 2.4.2). Cette pollution met en péril direct la vie de 30 millions d'habitants. La pollution au Radon, un gaz radioactif qui touche de nombreuses régions, y compris en France, a également une origine fossile. Diverses pollutions des sols, en particulier par certains **métaux lourds**, ont pour origine l'activité volcanique, même si elle est relativement distante.

Néanmoins, les graves pollutions des sols ont majoritairement une origine **anthropique** [13]. Sont notamment en cause des activités industrielles qui engendrent des pollutions aux **métaux lourds**, aux solvants ou aux effluents toxiques. Y contribue aussi le traitement, ou plutôt, l'absence de traitement des déchets, qui entraîne des pollutions par des matières organiques (lisiers, déjections humaines, eaux sales) ou par des éléments toxiques et radioactifs. Les activités d'extraction, de minerai et de pétrole, ne sont pas en reste, non plus, avec des pollutions qui se diffusent par l'eau et par l'air.

Parmi les pollutions d'origine agricole, les pollutions chimiques liées aux **produits phytosanitaires** peuvent être, dans certains cas, tenaces et difficilement réversibles. La pollution des sols à la **chlordécone** dans les Antilles en est un exemple emblématique. La **chlordécone** est un insecticide organochloré qui a été utilisé de 1971 à 1993 pour lutter contre le charançon du bananier et qui a entraîné une pollution généralisée des sols, des cultures, des eaux et des **écosystèmes** à l'exception de zones montagneuses où les plantations de banane n'étaient pas possibles. Or, la **chlordécone** est une molécule très stable et très persistante, et l'on estime que la pollution restera présente pour quelques 600 ans. La substance est cancérogène et l'on trouve des taux de cancer, en particulier de la prostate, significativement plus élevés

que la moyenne nationale dans les Antilles françaises. Selon les résultats d'une étude de l'agence Santé publique France « plus de 90 % de la population adulte » en Guadeloupe et Martinique est contaminée par la **chlordécone**³¹.

L'épandage d'engrais et de fumiers est aussi une source de **métaux lourds** très toxiques comme le cadmium ou le plomb qui s'accumulent dans les sols. Bien que l'on ne dispose que d'une information limitée, un récent rapport de la FAO montre l'ampleur du problème : en Australie, près de 80 000 sites auraient leurs sols contaminés; en Chine, 19% des sols agricoles sont pollués. Environ 3 millions de sites seraient potentiellement pollués en Europe...

2.6. Échanges de carbone dans les sols – Ch. Hatté

Pour bien appréhender la nécessité de protéger les sols vis-à-vis des phénomènes de dégradation et de pollution, il nous faut revenir sur l'importance des sols dans le cycle du carbone global et sur la capacité des sols à jouer un rôle d'atténuation dans le réchauffement climatique.

2.6.1. Cycle du carbone et activités humaines

Indiquons d'abord quelques ordres de grandeur (Fig. 2.23). Aujourd'hui, nous émettons environ dix milliards de tonnes (gigatonnes, Gt) de carbone par an par nos activités consommatrices d'**énergie fossile**. Sur ces dix gigatonnes, environ 4,5 gigatonnes s'accumulent dans l'**atmosphère** sous forme de CO₂, correspondant à une augmentation de deux parties par million en volume (ppmv) de la concentration en CO₂.

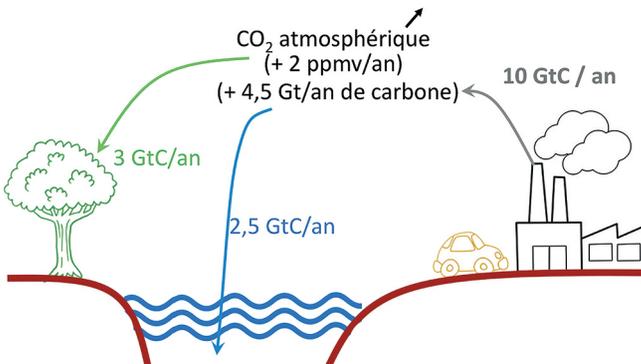


Figure 2.23 : Répartition dans l'**atmosphère**, les océans et la **biosphère** du carbone émis par les activités humaines. Crédit : Christine Hatté.

31. Voir : <https://www.youtube.com/watch?v=N8fTQH1qV8A>.

Bien que la **chlordécone** ne soit plus utilisée, la population antillaise reste exposée. La molécule contamine particulièrement les légumes-racines (patates douces, carottes, ignames, etc.) en remontant dans la plante. Le **lessivage** des sols par la pluie conduit, par ailleurs, à suspecter la plupart des productions y compris les productions animales. Des mesures ont été prises pour réparer les préjudices économiques, notamment pour la pêche et l'agriculture. La pêche reste notamment interdite sur plusieurs zones.

Entre les 10 Gt émises et les 4,5 Gt accumulées, l'écart est de 5,5 Gt. Ce sont ainsi 5,5 gigatonnes de carbone, qui quittent, chaque année, l'**atmosphère** pour être captées dans ce qu'on appelle des **puits de carbone** et se répartir entre l'océan et la **biosphère**. Environ 2,5 Gt sont absorbées par l'océan, et 3 Gt sont utilisées par la **biosphère**. Le flux de carbone depuis l'**atmosphère** vers l'océan résulte de processus physico-chimiques et d'un déséquilibre entre la concentration de CO_2 dans l'**atmosphère** et la quantité de carbone dans l'océan. Il y a davantage de carbone dans l'**atmosphère** que dans l'océan de surface si bien qu'un flux depuis l'**atmosphère** vers l'océan est possible et se produit de façon à équilibrer les deux réservoirs. Dans la **biosphère**, c'est la biologie qui est à l'œuvre avec le processus de **photosynthèse**. Ce processus, qui permet la croissance des plantes et de la végétation en général, se traduit par un prélèvement du CO_2 atmosphérique. En retour, les plantes injectent du carbone dans les sols où il peut être stocké en grande quantité et pour longtemps.

2.6.2. Stockage du carbone dans les sols

Le carbone arrive dans les sols selon différentes voies. Ce qui est le plus connu c'est l'apport de carbone au sol par la litière qui se forme par la chute des feuilles et des écorces d'arbres (Fig. 2.24). Les feuilles sont décomposées par la faune du sol, les bactéries, les champignons, les vers de terre, etc. pour se retrouver dans le sol en tant que molécules élémentaires telles que des acides aminés, des sucres, des lipides qui vont eux-mêmes servir de nourriture de base aux microorganismes des sols. Mais cette contribution aérienne au carbone du sol n'est pas la seule. La contribution par les racines est très importante et d'ailleurs, souvent plus importante que celle de la litière. Du vivant des plantes, les racines exsudent, c'est-à-dire sécrètent des molécules, notamment des sucres qui alimentent les stocks de carbone du sol.

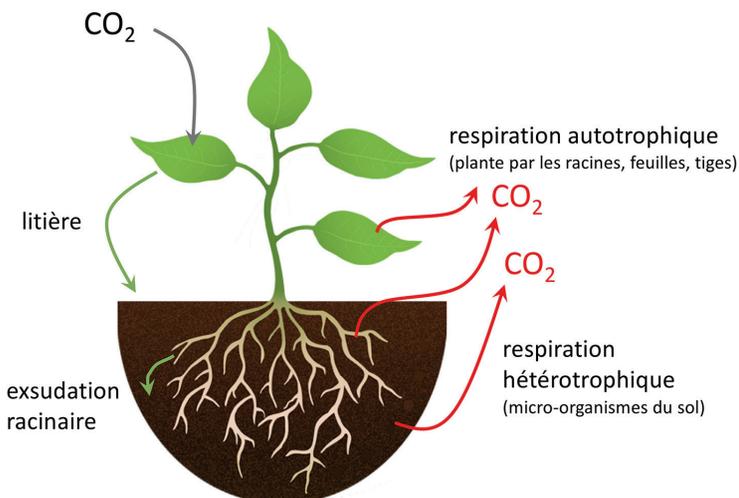


Figure 2.24 : Piégeage du CO_2 dans le sol et phénomènes de respiration. Source : Christine Hatté.

Un stock, c'est un équilibre entre des entrées et des sorties. Nous venons de décrire les modalités d'apport du carbone dans le sol : par au-dessus, par la litière et par en dessous, par les racines. Les pertes de carbone, quant à elles, résultent essentiellement de l'activité microbologique du sol. On peut aussi mentionner les pertes latérales par **érosion** et les pertes verticales par **illuviation** sous forme de matière organique dissoute, mais leur contribution respective est très variable d'un sol à l'autre. La respiration des microorganismes du sol, que l'on appelle la **respiration hétérotrophique**, produit du gaz carbonique. Afin de former leurs organes constitutifs, les microorganismes doivent assimiler des molécules élémentaires pour leur métabolisme, et la consommation de ces molécules pour en utiliser l'**énergie** se traduit par un «relargage» de CO_2 .

La respiration des plantes par leurs racines, respiration dite autotrophique, qui complète, pour la plante, la respiration des feuilles et des tiges, s'ajoute à cette respiration du sol. C'est cette fois le même organisme, la plante, qui capte du CO_2 de l'**atmosphère** par **photosynthèse** et relargue du CO_2 par respiration. Les algues présentes dans les sols en font de même. On a donc deux sources de CO_2 émises par les sols : la **respiration hétérotrophique** des microorganismes et la **respiration autotrophique** des plantes. La résultante entre les entrées et les sorties de carbone nous donne ainsi accès au stock de carbone.

La répartition du carbone dans les sols n'est pas homogène (Fig. 2.25). Il y a davantage de carbone en surface qu'en profondeur, mais les chiffres qui définissent les stocks sont encore mal connus. On estime à environ 700 Gt le stock de carbone organique dans les premiers 30 cm, à 800 Gt celui des 70 cm qui suivent pour arriver à 1 500 Gt dans le premier mètre de profondeur. On évalue à environ 2 400 Gt le stock de carbone organique, si on considère les deux premiers mètres, mais tous les sols n'ont pas deux mètres de profondeur. Certains sols sont très peu profonds, quelques centimètres, quelques dizaines de centimètres. C'est, par exemple, le cas sur le pourtour de la Méditerranée.

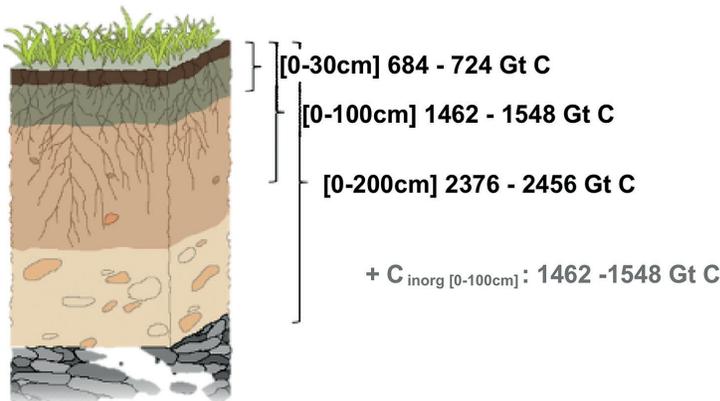


Figure 2.25: Répartition du carbone dans les sols suivant la profondeur. D'après [14].



Figure 2.26 : Initiative des 4 % lancée lors de la COP21 à Paris en 2015 (source : IRD)

Prenons néanmoins comme hypothèse l'estimation globale de 2400 Gt de carbone dans les sols. Cette valeur représente plus de deux fois ce que l'**atmosphère** contient comme carbone. Si on la compare maintenant aux 10 Gt de carbone émis annuellement par nos activités **anthropiques** sous forme de CO_2 , on réalise que ces émissions annuelles ne représentent que 0,4 % (ou encore 4 ‰) du carbone stocké dans les sols. Ainsi, si on était capable d'augmenter de 4 ‰ par an le stock de carbone des sols, on pourrait alors compenser totalement les émissions de CO_2 d'origine **anthropique**. Ce calcul simple, énoncé dès 1999 par Jérôme Balesdent à l'Académie de l'Agriculture [15] a été à l'origine de l'initiative internationale des 4 ‰, lancée par la France au moment de la COP21 à Paris : « les sols pour la sécurité alimentaire et pour le climat » (Fig. 2.26).

2.6.3. Comment augmenter le stockage du carbone dans les sols ?

Stocker plus de carbone dans les sols, a un double avantage. D'une part, on obtient des sols plus fertiles grâce à un meilleur stockage de l'eau et un meilleur apport d'éléments nutritifs aux plantes. D'autre part, on déplace les équilibres dans le cycle du carbone en limitant l'accumulation de CO_2 dans l'**atmosphère** et en le stockant dans les sols.

Les sols constituent, de fait, le seul « grand » réservoir de carbone sur lequel on peut agir pour limiter l'accumulation du CO_2 atmosphérique et atténuer le réchauffement climatique. En effet, on peut, par des pratiques vertueuses, jouer sur les stocks de carbone dans les sols alors qu'on ne peut pas moduler les équilibres physico-chimiques de l'océan. Bien évidemment, cela ne nous empêche pas de rechercher en parallèle des pratiques industrielles et individuelles plus économes en **énergie**.

Les stocks de carbone sont très différents selon les types de sols et l'usage que l'on en fait (Fig. 2.27). Les sols des forêts tropicales sont les plus riches en carbone. Sous nos latitudes, les forêts tempérées sont aussi les **écosystèmes** les plus riches en carbone, notamment par un stockage important en profondeur. À l'autre bout de l'échelle, les vignobles correspondent aux sols les plus pauvres. Dans les sols de culture, les stocks y sont très variables, mais souvent faibles par rapport à ce qu'aurait été le stock dans un sol situé au même endroit et en équilibre avec la végétation naturelle. Cela étant, les teneurs en carbone dépendent surtout des pratiques de culture, aussi bien actuelles que passées, car l'on paye sur des décennies ce qui a été fait pendant quelques années. On peut néanmoins revenir à une situation

acceptable des sols de culture en changeant de pratiques et en prenant les parcours agronomiques adaptés.

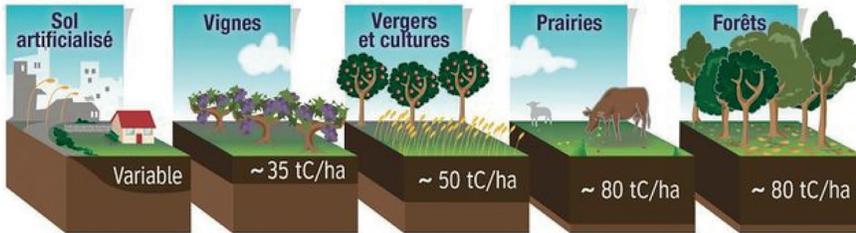


Figure 2.27 : Estimation du stock de carbone (en tonnes par hectare) dans les 30 premiers centimètres de sol pour différents types de sols. Source : ADEME Gis Sol 2013.

Les pratiques d'**agriculture intensive** mises en place ces dernières décennies ont conduit à une perte massive du carbone dans les sols. Les parties aériennes des plantes n'étaient plus rendues aux sols et les labours jusqu'à 30 cm de profondeur ont contribué à une respiration massive des sols (par oxydation) ainsi qu'à une perte de **biodiversité**. La perte de carbone s'est alors traduite par une déstructuration des sols qui sont devenus encore plus sujets à l'**érosion**. Stopper ces pratiques, favoriser le couvert permanent, limiter le labour et alterner les cultures pour plus de **biodiversité** et plus d'apport de nutriments aux sols, tout cela est propice à une réduction des pertes en carbone et donc à un stockage accru du carbone dans les sols.

Les sélections agronomiques ont également conduit à une modification de la répartition du carbone entre les organes des plantes, que l'on appelle aussi les **puits de carbone** de la plante. De tout temps, on a sélectionné et, plus récemment, on a modifié génétiquement les plantes afin de favoriser le grain aux dépens des racines et des parties foliaires. Un retour à un équilibre plus naturel entre ces **puits de carbone** pour la plante pourrait contribuer à des apports de carbone plus importants aux sols, sans pour autant trop diminuer les **rendements** au point que les cultures ne soient plus rentables.

De ce point de vue, un nouveau mode d'évaluation de la rentabilité des cultures peut être un facteur clé pour l'avenir. Prendre en compte le bien-être de l'agriculteur, et pas uniquement les flux financiers entre coûts des **intrants** et gain par la vente des produits, permettrait d'avoir une vision plus juste, plus intégrative du système agricole. Chez les semenciers, considérer les flux financiers vers les actionnaires serait aussi un moyen de mieux considérer l'agriculture de conservation, l'**agroécologie** par rapport à l'industrie agricole intensive (voir section 11.2.2 plus loin dans l'ouvrage).

Aussi que ce soit par les parcours agricoles, les choix agronomiques ou les modèles économiques, tout concourt à une vision positive de l'agriculture qui serait à la fois favorable à la sécurité alimentaire et à la limitation du réchauffement climatique.

2.6.4. Retour sur les modèles de carbone dans les sols

Le monde des sciences des sols est en pleine révolution. Il redéfinit la vision qu'il avait du carbone dans les sols. Dans les années 1980s, on imaginait que le carbone dans les sols était divisé en trois catégories: le **carbone labile** qui resterait assez peu de temps dans le sol, en moyenne une année entre le moment où il y pénétrerait et le moment où il en ressortirait, le **carbone stable** qui resterait dans les sols pendant plusieurs siècles, voire plusieurs millénaires, et le **carbone intermédiaire** avec des temps de résidence moyen de l'ordre de la décennie. Pendant longtemps, on a essayé de mettre en évidence le type de matière organique à l'origine de ces différents réservoirs, la taille de molécule, le type de molécule, la densité des molécules, mais rien n'était conclusif.

De nouveaux modèles conceptuels sont alors nés et l'imagerie a confirmé ces modèles grâce à des images de plus en plus résolues. Selon ces modèles, le stockage de carbone dans les sols est régi par des interactions entre les particules minérales (les argiles) et les molécules organiques (riches en carbone), et non plus uniquement entre les molécules organiques. Le modèle le plus consensuel est celui dit de **Kleber [16]**, selon lequel les molécules organiques et les particules minérales s'organisent en structures multicouches. La **figure 2.28** illustre dans le cas d'une particule d'argile (au centre, en marron). Une première couche de molécules organiques, dite de contact, se forme par interaction chimique avec l'argile. Viennent ensuite s'empiler d'autres couches moléculaires (du centre vers l'extérieur), l'intensité des interactions diminuant au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'argile centrale. On retrouve, au final, les mêmes molécules dans la couche externe et dans la couche de contact. Dans un sol en bonne santé, les trois couches sont bien développées alors que dans un sol dégradé, les couches externes et intermédiaires, voire même les couches de contact, sont fortement réduites.

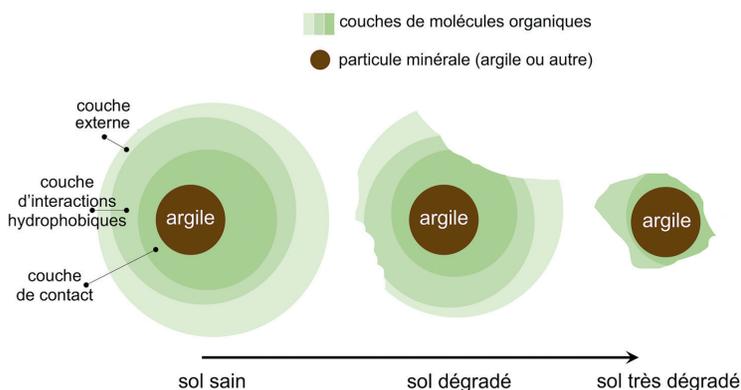


Figure 2.28 : Structure multicouche associant une particule d'argile et des molécules organiques riches en carbone, selon le modèle de **Kleber [16]**. La réduction des couches organiques, externes, intermédiaires, voire de contact, conduit à des sols de plus en plus dégradés (de gauche à droite). Source : Christine Hatté

Un modèle complémentaire émerge aujourd'hui, celui de la stabilisation du carbone par des interactions aux très petites échelles entre structures minérales et molécules organiques. Les molécules organiques seraient à l'origine d'une modification structurale des surfaces minérales et se combineraient alors avec des groupements minéraux actifs pour former des ensembles stables.

Quel que soit le modèle, une modification des conditions environnementales, comme le changement de pH ou de quantité d'eau, en lien avec des paramètres climatiques, agricoles (labours) ou agronomiques (changement de culture) impacte le type d'interaction entre molécules et l'énergie qui y est associée. Les couches extérieures du millefeuille peuvent se désagréger et dans les cas les plus pénalisants, l'empilement complet peut être dégradé. Libérer les molécules les rend davantage accessibles aux micro-organismes des sols, qui vont les surconsommer. Elles participent aussi davantage aux processus de respiration physique ou de « lessiviation ». Dans ce dernier cas, les molécules quittent le sol en partant en solution.

Il est toujours compliqué de s'écarter de conditions d'équilibre qui n'existent vraiment que pour les prairies pérennes et les forêts. De ce point de vue, l'agriculture doit être l'art du meilleur compromis.

Parmi les fausses bonnes idées, l'afforestation, c'est-à-dire planter une forêt là où, naturellement, il ne devrait pas y en avoir, peut se révéler dommageable sur la durée. En effet, l'exsudation racinaire est déjà constituée de sucres qui sont la source d'énergie des microorganismes des sols. En ajoutant des sucres par une exsudation exacerbée, les populations de microorganismes augmentent et s'attaquent alors à des molécules qu'ils délaissaient jusqu'alors. L'apport de sucre au sol a donc bien pour premier effet d'augmenter le stock du carbone dans les sols en lui apportant davantage de molécules carbonées synthétisées par les microorganismes. Cependant, il s'agit de molécules simples, facilement assimilées ou respirées par d'autres microorganismes, et finalement le carbone ajouté ne restera pas longtemps dans le sol. Par ailleurs, les molécules, que les microorganismes délaissaient jusqu'alors et qu'ils se sont mis à consommer, étaient en dehors du cycle du carbone actif depuis un moment, peut-être des décennies, voire des siècles.

En définitive, la notion de durée du nouveau stockage est primordiale quand on souhaite augmenter le stock de carbone dans les sols.

Références

[1] R. Mosseri, C. Jeandel. 2013. *L'énergie à découvert.*, CNRS Éditions.

[2] BP. 2020. *BP Statistical Review of the World Energy*, 68 p. www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf.

[3] K. Hubbert. 1956. *Nuclear energy and the fossil fuels*. Shell development Company, Publication n° 95, 57 p. <http://www.energycrisis.com/Hubbert/1956/1956.pdf>.

- [4] Environmental Protection Agency. 2015. Petroleum refining, in *Air Emission Factors and AP 42*, 5th Ed., 21 p. https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch05/final/c05s01_2015.pdf.
- [5] R. Vially. 2012. *Les hydrocarbures non conventionnels: évolution ou révolution?*. Panorama 2012, IFP Energies nouvelles, 14 p. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/095/43095221.pdf.
- [6] F. Lantz, D. Bouchonneau, A. Saniere. 2012. *Analyse économique des hydrocarbures non conventionnels*, rapport CFE n° 55.
- [7] C. Dumas. 2018. *La réduction des émissions de soufre dans le transport maritime: défi économique et technologique*. IFP Energies nouvelles, 9 p. <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/reduction-des-emissions-soufre-transport-maritime-defi-economique-et-technologique>.
- [8] La pollution de l'air. *Annales des Mines* **96** (Octobre 2019).
- [9] Données: Encyclopedia of land use, land cover and soil sciences. Edited by W.H. Verheye. Chapitre 5, G. Fischer, *et al.* "Agro-Ecological Zones Assessments", 2010.
- [10] J. Bruinsma. 2011. *By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050?* FAO, Rome, Italy. http://www.fao.org/fileadmin/templates/esa/Global_perspectives/Presentations/Bruinsma_pres.pdf.
- [11] E.F. Lambin, P. Meyfroidt. 2011. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *PNAS* **2011108**, 3465-3472. <https://www.pnas.org/content/108/9/3465>.
- [12] D. Pimentel, A. Burgess. 2013. "Soil erosion threatens food production". *Agriculture* **3**, 443-463. <https://www.mdpi.com/2077-0472/3/3/443>.
- [13] FAO. 2018. *Soil pollution, a hidden reality*. <http://www.fao.org/3/I9183EN/i9183en.pdf>.
- [14] N.H. Batjes. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* **47** (2), 151-163.
- [15] J. Balesdent, D. Arrouays. 1999. Usage des terres et stockage de carbone dans les sols du territoire français. Une estimation des flux nets annuels pour la période 1900-1999. *Compte-rendu de l'Académie de l'Agriculture* **85**, 265-277.
- [16] M. Kleber, P. Sollins, R. Sutton. 2007. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry* **85**, 9-24 (2007). DOI: 10.1007/s10533-007-9103-5.