République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohammed Seddik Benyahia
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Électronique

Polycopié de cours

Énergie et Environnement



Année universitaire 2025-2026

Avant-propos

Ce polycopié de cours est destiné aux étudiants de deuxième année de la licence Électronique et Télécommunications, dans le cadre de l'unité d'enseignement UED 2.1 (Semestre 3). Il présente les notions fondamentales des énergies et de l'environnement, une matière devenue incontournable pour sensibiliser les futurs cadres de l'électronique et des télécommunications aux enjeux de la transition énergétique et de l'impact environnemental des technologies modernes.

La question énergétique et environnementale occupe aujourd'hui une place centrale dans la formation de tout ingénieur ou technicien, quel que soit son domaine de spécialité. Comprendre l'origine, la disponibilité et les limites des ressources énergétiques, savoir comment l'énergie peut être stockée pour pallier l'intermittence de certaines sources, et appréhender les conséquences environnementales et sanitaires de l'exploitation de ces ressources, constituent des compétences transversales indispensables face aux enjeux de la transition énergétique et écologique contemporaine.

Ce cours est structuré en six chapitres complémentaires et progressifs.

Chapitre 1 présente les différentes ressources d'énergie : ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), énergie nucléaire, et énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolienne, biomasse, géothermie).

Chapitre 2 est consacré au stockage de l'énergie : stockage mécanique (STEP, air comprimé, volants d'inertie), stockage électrochimique (batteries), stockage thermique et stockage chimique par le vecteur hydrogène.

Chapitre 3 traite des consommations, des réserves et des évolutions des ressources d'énergie : notion de réserve, ratio réserves/production, répartition géographique des réserves et scénarios d'évolution.

Chapitre 4 présente les différents types de pollutions : pollution atmosphérique, pollution de l'eau, pollution des sols, et autres formes de pollution (sonore, lumineuse, électromagnétique, thermique).

Chapitre 5 aborde la détection et le traitement des polluants et des déchets : mesure de la qualité de l'air, traitement des eaux usées, gestion des déchets solides et traitement des effluents gazeux industriels.

Chapitre 6 conclut ce module par l'étude de l'impact des pollutions sur la santé et l'environnement : voies d'exposition, relation dose-réponse, effets sanitaires, impacts sur les écosystèmes et changement climatique.

SOMMAIRE

Chapitre 1 Les différentes ressources d'énergie

1.1. Introduction 6
1.2. Énergie primaire et énergie secondaire 6
1.3. Les ressources fossiles 7
1.4. L'énergie nucléaire 7
1.5. Les énergies renouvelables 8
1.6. Comparaison des ressources : avantages et limites 9
1.7. Étude de cas : dimensionnement simplifié d'un mix électrique national 9
1.8. Conclusion 10
1.9. Exercices résolus 10

Chapitre 2 Stockage de l'énergie

2.1. Introduction 13
2.2. Pourquoi stocker l'énergie ? 13
2.3. Stockage mécanique de l'énergie 13
2.4. Stockage électrochimique : les batteries 15
2.5. Stockage thermique de l'énergie 16
2.6. Stockage chimique : le vecteur hydrogène 16
2.7. Comparaison des technologies de stockage 16
2.8. Étude de cas : dimensionnement d'un système de stockage résidentiel 17
2.9. Conclusion 17
2.10. Exercices résolus 18

Chapitre 3 Consommations, réserves et évolutions des ressources d'énergie

3.1. Introduction 21
3.2. Évolution de la consommation mondiale d'énergie 21
3.3. La notion de réserve énergétique 22
3.4. Répartition géographique des réserves 23
3.5. Scénarios d'évolution de la consommation énergétique 23
3.6. Conclusion 24
3.7. Exercices résolus 24

Chapitre 4 Les différents types de pollutions

4.1. Introduction 27
4.2. La pollution atmosphérique 27
4.3. La pollution de l'eau 28
4.4. La pollution des sols 29

4.5. Autres formes de pollution 29
4.6. Synthèse : sources et milieux affectés 29
4.7. Conclusion 30
4.8. Exercices résolus 30
Chapitre 5 Détection et traitement des polluants et des déchets
5.1. Introduction 33
5.2. Détection et mesure de la pollution atmosphérique 33
5.3. Traitement des eaux usées 33
5.4. Traitement des déchets solides 34
5.5. Traitement des effluents gazeux industriels 35
5.6. Technologies avancées de détection et de traitement 36
5.7. Conclusion 36
5.8. Exercices résolus 36
Chapitre 6 Impact des pollutions sur la santé et l'environnement
6.1. Introduction 40
6.2. Voies d'exposition et relation dose-réponse 40
6.3. Effets des pollutions sur la santé humaine 41
6.4. Impacts des pollutions sur les écosystèmes 42
6.5. Le changement climatique : mécanisme et conséquences 42
6.6. Conclusion 43
6.7. Exercices résolus 43
Références bibliographiques 46

Chapitre 1 Les différentes ressources d'énergie

Chapitre 1. Les différentes ressources d'énergie

1.1. Introduction

L'énergie est au cœur de toute activité humaine : se chauffer, s'éclairer, se déplacer, produire des biens ou communiquer nécessitent tous, sous une forme ou une autre, de mobiliser de l'énergie. Comprendre les différentes ressources énergétiques disponibles, leurs modes d'exploitation, leurs avantages et leurs limites respectives constitue un préalable indispensable à toute réflexion sur la transition énergétique et sur la maîtrise des impacts environnementaux qui lui sont associés.

Ce chapitre introductif présente les grandes catégories de ressources énergétiques exploitées à l'échelle mondiale : les ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), l'énergie nucléaire, et les différentes formes d'énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolienne, biomasse, géothermie). Il précise également les notions de base nécessaires à la comparaison de ces ressources entre elles : distinction entre énergie primaire et énergie finale, unités de mesure usuelles, et rendements de conversion.

1.2. Énergie primaire et énergie secondaire

1.2.1. Définitions et chaîne de conversion

On appelle énergie primaire l'énergie directement disponible dans la nature, avant toute transformation : pétrole brut, charbon extrait, gaz naturel, rayonnement solaire incident, énergie cinétique du vent, ou chaleur de la Terre. Cette énergie primaire doit généralement être transformée pour devenir utilisable : le pétrole brut est raffiné en carburants, le charbon est brûlé pour produire de la vapeur puis de l'électricité, le rayonnement solaire est converti en électricité par des panneaux photovoltaïques. On appelle énergie finale l'énergie effectivement livrée au consommateur (électricité au compteur, carburant à la pompe, gaz au brûleur), et énergie utile l'énergie réellement exploitée après le rendement de l'appareil utilisateur (chaleur produite par une chaudière, énergie mécanique produite par un moteur).

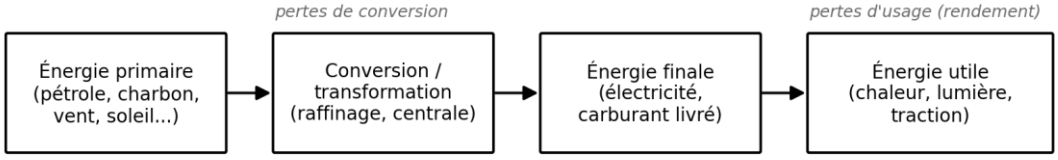


Figure 1.1 Chaîne de conversion de l'énergie primaire à l'énergie utile.

À chaque étape de cette chaîne, des pertes se produisent, sous forme principalement de chaleur dissipée dans l'environnement. Une centrale thermique à flamme, par exemple, ne convertit typiquement que 35 à 45 % de l'énergie primaire du combustible en électricité, le reste étant perdu sous forme de chaleur résiduelle, tandis qu'un moteur à combustion interne automobile n'affiche qu'un rendement de l'ordre de 25 à 35 % en usage réel. Ces rendements de conversion successifs expliquent pourquoi l'énergie primaire mondiale mobilisée est très supérieure à l'énergie utile effectivement exploitée par les usages finaux.

1.2.2. Unités et ordres de grandeur

Plusieurs unités coexistent pour exprimer des quantités d'énergie, selon les usages et les habitudes sectorielles. Le joule (J), unité du Système international, reste peu commode pour exprimer les quantités d'énergie à l'échelle nationale ou mondiale, en raison des ordres de grandeur considérables en jeu. Le kilowattheure (kWh), couramment utilisé pour la facturation de l'électricité, correspond à 3,6 millions de joules. La tonne équivalent pétrole (tep), largement utilisée dans les bilans énergétiques nationaux et internationaux, correspond à l'énergie libérée par la combustion d'une tonne de pétrole brut, soit environ 41,87 gigajoules (GJ), ou encore environ 11 630 kWh.

Unité	Équivalence	Usage typique
1 kWh	$3{,}6 \times 10^6$ J	Facturation électrique domestique
1 tep	≈ 41,87 GJ ≈ 11 630 kWh	Bilans énergétiques nationaux
1 Mtep	10^6 tep	Bilans énergétiques d'un pays
1 EJ (exajoule)	10^{18} J ≈ 23,9 Mtep	Bilans énergétiques mondiaux

Exemple numérique : un foyer français consomme en moyenne environ 4 500 kWh d'électricité par an hors chauffage. Convertie en tep, cette consommation vaut 4 500 / 11 630 ≈ 0,387 tep par an, soit un peu moins de 0,4 tonne équivalent pétrole.

1.3. Les ressources fossiles

1.3.1. Le charbon

Le charbon est une roche sédimentaire combustible, formée par la transformation progressive de matières végétales accumulées puis enfouies sur des millions d'années (processus de carbonisation ou houillification). On distingue plusieurs qualités de charbon selon leur degré de maturation géologique et leur teneur en carbone : la tourbe et le lignite, peu matures et de faible pouvoir calorifique, la houille, de bonne qualité énergétique, et l'anthracite, le plus mature et le plus riche en carbone. Le charbon reste, à l'échelle mondiale, la première source

d'électricité, principalement en raison de son abondance géographique très répartie et de son faible coût d'extraction dans de nombreux bassins, en particulier en Chine, en Inde et aux États-Unis.

1.3.2. Le pétrole

Le pétrole brut est un mélange complexe d'hydrocarbures liquides, formé par la maturation thermique de matière organique (essentiellement planctonique) enfouie dans des roches mères sédimentaires, puis migrée vers des roches réservoirs poreuses où elle peut être extraite. Le pétrole occupe une place particulière parmi les ressources fossiles en raison de sa très grande densité énergétique et de sa facilité de transport et de stockage sous forme liquide, ce qui en fait la ressource dominante du secteur des transports (carburants routiers, aériens, maritimes). Le raffinage du pétrole brut permet d'en extraire une gamme de produits (essence, gazole, kérosène, fioul lourd, bitume, matières premières pétrochimiques) par distillation fractionnée, exploitant les différences de température d'ébullition des différents hydrocarbures constitutifs.

1.3.3. Le gaz naturel

Le gaz naturel, composé essentiellement de méthane (CH_4), se forme selon des processus géologiques proches de ceux du pétrole, dont il est d'ailleurs souvent associé dans les mêmes gisements. Il présente, par rapport au charbon et au pétrole, un bilan de combustion plus favorable en termes d'émissions de dioxyde de carbone par unité d'énergie produite, ainsi qu'une combustion plus propre en particules et en oxydes de soufre, ce qui en fait souvent une énergie de transition privilégiée pour remplacer le charbon dans la production électrique. Son transport, en revanche, pose des défis spécifiques : le gaz doit être acheminé par gazoduc sur de longues distances continentales, ou liquéfié à très basse température (gaz naturel liquéfié, GNL, à environ −162 °C) pour être transporté par méthanier sur de longues distances maritimes, ce qui implique une infrastructure coûteuse de liquéfaction et de regazéification.

1.4. L'énergie nucléaire

1.4.1. Principe de la fission nucléaire

L'énergie nucléaire d'origine civile repose sur la réaction de fission : un noyau lourd et instable, généralement de l'uranium 235, absorbe un neutron et se scinde en deux noyaux plus légers, en libérant simultanément plusieurs neutrons supplémentaires et une quantité considérable d'énergie sous forme cinétique, convertie en chaleur. Ces neutrons libérés peuvent à leur tour provoquer la fission d'autres noyaux d'uranium 235, entretenant ainsi une réaction en chaîne contrôlée à l'intérieur du réacteur. Cette chaleur de fission est utilisée pour produire de la vapeur, qui entraîne ensuite une turbine couplée à un alternateur, exactement comme dans

une centrale thermique classique, la seule différence fondamentale résidant dans la source de chaleur primaire.

La densité énergétique de la fission nucléaire est considérable : la fission complète d'un kilogramme d'uranium 235 libère une énergie comparable à celle produite par la combustion de plusieurs milliers de tonnes de charbon, ce qui explique la faible quantité de combustible nécessaire au fonctionnement d'une centrale nucléaire par rapport à une centrale à combustible fossile de puissance équivalente.

1.4.2. Le cycle du combustible nucléaire

Le combustible nucléaire suit un cycle complet, depuis l'extraction minière du minerai d'uranium jusqu'à la gestion des déchets radioactifs produits. Après extraction, le minerai est concentré (yellowcake), converti chimiquement, puis enrichi afin d'augmenter la proportion de l'isotope fissile uranium 235 (de sa teneur naturelle d'environ 0,7 % à une teneur de 3 à 5 % pour les réacteurs à eau pressurisée usuels), avant d'être façonné en pastilles combustibles assemblées en crayons puis en assemblages combustibles insérés dans le cœur du réacteur. Après utilisation en réacteur, le combustible irradié, devenu fortement radioactif, doit être géré selon des filières dédiées : retraitement pour en extraire les matières valorisables (uranium et plutonium résiduels), ou stockage direct en attendant un stockage géologique profond définitif, question qui demeure l'un des enjeux majeurs de l'acceptabilité de cette filière énergétique.

1.5. Les énergies renouvelables

1.5.1. L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique exploite l'énergie potentielle de l'eau retenue par un barrage, ou l'énergie cinétique d'un cours d'eau, pour entraîner une turbine couplée à un alternateur. C'est historiquement la plus ancienne des énergies renouvelables exploitées à grande échelle pour la production d'électricité, et elle demeure aujourd'hui la première source d'électricité renouvelable dans le monde. Ses principaux avantages tiennent à sa très grande flexibilité de production (un barrage hydraulique peut ajuster sa production en quelques minutes pour suivre les variations de la demande) et à sa capacité de stockage intrinsèque, un grand barrage constituant de fait une réserve d'énergie mobilisable à la demande (voir également le chapitre 2 sur le stockage de l'énergie).

1.5.2. L'énergie solaire

L'énergie solaire peut être exploitée selon deux filières technologiques distinctes. Le solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux en électricité, par effet photoélectrique au sein de cellules semi-conductrices (le plus souvent à base de silicium),

sans passer par une étape de conversion thermique intermédiaire. Le solaire thermique, quant à lui, concentre ou capte le rayonnement solaire pour produire de la chaleur, exploitée soit directement (chauffage de l'eau sanitaire, chauffage des bâtiments), soit indirectement pour produire de la vapeur entraînant une turbine, dans le cas des centrales solaires à concentration (centrales thermodynamiques). Le principal défi de l'énergie solaire, quelle que soit la filière, réside dans son caractère intermittent et non pilotable (dépendance à l'ensoleillement, cycle jour/nuit, saisonnalité), qui impose de recourir à des solutions de stockage ou de complémentarité avec d'autres sources pour assurer un approvisionnement continu.

1.5.3. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation, au moyen de pales entraînant un rotor couplé à une génératrice électrique. La puissance théoriquement récupérable par une éolienne croît avec le cube de la vitesse du vent, ce qui explique la forte sensibilité de la production éolienne aux conditions de vent locales et la recherche systématique de sites présentant des régimes de vent réguliers et soutenus (crêtes, littoraux, plateaux dégagés, ou implantation en mer pour l'éolien offshore, où les vents sont généralement plus forts et plus réguliers qu'à terre).

1.5.4. Biomasse et géothermie

La biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale valorisables à des fins énergétiques : bois-énergie, résidus agricoles, déchets organiques, cultures énergétiques dédiées, ou biogaz issu de la fermentation méthanique de matières organiques (méthanisation). Contrairement aux autres énergies renouvelables présentées ci-dessus, la biomasse est stockable et mobilisable à la demande, ce qui en fait une ressource complémentaire précieuse pour compenser l'intermittence du solaire et de l'éolien. La géothermie exploite quant à elle la chaleur naturellement présente dans le sous-sol terrestre, dont l'intensité croît avec la profondeur ; elle est utilisée directement pour le chauffage (géothermie de surface ou de moyenne profondeur) ou pour la production d'électricité dans les zones à fort gradient géothermique (géothermie profonde, zones volcaniques).

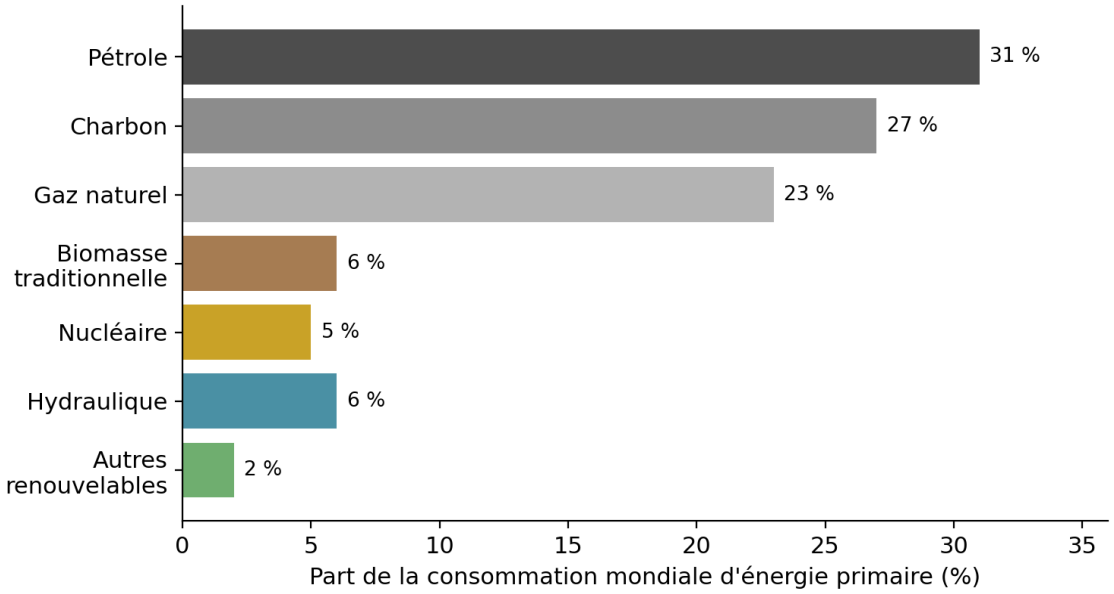


Figure 1.2 Répartition approximative de la consommation mondiale d'énergie primaire par source.

1.6. Comparaison des ressources : avantages et limites

Le choix d'une ressource énergétique pour un usage donné résulte toujours d'un compromis entre plusieurs critères : disponibilité et répartition géographique de la ressource, densité énergétique (quantité d'énergie par unité de masse ou de volume), pilotabilité (capacité à ajuster la production à la demande), émissions de polluants et de gaz à effet de serre associées, coût d'exploitation, et acceptabilité sociale. Les ressources fossiles et le nucléaire offrent une forte densité énergétique et une bonne pilotabilité, mais présentent des enjeux environnementaux majeurs (émissions de gaz à effet de serre pour les fossiles, gestion des déchets radioactifs pour le nucléaire) et reposent sur des ressources finies. Les énergies renouvelables, à l'exception de l'hydraulique et de la biomasse, offrent une disponibilité quasiment illimitée à l'échelle humaine mais souffrent d'une intermittence qui impose des solutions de stockage ou de complémentarité pour garantir la continuité de l'approvisionnement, thématique qui sera développée au chapitre 2.

1.7. Étude de cas : dimensionnement simplifié d'un mix électrique national

Considérons un pays fictif dont la demande annuelle d'électricité s'élève à 300 TWh, et qui souhaite construire un mix de production reposant sur trois sources : le nucléaire (facteur de charge annuel moyen de 85 %, c'est-à-dire que la centrale produit en moyenne 85 % de sa puissance nominale sur l'année), l'éolien (facteur de charge moyen de 30 %) et le solaire photovoltaïque (facteur de charge moyen de 15 %). On souhaite que le nucléaire fournisse 50 % de la demande annuelle, l'éolien 30 % et le solaire 20 %.

La puissance installée nécessaire pour chaque source se calcule à partir de l'énergie annuelle à produire, du facteur de charge, et du nombre d'heures dans une année (8 760 heures) :

$$Puissance\ installée\ =\ Énergie\ annuelle\ produite\ /\ (Facteur\ de\ charge\ \times\ 8760\ h)$$

Source	**Part de la demande**	**Énergie annuelle (TWh)**	**Facteur de charge**	**Puissance installée nécessaire (GW)**
Nucléaire	50 %	150	85 %	≈ 20,1
Éolien	30 %	90	30 %	≈ 34,2
Solaire PV	20 %	60	15 %	≈ 45,7

Ce calcul simplifié illustre un enseignement essentiel du dimensionnement des mix électriques : à quantité d'énergie annuelle produite égale, la puissance installée nécessaire est d'autant plus importante que le facteur de charge de la source est faible. Ainsi, bien que le solaire photovoltaïque ne fournisse que 20 % de l'énergie annuelle dans cet exemple, il nécessite plus de deux fois la puissance installée du nucléaire, qui en fournit pourtant 50 %, en raison de son facteur de charge beaucoup plus faible. Ce constat explique pourquoi les indicateurs exprimés en puissance installée (GW) et ceux exprimés en énergie produite (TWh) doivent toujours être interprétés avec précaution et ne peuvent être comparés directement d'une source à l'autre sans tenir compte du facteur de charge propre à chacune.

1.8. Conclusion

Ce chapitre a présenté un panorama des principales ressources énergétiques exploitées à l'échelle mondiale, depuis les ressources fossiles historiquement dominantes jusqu'aux énergies renouvelables en plein développement, en passant par l'énergie nucléaire. Chacune de ces ressources présente des caractéristiques propres en termes de densité énergétique, de pilotabilité, de répartition géographique et d'impact environnemental, qui conditionnent leur rôle respectif dans le mix énergétique mondial et les choix de politique énergétique des différents pays. Les chapitres suivants approfondiront successivement les questions du stockage de l'énergie, de l'évolution des réserves et de la consommation, puis des impacts environnementaux associés à l'exploitation de ces ressources.

Chapitre 2 Stockage de l'énergie

Chapitre 2. Stockage de l'énergie

2.1. Introduction

Le chapitre précédent a montré que les ressources énergétiques ne présentent pas toutes la même disponibilité dans le temps : certaines, comme les ressources fossiles ou le combustible nucléaire, sont mobilisables à la demande, tandis que d'autres, comme le solaire ou l'éolien, dépendent de conditions naturelles variables et imprévisibles. Le stockage de l'énergie constitue la réponse technique à ce décalage temporel entre la disponibilité d'une ressource et le moment où l'énergie est effectivement nécessaire à l'utilisateur.

Ce chapitre présente les principales technologies de stockage de l'énergie, classées selon la forme sous laquelle l'énergie est stockée : stockage mécanique, stockage électrochimique, stockage thermique et stockage chimique. Il propose également une comparaison synthétique de ces technologies selon leurs caractéristiques essentielles : densité énergétique, densité de puissance, rendement, durée de vie et coût.

2.2. Pourquoi stocker l'énergie ?

Le besoin de stockage de l'énergie répond à plusieurs problématiques distinctes. La première est l'intermittence des énergies renouvelables variables (solaire, éolien) : la production de ces sources ne coïncide pas nécessairement avec la demande instantanée du réseau électrique, ce qui impose de stocker l'énergie produite en excès pour la restituer lorsque la production redevient insuffisante. La seconde est le foisonnement temporel de la demande elle-même, qui varie fortement selon l'heure de la journée, le jour de la semaine et la saison, alors que certains moyens de production (nucléaire notamment) fonctionnent plus efficacement à puissance constante. La troisième, enfin, concerne la mobilité : les véhicules électriques et l'ensemble des appareils portables nécessitent une réserve d'énergie embarquée, indépendante du réseau électrique, pour assurer leur autonomie de fonctionnement.

Le stockage de l'énergie permet ainsi de découpler dans le temps la production et la consommation, jouant un rôle d'amortisseur qui améliore la flexibilité globale du système énergétique, réduit le recours à des centrales d'appoint souvent émettrices de gaz à effet de serre, et facilite l'intégration de proportions croissantes d'énergies renouvelables intermittentes dans le mix électrique.

2.3. Stockage mécanique de l'énergie

2.3.1. Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Les stations de transfert d'énergie par pompage constituent, à l'échelle mondiale, la technologie de stockage d'électricité la plus déployée en puissance et en capacité cumulées. Leur principe est simple : lorsque l'électricité est abondante et bon marché (forte production renouvelable, faible demande nocturne), l'énergie électrique excédentaire est utilisée pour pomper de l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur, stockant ainsi l'énergie sous forme d'énergie potentielle de gravité. Lorsque la demande d'électricité redevient forte, l'eau du bassin supérieur est relâchée à travers une turbine, restituant l'énergie stockée sous forme électrique.

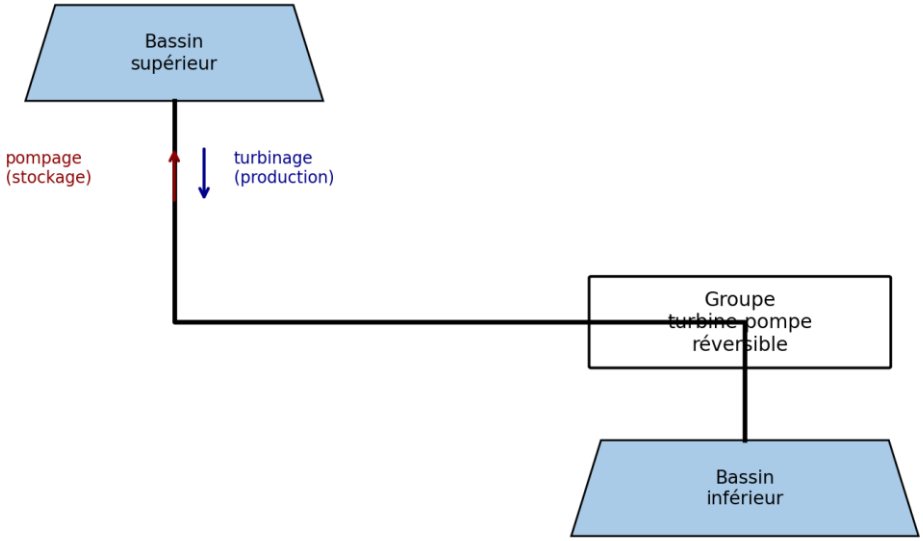


Figure 2.1 Principe de fonctionnement d'une station de transfert d'énergie par pompage (STEP).

L'énergie potentielle stockée dans une STEP est directement proportionnelle à la masse d'eau déplacée et à la hauteur de chute disponible entre les deux bassins : $E = m \times g \times h \times \eta$

où m désigne la masse d'eau (kg), g l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s²), h la hauteur de chute (m), et η le rendement global du cycle pompage-turbinage, généralement compris entre 70 et 80 %. Les STEP offrent un rendement de cycle élevé, une durée de vie très longue (plusieurs décennies) et une capacité de stockage pouvant atteindre plusieurs dizaines de gigawattheures, mais leur déploiement reste limité par la nécessité de disposer d'un relief favorable (deux bassins séparés par une dénivellation suffisante) et par l'impact environnemental de la construction de tels ouvrages.

2.3.2. Stockage par air comprimé (CAES)

Le stockage d'énergie par air comprimé (CAES, Compressed Air Energy Storage) consiste à comprimer de l'air à l'aide de l'électricité excédentaire, puis à le stocker dans une cavité souterraine étanche (cavité saline, ancienne mine, aquifère) ou dans des réservoirs de surface. Lors de la restitution, l'air comprimé est détendu à travers une turbine pour produire de l'électricité, généralement en association avec un appoint de combustion de gaz naturel qui réchauffe l'air avant détente, afin de compenser le refroidissement inévitable subi par l'air lors de sa compression initiale. Cette technologie, moins mature et moins répandue que les STEP, présente néanmoins l'avantage de ne pas nécessiter de relief particulier, la contrainte principale résidant dans la disponibilité d'une cavité souterraine adaptée.

2.3.3. Volants d'inertie

Le volant d'inertie stocke l'énergie sous forme cinétique de rotation, dans une masse cylindrique tournant à très grande vitesse (plusieurs dizaines de milliers de tours par minute pour les volants modernes à fibre de carbone), en lévitation magnétique dans une enceinte sous vide afin de minimiser les pertes par frottement. L'énergie cinétique stockée est donnée par : $E = (1/2) \times J \times \omega^2$

où J désigne le moment d'inertie du volant (kg·m²) et ω sa vitesse angulaire (rad/s). Cette relation quadratique en vitesse explique pourquoi les volants d'inertie modernes privilégient des vitesses de rotation très élevées plutôt que des masses importantes. Les volants d'inertie se caractérisent par une densité de puissance très élevée et un temps de réponse extrêmement rapide (quelques millisecondes), ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications nécessitant des à-coups de puissance de courte durée (régulation de fréquence du réseau électrique, alimentation sans interruption), mais par une capacité énergétique limitée et un phénomène d'autodécharge relativement rapide, qui les rend inadaptés au stockage de grandes quantités d'énergie sur de longues durées.

2.4. Stockage électrochimique : les batteries

2.4.1. Principe électrochimique

Une batterie électrochimique stocke l'énergie sous forme chimique, dans les liaisons moléculaires de ses matériaux d'électrodes, et la restitue sous forme électrique par une réaction d'oxydoréduction contrôlée. Lors de la décharge, une réaction d'oxydation se produit à l'électrode négative (anode), libérant des électrons qui circulent dans le circuit électrique

externe vers l'électrode positive (cathode), où se produit simultanément une réaction de réduction ; à l'intérieur de la batterie, un électrolyte assure le transport des ions correspondants entre les deux électrodes, fermant ainsi le circuit. Lors de la charge, un courant électrique externe est imposé en sens inverse, forçant les réactions chimiques à se produire dans le sens opposé et régénérant ainsi les matériaux d'électrodes initiaux (pour les batteries rechargeables, dites secondaires, par opposition aux piles non rechargeables, dites primaires).

2.4.2. Principales technologies de batteries

Plusieurs familles de batteries rechargeables coexistent aujourd'hui, chacune avec ses propres caractéristiques de performance, de coût et d'usage privilégié. La batterie au plomb-acide, la plus ancienne technologie encore largement utilisée (démarrage automobile, applications stationnaires de secours), offre un coût très faible mais une densité énergétique modeste et une durée de vie limitée en nombre de cycles. La batterie lithium-ion, devenue dominante dans l'électronique portable et les véhicules électriques, offre une densité énergétique nettement supérieure, une autodécharge faible et un grand nombre de cycles de charge-décharge, au prix d'un coût plus élevé et de précautions particulières de gestion thermique et de sécurité. Les batteries nickel-hydrure métallique (NiMH) et nickel-cadmium (NiCd), aujourd'hui moins utilisées en raison de leur densité énergétique inférieure à celle du lithium-ion et, pour le NiCd, de la toxicité du cadmium, demeurent employées dans certaines applications industrielles spécifiques nécessitant une robustesse particulière.

Technologie	**Densité énergétique typique**	**Cycles de vie typiques**	**Usage privilégié**
Plomb-acide	30 à 50 Wh/kg	300 à 500	Démarrage auto, secours stationnaire
Nickel-hydrure métallique (NiMH)	60 à 120 Wh/kg	500 à 1000	Applications industrielles, hybrides anciens
Lithium-ion (Li-ion)	150 à 260 Wh/kg	1000 à 3000+	Électronique portable, véhicules électriques
Sodium-ion (émergent)	100 à 160 Wh/kg	2000 à 4000	Stockage stationnaire, alternative sans lithium

2.4.3. Caractéristiques clés d'une batterie

Plusieurs grandeurs caractérisent la performance d'une batterie et guident le choix d'une technologie pour une application donnée. La densité énergétique massique (Wh/kg) ou volumique (Wh/L) détermine l'autonomie disponible pour une masse ou un encombrement donné, critère essentiel pour les applications mobiles (véhicules, électronique portable). La densité de puissance (W/kg) détermine la capacité de la batterie à délivrer ou absorber rapidement de l'énergie, critère important pour les démarrages ou les phases d'accélération. Le nombre de cycles de charge-décharge admissibles avant dégradation significative de la capacité (généralement défini comme la perte de 20 % de la capacité initiale) détermine la durée de vie économique de la batterie. Enfin, l'autodécharge, c'est-à-dire la perte de capacité au repos sans utilisation, et le rendement énergétique du cycle complet charge-décharge (rapport entre l'énergie restituée et l'énergie fournie lors de la charge, généralement compris entre 85 et 95 % pour le lithium-ion) complètent la caractérisation d'une technologie de batterie.

Exemple numérique : un véhicule électrique équipé d'une batterie lithium-ion de 60 kWh, offrant une densité énergétique de 200 Wh/kg, nécessite une masse de batterie de 60 000 / 200 = 300 kg, hors éléments de structure et de gestion thermique du pack complet.

2.5. Stockage thermique de l'énergie

Le stockage thermique consiste à conserver de l'énergie sous forme de chaleur (ou de froid), en général dans un matériau à forte capacité calorifique (eau, huile thermique, sels fondus, roches) ou exploitant un changement de phase (matériaux à changement de phase, stockant de l'énergie sous forme de chaleur latente lors de la fusion ou de la solidification). Cette technologie est notamment employée dans les centrales solaires thermodynamiques à concentration, où la chaleur collectée en journée est stockée dans des réservoirs de sels fondus, puis restituée en soirée ou la nuit pour continuer à produire de l'électricité en l'absence de rayonnement solaire, prolongeant ainsi la période de production au-delà des heures d'ensoleillement direct. Le stockage thermique est également utilisé à plus petite échelle dans le bâtiment (ballons d'eau chaude, planchers chauffants à inertie) pour décaler dans le temps la consommation électrique liée au chauffage ou à la production d'eau chaude sanitaire.

2.6. Stockage chimique : le vecteur hydrogène

L'hydrogène constitue un vecteur énergétique de stockage particulièrement adapté aux grandes quantités d'énergie et aux longues durées de stockage (stockage saisonnier). Le principe consiste à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau à partir d'électricité excédentaire (décomposition de la molécule d'eau en dihydrogène et dioxygène sous l'effet

d'un courant électrique), puis à stocker ce dihydrogène (sous forme comprimée, liquéfiée, ou combinée chimiquement), avant de le reconvertir en électricité, lorsque le besoin s'en fait sentir, à l'aide d'une pile à combustible réalisant la réaction inverse (recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air, produisant de l'électricité, de la chaleur et de l'eau).

Cette chaîne complète électricité-hydrogène-électricité (dite « power-to-gas-to-power ») souffre d'un rendement global relativement modeste, généralement compris entre 30 et 45 % selon les technologies d'électrolyse et de pile à combustible employées, en raison des pertes cumulées à chaque étape de conversion. Ce rendement limité est cependant compensé, pour certaines applications, par la capacité de l'hydrogène à être stocké en très grande quantité et sur de très longues durées (plusieurs mois), contrairement aux batteries électrochimiques mieux adaptées à des cycles de charge-décharge quotidiens ou hebdomadaires. L'hydrogène présente en outre l'intérêt de pouvoir être utilisé directement comme carburant dans certains secteurs difficiles à électrifier (transport lourd, aviation, certains procédés industriels).

2.7. Comparaison des technologies de stockage

Le diagramme de Ragone, qui représente la densité de puissance en fonction de la densité énergétique (généralement en échelle logarithmique), constitue l'outil de comparaison de référence entre les différentes technologies de stockage. Il permet de visualiser immédiatement le compromis fondamental entre capacité énergétique et rapidité de restitution qui caractérise chaque technologie : les volants d'inertie et les supercondensateurs se situent dans la zone de forte puissance mais de faible densité énergétique, adaptés aux besoins de courte durée mais de forte intensité ; les batteries électrochimiques occupent une position intermédiaire ; les STEP et le stockage par air comprimé offrent une grande capacité énergétique mais une densité de puissance plus modeste, adaptés au stockage de masse ; l'hydrogène, enfin, se distingue par sa capacité de stockage considérable sur de longues durées, au prix d'une densité de puissance et d'un rendement de cycle plus limités.

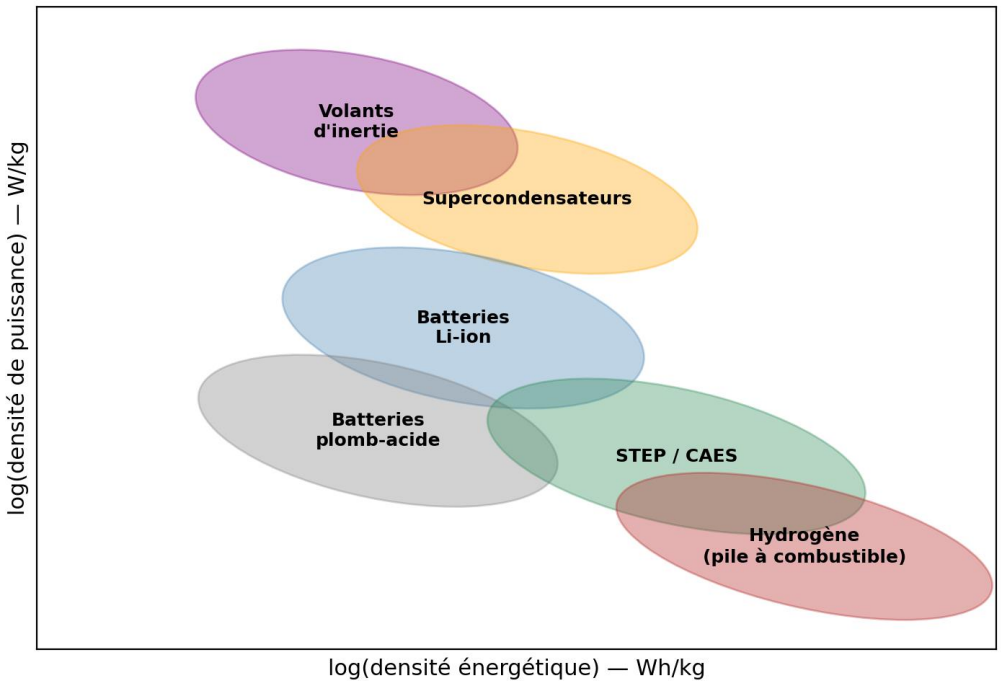


Figure 2.2 Diagramme de Ragone comparant qualitativement les principales technologies de stockage de l'énergie.

2.8. Étude de cas : dimensionnement d'un système de stockage résidentiel

Un foyer équipé de panneaux photovoltaïques produit, un jour d'été typique, un excédent de 8 kWh non consommé en journée, qu'il souhaite stocker dans une batterie lithium-ion pour l'utiliser en soirée. La batterie envisagée présente un rendement de cycle (charge puis décharge) de 90 %, et ne doit, pour préserver sa durée de vie, jamais être déchargée en dessous de 20 % de sa capacité nominale (profondeur de décharge maximale de 80 %).

On souhaite que l'énergie utile réellement disponible en soirée, après pertes de cycle, soit au moins égale aux 8 kWh d'excédent journalier. La capacité nominale minimale de la batterie se calcule ainsi : $Capacité\ nominale = Énergie\ utile\ souhaitée\ /\ (Rendement\ de\ cycle \times Profondeur\ de\ décharge\ maximale)$

Solution : capacité nominale minimale = 8 / (0,90 × 0,80) = 8 / 0,72 ≈ 11,1 kWh. Le foyer devra donc choisir une batterie d'une capacité nominale d'au moins 11,1 kWh (en pratique, on choisira une valeur commerciale standard légèrement supérieure, par exemple 12 ou 13,5 kWh) pour pouvoir restituer effectivement les 8 kWh d'excédent solaire quotidien tout en respectant les limites de rendement et de profondeur de décharge recommandées par le fabricant.

Cet exemple illustre un point souvent négligé dans le dimensionnement des systèmes de stockage : la capacité nominale annoncée d'une batterie (souvent mise en avant

commercialement) ne correspond jamais exactement à l'énergie utile réellement disponible pour l'utilisateur, qui doit systématiquement être réduite pour tenir compte à la fois du rendement de cycle et des limites de profondeur de décharge recommandées pour préserver la durée de vie de la batterie.

2.9. Conclusion

Ce chapitre a présenté les principales technologies de stockage de l'énergie, mécanique, électrochimique, thermique et chimique, chacune répondant à des besoins spécifiques en termes de capacité, de rapidité de restitution et de durée de stockage. Aucune technologie unique ne répond à l'ensemble des besoins de stockage d'un système énergétique : c'est la complémentarité entre ces différentes solutions, choisies selon l'application visée (régulation de fréquence de courte durée, lissage journalier de la production solaire, stockage saisonnier), qui permet d'assurer la flexibilité nécessaire à l'intégration croissante des énergies renouvelables intermittentes présentées au chapitre 1.

Chapitre 3 Consommations, réserves et évolutions des ressources d'énergie

Chapitre 3. Consommations, réserves et évolutions des ressources d'énergie

3.1. Introduction

Après avoir présenté les différentes ressources énergétiques disponibles (chapitre 1) et les moyens de stocker l'énergie produite (chapitre 2), il convient à présent de s'interroger sur la disponibilité de ces ressources dans le temps : combien de temps les réserves actuellement connues permettront-elles de satisfaire la demande mondiale, comment cette demande a-t-elle évolué et comment est-elle susceptible d'évoluer dans les décennies à venir ? Ce chapitre présente les notions de réserve et de ratio réserves/production, décrit l'évolution historique de la consommation mondiale d'énergie, et propose un aperçu des principaux scénarios d'évolution envisagés par les organismes internationaux.

3.2. Évolution de la consommation mondiale d'énergie

La consommation mondiale d'énergie primaire a connu une croissance quasiment continue depuis le début de l'ère industrielle, portée par la croissance démographique, le développement économique et l'industrialisation progressive de l'ensemble des régions du monde. Cette croissance s'est accompagnée d'une transformation profonde de la structure du mix énergétique mondial : le charbon, dominant au XIXe siècle et pendant une bonne partie du XXe siècle, a progressivement cédé une part de sa position au pétrole puis au gaz naturel, tandis que l'énergie nucléaire s'est développée à partir des années 1970 et que les énergies renouvelables, longtemps marginales à l'échelle mondiale (hors hydraulique et biomasse traditionnelle), connaissent depuis les années 2000 une croissance particulièrement rapide, portée par la baisse continue des coûts du solaire photovoltaïque et de l'éolien.

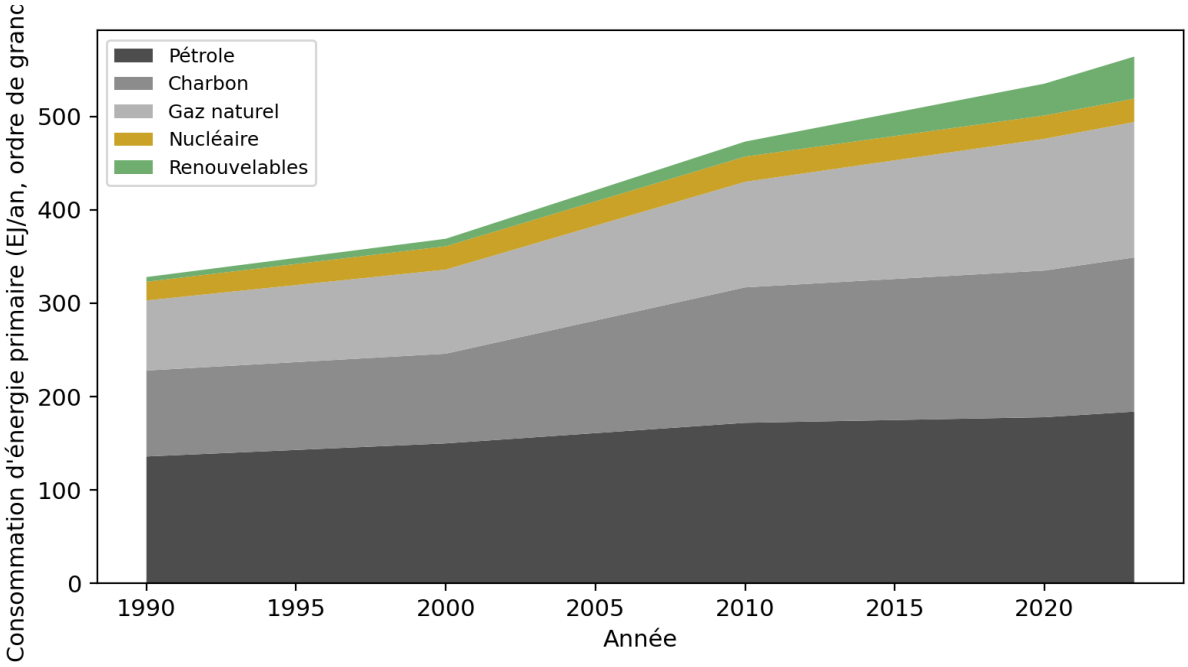


Figure 3.1 Évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire par source (ordres de grandeur, en exajoules par an).

On observe sur cette évolution que si la part relative des énergies renouvelables et du nucléaire progresse, la consommation absolue de ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz) continue globalement d'augmenter en valeur absolue à l'échelle mondiale, la croissance de la demande totale d'énergie étant, pour l'instant, plus rapide que la substitution des ressources fossiles par des alternatives bas carbone. Cette observation constitue l'un des enjeux centraux de la transition énergétique évoquée en fin de chapitre.

3.3. La notion de réserve énergétique

3.3.1. Réserves prouvées, probables et possibles

La notion de réserve énergétique, en particulier pour les ressources fossiles et l'uranium, ne désigne pas une quantité physique fixe et connue avec certitude, mais une estimation économique et technique, qui évolue dans le temps en fonction des découvertes de nouveaux gisements, des progrès technologiques d'extraction, et du prix de marché de la ressource. On distingue classiquement les réserves prouvées (ou certaines), correspondant aux quantités que l'on peut extraire avec un haut degré de confiance dans les conditions économiques et technologiques actuelles, des réserves probables et des réserves possibles, dont le degré de certitude géologique et économique est respectivement plus faible. Les ressources, enfin, désignent des quantités identifiées mais non encore exploitables dans les conditions économiques et technologiques actuelles, qui peuvent devenir des réserves si les prix augmentent ou si de nouvelles technologies d'extraction se développent (c'est notamment le

cas des hydrocarbures de roche-mère, ou schistes, devenus exploitables grâce aux techniques de fracturation hydraulique et de forage horizontal).

3.3.2. Le ratio réserve sur production (R/P)

Le ratio réserves sur production (R/P), exprimé en années, est l'indicateur le plus couramment utilisé pour donner un ordre de grandeur de la durée de disponibilité d'une ressource. Il se calcule simplement en divisant les réserves prouvées actuelles par le rythme annuel actuel de production :

R/P (années) = Réserves prouvées / Production annuelle

Il est essentiel de souligner les limites de cet indicateur, souvent mal interprété comme une date d'épuisement certaine de la ressource. En réalité, le ratio R/P varie dans le temps, à la hausse comme à la baisse, en fonction de trois facteurs qui évoluent simultanément : la découverte de nouveaux gisements ou l'amélioration des techniques d'extraction, qui augmentent le numérateur (réserves) ; l'évolution du rythme de production, qui modifie le dénominateur ; et le prix de marché, qui peut rendre économiquement exploitables des ressources auparavant classées comme non rentables. Historiquement, le ratio R/P du pétrole est ainsi resté relativement stable, voire a légèrement augmenté sur plusieurs décennies, malgré une production continue, précisément parce que de nouvelles réserves ont régulièrement été découvertes ou rendues exploitables.

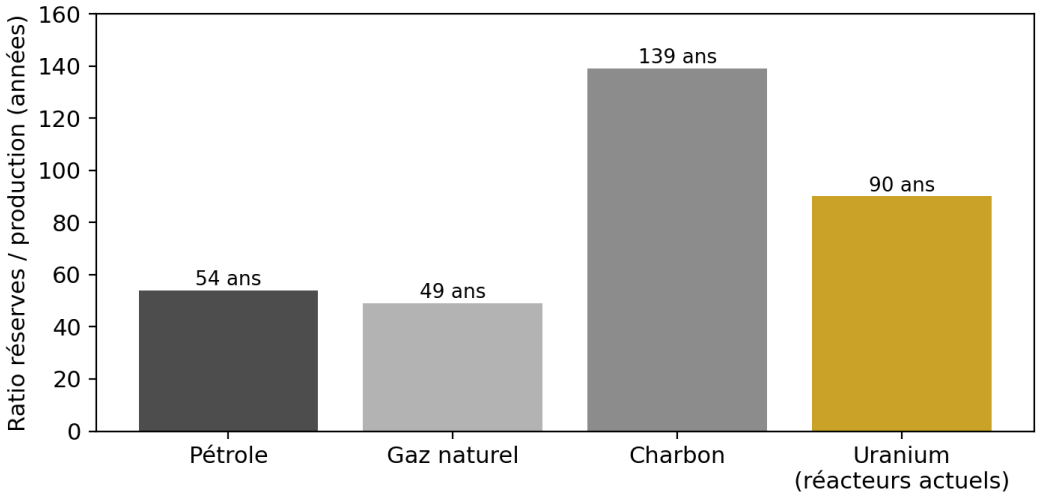


Figure 3.2 Ratio réserves/production (R/P) approximatif pour différentes ressources énergétiques.

3.3.3. Ressources non conventionnelles et effet sur les réserves

Le développement des ressources dites non conventionnelles a profondément modifié la perception des réserves mondiales de pétrole et de gaz au cours des deux dernières

décennies. Le pétrole et le gaz de roche-mère (schistes), piégés dans des formations géologiques peu perméables et longtemps considérées comme non exploitables économiquement, sont devenus accessibles grâce au développement combiné du forage horizontal et de la fracturation hydraulique, technique consistant à injecter sous haute pression un fluide (eau, sable et additifs chimiques) afin de créer un réseau de microfractures dans la roche, libérant les hydrocarbures piégés. Ce développement a notamment permis aux États-Unis de devenir, en quelques années, le premier producteur mondial de pétrole et de gaz naturel, bouleversant les équilibres géopolitiques historiques du secteur. Les sables bitumineux, présents en très grande quantité au Canada, constituent un autre exemple de ressource non conventionnelle, dont l'exploitation, plus coûteuse et plus émettrice en gaz à effet de serre que celle du pétrole conventionnel, n'est devenue rentable qu'à partir d'un certain niveau de prix du baril de pétrole sur les marchés mondiaux.

Ce déplacement de la frontière entre ressources et réserves, piloté par la technologie et par le prix de marché plutôt que par une découverte géologique nouvelle, illustre bien les limites déjà évoquées du ratio réserves/production comme indicateur de long terme : une ressource jugée non exploitable à un instant donné peut devenir une réserve prouvée quelques années plus tard, sans qu'aucune nouvelle quantité physique de la ressource n'ait été créée dans le sous-sol.

3.3.4. Étude de cas : évolution du ratio R/P mondial du pétrole

Le tableau suivant illustre l'évolution historique approximative du ratio réserves/production mondial du pétrole depuis 1980, qui met en évidence sa relative stabilité malgré une production cumulée considérable sur cette période, contredisant les prévisions d'épuisement rapide formulées à plusieurs reprises au cours de cette période.

Année	Réserves prouvées (milliards de barils, ordre de grandeur)	Ratio R/P (années)
1980	~ 640	~ 29
2000	~ 1 050	~ 40
2010	~ 1 380	~ 46
2023	~ 1 560	~ 54

On observe que le ratio R/P mondial du pétrole a globalement augmenté sur plus de quarante ans, malgré une consommation cumulée de plusieurs centaines de milliards de barils sur la même période : les découvertes de nouveaux gisements, l'amélioration des taux de récupération sur les champs existants, et le développement des ressources non

conventionnelles ont plus que compensé la production écoulée, confirmant que le ratio R/P doit être interprété comme un indicateur de tension du marché à un instant donné plutôt que comme une prédiction fiable de la date d'épuisement de la ressource.

3.4. Répartition géographique des réserves

Les réserves de ressources fossiles et d'uranium sont très inégalement réparties à la surface du globe, ce qui a des conséquences géopolitiques majeures sur les échanges internationaux d'énergie et sur la sécurité d'approvisionnement des pays importateurs. Les réserves de pétrole sont ainsi fortement concentrées au Moyen-Orient, qui rassemble à lui seul environ la moitié des réserves prouvées mondiales, avec en particulier l'Arabie saoudite, l'Iran et l'Irak parmi les principaux détenteurs, suivis de pays comme le Venezuela, la Russie et les États-Unis. Le gaz naturel présente une répartition un peu plus diversifiée, avec des réserves importantes en Russie, en Iran, au Qatar et aux États-Unis. Le charbon, à l'inverse, présente une répartition géographique plus équilibrée, avec des réserves importantes réparties entre les États-Unis, la Russie, l'Australie, la Chine et l'Inde, ce qui explique en partie pourquoi le charbon reste, malgré son impact environnemental, une ressource stratégique pour de nombreux pays soucieux de leur indépendance énergétique.

3.5. Scénarios d'évolution de la consommation énergétique

3.5.1. La notion de pic de production

La notion de pic de production (souvent désignée par l'expression anglaise peak oil pour le pétrole, mais transposable à d'autres ressources) désigne le moment où le rythme d'extraction annuel d'une ressource atteint son maximum historique, avant d'entamer un déclin inéluctable en raison de l'épuisement progressif des gisements les plus accessibles et les moins coûteux à exploiter. Si cette notion a longtemps focalisé les débats sur l'avenir énergétique mondial, notamment dans les années 2000 pour le pétrole conventionnel, les évolutions technologiques (exploitation des hydrocarbures non conventionnels, amélioration des techniques de récupération assistée) ont régulièrement repoussé l'échéance de ce pic prédit, illustrant les limites de toute prévision fondée sur une extrapolation simple des réserves connues à un instant donné.

3.5.2. Les scénarios de transition énergétique

Au-delà de la seule question de l'épuisement physique des ressources fossiles, la contrainte qui s'impose aujourd'hui de façon croissante aux scénarios d'évolution énergétique est d'ordre climatique et environnemental (voir chapitres 4 à 6) : la nécessité de réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre impose de limiter volontairement l'exploitation de réserves

fossiles pourtant encore disponibles, plutôt que d'attendre leur épuisement physique. Les scénarios de transition énergétique élaborés par les organismes internationaux (Agence internationale de l'énergie, GIEC) explorent ainsi des trajectoires contrastées, allant d'un scénario de prolongation des tendances actuelles (poursuite de la croissance de la consommation fossile) à des scénarios de transition rapide (électrification massive des usages, développement accéléré des énergies renouvelables et du stockage associé, sobriété énergétique), avec des implications très différentes sur le climat futur et sur la nécessité de laisser une part significative des réserves fossiles connues inexploitée.

3.6. Conclusion

Ce chapitre a présenté les notions permettant d'appréhender la disponibilité future des ressources énergétiques : distinction entre réserves et ressources, ratio réserves/production et ses limites, répartition géographique des réserves et enjeux géopolitiques associés, et principaux scénarios d'évolution de la consommation mondiale. Il apparaît que la question de la disponibilité future de l'énergie ne se limite plus aujourd'hui à celle de l'épuisement physique des réserves, mais intègre désormais de façon centrale la contrainte climatique, qui impose de repenser le rythme et la nature de l'exploitation des ressources énergétiques mondiales. Les chapitres suivants approfondiront précisément les impacts environnementaux de cette exploitation, à travers l'étude des différents types de pollutions qu'elle engendre.

Chapitre 4 Les différents types de pollutions

Chapitre 4. Les différents types de pollutions

4.1. Introduction

L'exploitation des ressources énergétiques présentées au chapitre 1, ainsi que l'ensemble des activités industrielles, agricoles et domestiques qui lui sont associées, s'accompagne inévitablement de rejets dans l'environnement, qui peuvent, au-delà d'un certain seuil, altérer la qualité des milieux naturels et présenter un risque pour la santé humaine et les écosystèmes : c'est ce que l'on désigne globalement par le terme de pollution. Ce chapitre propose une classification des principaux types de pollutions rencontrées, selon le milieu affecté (air, eau, sol) ou la nature physique de la nuisance (sonore, lumineuse, électromagnétique, thermique), en posant les bases nécessaires aux chapitres suivants consacrés à la détection, au traitement et aux impacts sanitaires et environnementaux de ces pollutions.

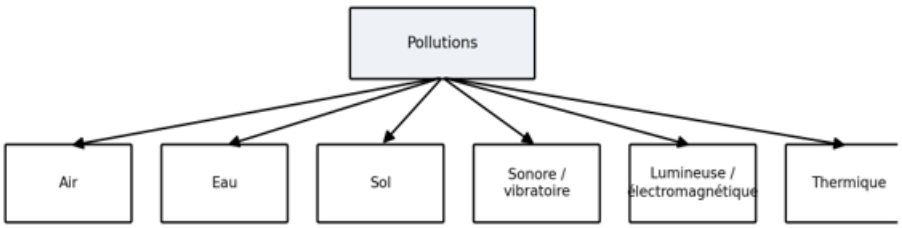


Figure 4.1 Classification des principaux types de pollutions selon le milieu ou la nature de la nuisance.

4.2. La pollution atmosphérique

4.2.1. Polluants primaires et polluants secondaires

On distingue les polluants atmosphériques primaires, émis directement par une source identifiable (cheminée industrielle, pot d'échappement, combustion domestique), des polluants secondaires, qui se forment dans l'atmosphère par des réactions chimiques ou photochimiques entre polluants primaires et composants naturels de l'air, sous l'effet notamment du rayonnement solaire. L'ozone troposphérique (à ne pas confondre avec la couche d'ozone stratosphérique, qui joue au contraire un rôle protecteur), formé par réaction photochimique entre les oxydes d'azote et les composés organiques volatils en présence de rayonnement ultraviolet, constitue l'exemple le plus caractéristique de polluant secondaire.

4.2.2. Principaux polluants atmosphériques

Parmi les polluants atmosphériques les plus surveillés figurent : les particules fines (notées PM10 et PM2,5 selon leur diamètre aérodynamique, respectivement inférieur à 10 et à 2,5

micromètres), issues de la combustion, de l'usure des freins et des pneumatiques, ou de processus industriels, dont la petite taille leur permet de pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire ; les oxydes d'azote (NOx), issus principalement de la combustion à haute température dans les moteurs et les installations industrielles ; le dioxyde de soufre (SO_2), issu de la combustion de combustibles fossiles soufrés (charbon, fioul lourd) ; le monoxyde de carbone (CO), produit d'une combustion incomplète ; et les composés organiques volatils (COV), émis par de nombreuses sources industrielles, les solvants, et certains produits domestiques.

4.2.3. Les gaz à effet de serre

Distincts des polluants atmosphériques classiques par leur mode d'action (ils n'ont généralement pas d'effet toxique direct à faible dose sur la santé humaine, mais modifient l'équilibre radiatif de l'atmosphère terrestre), les gaz à effet de serre méritent une mention particulière en raison de leur rôle central dans le changement climatique. Le dioxyde de carbone (CO_2), principal gaz à effet de serre d'origine anthropique en quantité, provient essentiellement de la combustion des ressources fossiles présentées au chapitre 1. Le méthane (CH_4), dont le pouvoir de réchauffement global à 20 ans est nettement supérieur à celui du CO_2 malgré une durée de vie atmosphérique plus courte, provient de l'agriculture (élevage, riziculture), des fuites lors de l'extraction et du transport du gaz naturel, et de la décomposition des déchets organiques en l'absence d'oxygène. Le protoxyde d'azote (N_2O) et les gaz fluorés (utilisés notamment dans les systèmes de réfrigération et de climatisation) complètent le panorama des principaux gaz à effet de serre d'origine anthropique.

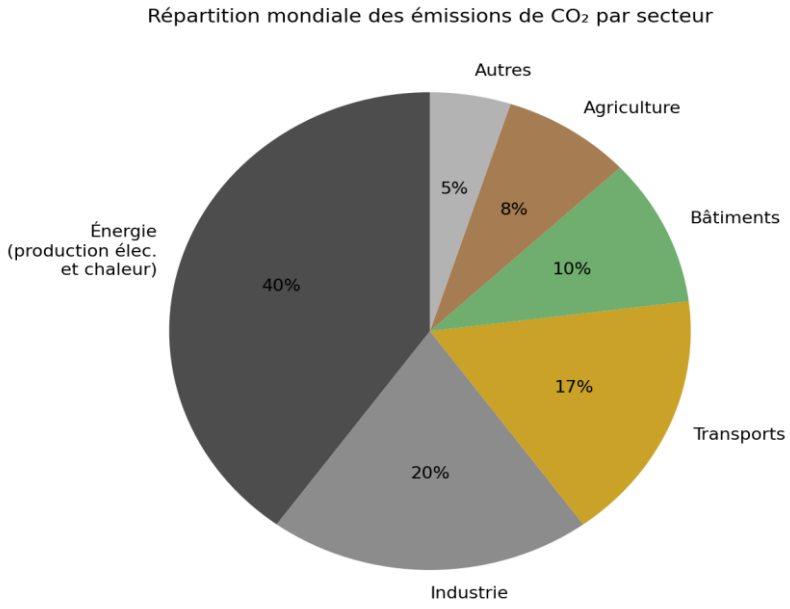


Figure 4.2 Répartition mondiale approximative des émissions de CO_2 par secteur d'activité.

4.2.4. La pollution de l'air intérieur

Bien que les politiques de surveillance et de réglementation se soient historiquement concentrées sur la pollution de l'air extérieur, la qualité de l'air intérieur constitue un enjeu sanitaire au moins aussi important, les individus passant en moyenne plus de 80 % de leur temps à l'intérieur de bâtiments (logements, bureaux, écoles). Les sources de pollution de l'air intérieur sont nombreuses et spécifiques : combustion domestique (cuisson, chauffage au bois ou au charbon dans les pays en développement, tabagisme), composés organiques volatils émis par les matériaux de construction, les peintures, les meubles et les produits d'entretien, moisissures liées à l'humidité, et, dans certains bâtiments anciens, présence résiduelle d'amiante ou de plomb. L'insuffisance de renouvellement d'air (ventilation) dans les bâtiments les plus étanches sur le plan thermique peut aggraver l'accumulation de ces polluants en l'absence d'un système de ventilation mécanique contrôlée adapté, créant une tension entre les objectifs de performance énergétique du bâtiment (chapitre 1 et 2) et ceux de qualité de l'air intérieur.

4.3. La pollution de l'eau

La pollution de l'eau peut affecter aussi bien les eaux de surface (rivières, lacs, mers) que les eaux souterraines (nappes phréatiques), avec des dynamiques de dispersion et de dépollution très différentes selon le milieu concerné. Les principales sources de pollution de l'eau incluent les rejets industriels (métaux lourds, solvants, hydrocarbures), les rejets agricoles (nitrates et phosphates issus des engrais, résidus de pesticides), les rejets domestiques (eaux usées non ou insuffisamment traitées, voir chapitre 5), et les pollutions accidentelles (marées noires, déversements industriels accidentels). Les nutriments en excès (azote et phosphore), bien que non toxiques en eux-mêmes à faible dose, provoquent un phénomène d'eutrophisation lorsqu'ils sont présents en quantité excessive dans un plan d'eau : la prolifération d'algues et de plantes aquatiques qu'ils favorisent, suivie de leur décomposition, consomme l'oxygène dissous dans l'eau et peut conduire à l'asphyxie de la faune aquatique.

4.4. La pollution des sols

La pollution des sols résulte généralement de l'accumulation, sur un site donné, de substances polluantes issues d'une activité industrielle, agricole ou de la gestion inadéquate de déchets : hydrocarbures et solvants sur les anciens sites industriels, métaux lourds à proximité des sites miniers et de certaines usines métallurgiques, pesticides et engrais en excès dans les sols agricoles, ou substances diverses sur les décharges non contrôlées. Contrairement à la pollution atmosphérique, qui se disperse relativement rapidement, la pollution des sols présente la particularité de rester souvent localisée et persistante pendant de très longues

durées, certains polluants (métaux lourds notamment) ne se dégradant pas naturellement, ce qui pose la question de la réhabilitation des sites pollués (dépollution, confinement, ou changement d'usage adapté au niveau de contamination résiduelle) avant toute réaffectation de ces terrains à un nouvel usage, notamment résidentiel.

4.5. Autres formes de pollution

4.5.1. Pollution sonore

La pollution sonore désigne l'exposition à des niveaux de bruit excessifs ou inappropriés au regard du contexte (habitat, travail, milieu naturel), provenant principalement du trafic routier, ferroviaire et aérien, des activités industrielles, ou du voisinage. Elle est quantifiée à l'aide du niveau de pression acoustique, exprimé en décibels (dB), sur une échelle logarithmique qui rend compte de la perception non linéaire de l'intensité sonore par l'oreille humaine.

4.5.2. Pollution lumineuse et électromagnétique

La pollution lumineuse résulte de l'éclairage artificiel nocturne excessif ou mal orienté, qui perturbe les cycles biologiques de nombreuses espèces animales (notamment les insectes nocturnes et certains oiseaux migrateurs) et réduit la visibilité du ciel étoilé. La pollution électromagnétique, quant à elle, désigne l'exposition aux champs électromagnétiques émis par les infrastructures électriques (lignes à haute tension) et les équipements de télécommunication (antennes relais, réseaux sans fil), dont les effets sanitaires à long terme, pour les niveaux d'exposition rencontrés dans la vie courante, font l'objet d'un suivi scientifique et réglementaire continu.

4.5.3. Pollution thermique

La pollution thermique désigne l'élévation localisée et anormale de la température d'un milieu, le plus souvent aquatique, causée par le rejet d'eaux de refroidissement industrielles (centrales thermiques et nucléaires notamment) à une température supérieure à celle du milieu récepteur. Cette élévation de température, même modérée, peut perturber significativement les écosystèmes aquatiques, en réduisant la solubilité de l'oxygène dans l'eau et en modifiant les cycles biologiques (reproduction, migration) de nombreuses espèces sensibles aux variations thermiques.

4.6. Synthèse : sources et milieux affectés

Le tableau suivant synthétise, pour chacune des grandes catégories de pollution présentées dans ce chapitre, les principales sources d'émission et le ou les milieux environnementaux les plus directement affectés.

Type de pollution	Sources principales	Milieu(x) affecté(s)
Atmosphérique	Combustion fossile, transports, industrie, agriculture	Air ; retombées sur sol et eau
Eau	Rejets industriels, agricoles et domestiques	Eaux de surface, eaux souterraines
Sol	Sites industriels, décharges, agriculture intensive	Sol, puis eaux souterraines par infiltration
Sonore	Transports, industrie, voisinage	Air (propagation acoustique)
Lumineuse / électromagnétique	Éclairage public, télécommunications, lignes électriques	Air, faune nocturne
Thermique	Rejets de refroidissement industriels	Eaux de surface

4.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté une classification des principaux types de pollutions générées par les activités humaines, qu'il s'agisse de la pollution atmosphérique, de la pollution de l'eau, de la pollution des sols, ou des pollutions sonore, lumineuse, électromagnétique et thermique. Cette classification par milieu ou par nature physique de la nuisance constitue le point de départ indispensable pour aborder, dans les chapitres suivants, les méthodes de détection et de traitement de ces pollutions (chapitre 5), puis leurs impacts sur la santé humaine et sur les écosystèmes.

Chapitre 5 Détection et traitement des polluants et des déchets

Chapitre 5. Détection et traitement des polluants et des déchets

5.1. Introduction

Le chapitre précédent a présenté les différents types de pollutions susceptibles d'affecter l'air, l'eau et les sols. Une fois ces pollutions identifiées, deux enjeux techniques se posent : d'une part, détecter et quantifier la présence de polluants dans l'environnement, afin de vérifier la conformité aux normes réglementaires et de suivre l'évolution de la qualité des milieux ; d'autre part, traiter les effluents et les déchets produits par les activités humaines avant leur rejet dans l'environnement, afin d'en réduire autant que possible la charge polluante. Ce chapitre présente les principales méthodes de détection de la pollution atmosphérique, les procédés de traitement des eaux usées, la gestion hiérarchisée des déchets solides, et les techniques de traitement des effluents gazeux industriels.

5.2. Détection et mesure de la pollution atmosphérique

La surveillance de la qualité de l'air repose sur un réseau de stations de mesure, fixes ou mobiles, équipées d'analyseurs automatiques capables de mesurer en continu la concentration des principaux polluants réglementés (particules PM10 et PM2,5, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre, ozone, monoxyde de carbone). Ces analyseurs reposent sur des principes physico-chimiques variés selon le polluant visé : les analyseurs de particules utilisent le plus souvent des méthodes optiques (diffusion de la lumière par les particules en suspension) ou gravimétriques (pesée d'un filtre avant et après collecte d'un volume d'air connu) ; les analyseurs d'ozone exploitent l'absorption caractéristique du rayonnement ultraviolet par la molécule d'ozone ; les analyseurs d'oxydes d'azote reposent sur la chimiluminescence, une réaction chimique entre le monoxyde d'azote et l'ozone produisant une émission lumineuse dont l'intensité est proportionnelle à la concentration du polluant.

Ces mesures continues sont complétées par le calcul d'indices synthétiques de qualité de l'air, qui agrègent les concentrations des différents polluants mesurés en une échelle simple et compréhensible par le grand public (généralement graduée de « bon » à « très mauvais » ou « extrêmement mauvais »), facilitant la communication du niveau de risque sanitaire du jour et l'émission éventuelle de recommandations comportementales (limitation des activités physiques extérieures, restrictions de circulation) lors des épisodes de pollution les plus sévères.

5.3. Traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées, réalisé dans des stations d'épuration, vise à réduire la charge polluante des eaux usées domestiques et industrielles avant leur rejet dans le milieu naturel, en éliminant successivement les matières les plus grossières, puis les matières en suspension, puis la pollution dissoute biodégradable, et enfin, selon les exigences réglementaires locales, les micro-organismes pathogènes et certains polluants spécifiques résiduels.

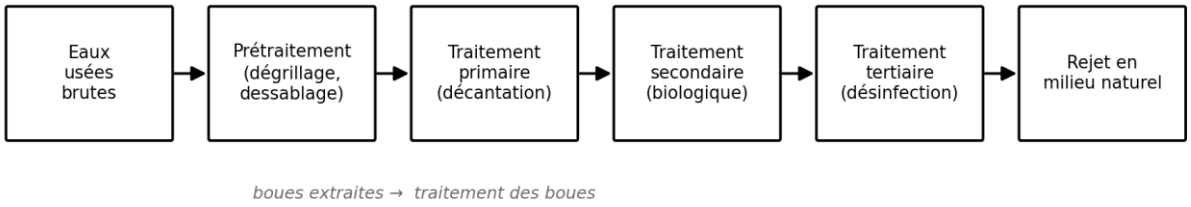


Figure 5.1 Schéma synoptique des étapes successives d'une station d'épuration des eaux usées.

5.3.1. Le prétraitement

Le prétraitement comprend une succession d'opérations physiques simples destinées à protéger les équipements situés en aval : le dégrillage retient les déchets solides grossiers (lingettes, plastiques, débris divers) à l'aide de grilles de maillage décroissant ; le dessablage élimine, par décantation gravitaire dans un bassin à faible vitesse d'écoulement, les particules minérales denses (sables, graviers) ; le déshuilage-dégraissage retire les graisses et les huiles flottant à la surface de l'eau, par différence de densité.

5.3.2. Le traitement primaire

Le traitement primaire consiste en une décantation prolongée de l'eau prétraitée dans de grands bassins, permettant aux matières en suspension les plus fines de sédimenter progressivement au fond du bassin sous l'effet de la gravité, formant des boues primaires qui sont extraites périodiquement, tandis que l'eau clarifiée poursuit son parcours vers le traitement secondaire.

5.3.3. Le traitement secondaire (biologique)

Le traitement secondaire, souvent qualifié de traitement biologique, exploite l'activité de micro-organismes (bactéries principalement) cultivés en grande quantité dans des bassins

spécifiquement conçus (bassins à boues activées, lits bactériens, disques biologiques), qui dégradent la pollution organique dissoute présente dans l'eau en la consommant comme source de nourriture, la transformant en biomasse bactérienne, en dioxyde de carbone et en eau. Cette biomasse bactérienne excédentaire, appelée boue biologique ou boue activée, est ensuite séparée de l'eau traitée par décantation dans un clarificateur, avant d'être extraite du circuit pour traitement des boues, tandis qu'une partie de cette boue est recirculée vers le bassin biologique afin de maintenir une population bactérienne active suffisante.

5.3.4. Le traitement tertiaire

Le traitement tertiaire, mis en œuvre lorsque les exigences réglementaires de rejet sont particulièrement strictes (rejet en zone sensible, réutilisation des eaux traitées), vise à éliminer les polluants résiduels non traités par les étapes précédentes : désinfection par rayonnement ultraviolet, chloration ou ozonation pour éliminer les micro-organismes pathogènes résiduels ; élimination poussée de l'azote et du phosphore, nutriments responsables de l'eutrophisation évoquée au chapitre 4, par des procédés biologiques ou physico-chimiques spécifiques ; et, dans certains cas, filtration sur charbon actif ou par membranes pour retenir des micropolluants spécifiques (résidus médicamenteux, pesticides).

5.4. Traitement des déchets solides

5.4.1. La hiérarchie des déchets

La gestion moderne des déchets solides s'organise selon une hiérarchie de priorités, généralement représentée sous forme pyramidale, qui privilégie systématiquement les solutions les plus favorables sur le plan environnemental avant de recourir aux solutions les moins souhaitables.

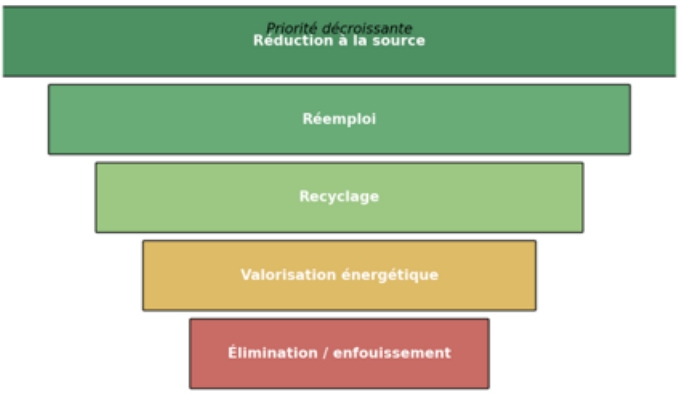


Figure 5.2 Hiérarchie des modes de gestion des déchets, de la réduction à la source à l'élimination.

La réduction à la source, priorité absolue de cette hiérarchie, consiste à éviter la production même du déchet, par l'écoconception des produits, la réduction des emballages ou la modification des pratiques de consommation. Le réemploi consiste à réutiliser un produit ou un composant sans le transformer, pour son usage initial ou un usage différent. Le recyclage consiste à transformer la matière constitutive d'un déchet pour en faire une nouvelle matière première, réintégrée dans un nouveau cycle de production (recyclage du verre, du papier, des métaux, de certains plastiques). La valorisation énergétique consiste à récupérer l'énergie contenue dans un déchet non recyclable, le plus souvent par incinération avec récupération de la chaleur produite pour du chauffage urbain ou de la production électrique. L'élimination par enfouissement en installation de stockage contrôlée, enfin, constitue la solution de dernier recours, réservée aux déchets ultimes ne pouvant faire l'objet d'aucune des solutions précédentes.

5.4.2. Incinération et enfouissement

L'incinération des déchets, réalisée dans des installations dédiées équipées de systèmes de traitement des fumées (voir section 5.5), permet de réduire considérablement le volume des déchets (typiquement d'un facteur 10) tout en récupérant une partie de leur contenu énergétique sous forme de chaleur ou d'électricité, mais génère des résidus solides (mâchefers, cendres volantes) qui doivent eux-mêmes faire l'objet d'une gestion appropriée, certains d'entre eux étant classés comme déchets dangereux en raison de leur concentration en métaux lourds. L'enfouissement en installation de stockage de déchets, quant à lui, nécessite une conception rigoureuse (étanchéité du fond de casier, captage des lixiviats, c'est-à-dire les liquides percolant à travers les déchets stockés, et captage du biogaz produit par la décomposition anaérobie des déchets organiques, notamment le méthane) afin de prévenir toute pollution des sols et des eaux souterraines environnantes sur le long terme.

5.5. Traitement des effluents gazeux industriels

Les installations industrielles émettrices de polluants atmosphériques (centrales thermiques, incinérateurs, cimenteries, aciéries) sont équipées de dispositifs de traitement des fumées avant rejet à la cheminée, dont le choix dépend de la nature du polluant à traiter. Les dépoussiéreurs (électrofiltres, filtres à manches) retiennent les particules solides en suspension dans les fumées, soit par attraction électrostatique après ionisation des particules (électrofiltres), soit par filtration mécanique à travers un média filtreux (filtres à manches). Les systèmes de désulfuration éliminent le dioxyde de soufre, le plus souvent par lavage des fumées à l'aide d'une suspension de calcaire ou de chaux, qui réagit chimiquement avec le SO_2 pour former du gypse valorisable. Les systèmes de dénitrification réduisent les oxydes d'azote, notamment par réduction catalytique sélective, une technique injectant de l'ammoniac

ou de l'urée en présence d'un catalyseur pour convertir les NOx en azote et en eau, inoffensifs pour l'atmosphère.

5.6. Technologies avancées de détection et de traitement

Au-delà des méthodes classiques présentées dans ce chapitre, plusieurs technologies plus récentes complètent aujourd'hui l'arsenal de détection et de traitement de la pollution. La télédétection par satellite permet de cartographier à grande échelle certains polluants atmosphériques (dioxyde d'azote, méthane, particules) directement depuis l'espace, offrant une couverture géographique bien supérieure à celle des réseaux de stations de mesure au sol, au prix d'une résolution spatiale et temporelle généralement moins fine. Les capteurs à bas coût, de plus en plus répandus, permettent de densifier localement les réseaux de surveillance de la qualité de l'air, notamment en milieu urbain, bien que leur précision métrologique reste généralement inférieure à celle des analyseurs de référence utilisés par les réseaux officiels.

Du côté du traitement, la filtration membranaire (microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse) permet un traitement tertiaire poussé des eaux usées, capable de retenir des micropolluants de très petite taille (résidus médicamenteux, certains perturbateurs endocriniens) que les traitements biologiques classiques n'éliminent que partiellement, ouvrant la voie à la réutilisation des eaux usées traitées pour des usages ne nécessitant pas une eau potable (irrigation agricole, usages industriels, recharge de nappes), une pratique appelée à se développer dans les régions soumises à un stress hydrique croissant.

5.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté les principales méthodes de détection de la pollution atmosphérique, ainsi que les procédés de traitement des eaux usées, des déchets solides et des effluents gazeux industriels. La maîtrise de ces techniques constitue un levier essentiel pour réduire la charge polluante rejetée dans l'environnement par les activités humaines, en complément des efforts de réduction à la source des émissions elles-mêmes. Le chapitre suivant examinera les impacts que ces pollutions, lorsqu'elles ne sont pas suffisamment détectées ou traitées, peuvent avoir sur la santé humaine et sur les écosystèmes.

Chapitre 6 Impact des pollutions sur la santé et l'environnement

Chapitre 6. Impact des pollutions sur la santé et l'environnement

6.1. Introduction

Les chapitres précédents ont présenté les différents types de pollutions générées par les activités humaines (chapitre 4), ainsi que les méthodes permettant de les détecter et de les traiter (chapitre 5). Ce dernier chapitre s'intéresse aux conséquences de ces pollutions, lorsqu'elles ne sont pas suffisamment maîtrisées, sur la santé humaine et sur les écosystèmes naturels. Il présente la notion de voie d'exposition et de relation dose-réponse, les principaux effets sanitaires associés aux polluants les plus courants, les impacts des pollutions sur la biodiversité et les grands équilibres écologiques, et enfin le mécanisme et les conséquences du changement climatique, aboutissement le plus global des pollutions atmosphériques présentées dans ce module.

6.2. Voies d'exposition et relation dose-réponse

6.2.1. Les voies d'exposition

Un polluant présent dans l'environnement ne présente un risque pour la santé humaine que s'il existe une voie d'exposition effective entre la source de pollution et l'organisme. On distingue classiquement trois voies principales d'exposition : l'inhalation, voie principale d'exposition aux polluants atmosphériques (particules, gaz), qui met en jeu l'appareil respiratoire et permet, pour les particules les plus fines, un passage direct dans la circulation sanguine ; l'ingestion, voie principale d'exposition aux polluants de l'eau et des aliments (contamination des cultures par des sols pollués, bioaccumulation dans la chaîne alimentaire) ; et le contact cutané, voie d'exposition pour certains polluants directement en contact avec la peau (certains solvants, pesticides lors de leur manipulation).

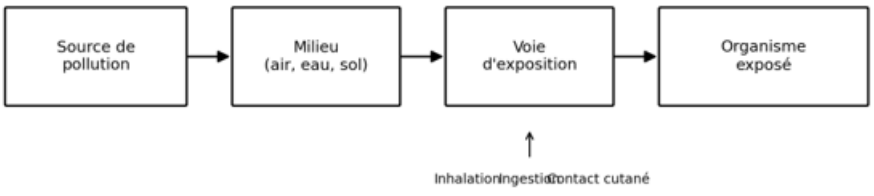


Figure 6.1 Voies d'exposition d'un organisme à une source de pollution.

6.2.2. La relation dose-réponse

La relation dose-réponse (ou dose-effet) décrit comment l'intensité d'un effet biologique observé varie en fonction de la dose de polluant reçue par un organisme. Pour de nombreux polluants classiques (à effet toxique non génotoxique), cette relation présente un seuil, c'est-à-dire une dose en dessous de laquelle aucun effet délétère mesurable n'est observé, l'organisme disposant de mécanismes de détoxification ou de réparation suffisants pour compenser l'exposition ; ce seuil expérimental, généralement déterminé lors d'essais toxicologiques, est appelé NOAEL (No Observed Adverse Effect Level, ou dose sans effet nocif observé). Pour d'autres polluants, en particulier les substances génotoxiques et cancérigènes (susceptibles d'endommager directement l'ADN), on considère par précaution qu'il n'existe pas de seuil d'innocuité : toute dose, même infime, est supposée porter un risque non nul, proportionnel à la dose reçue (modèle dit linéaire sans seuil).

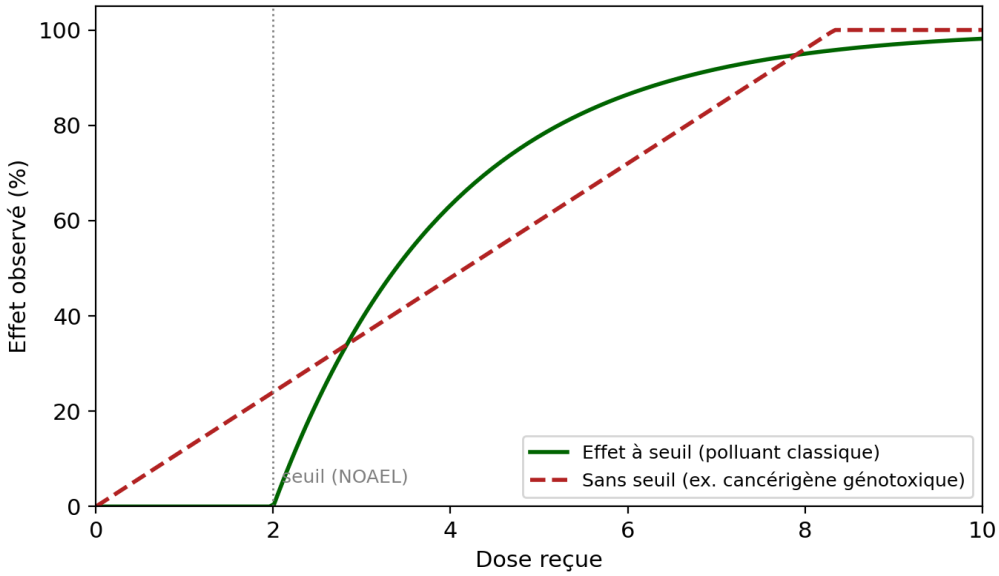


Figure 6.2 Comparaison schématique d'une relation dose-réponse à seuil et d'une relation linéaire sans seuil.

Cette distinction a des conséquences réglementaires majeures : pour les polluants à seuil, les normes d'exposition sont fixées en appliquant une marge de sécurité (facteur de sécurité, souvent de 100 ou plus) en dessous du NOAEL déterminé expérimentalement, afin de tenir compte des incertitudes et de la variabilité de sensibilité entre individus ; pour les polluants sans seuil, la réglementation vise généralement à réduire l'exposition au niveau le plus bas raisonnablement atteignable (principe ALARA, As Low As Reasonably Achievable), sans pouvoir garantir un risque strictement nul.

6.3. Effets des pollutions sur la santé humaine

6.3.1. Effets respiratoires et cardiovasculaires

L'exposition chronique aux particules fines et aux polluants atmosphériques gazeux (ozone, dioxyde d'azote) est associée à une augmentation démontrée des pathologies respiratoires (aggravation de l'asthme, bronchites chroniques, réduction de la fonction respiratoire) et cardiovasculaires (hypertension, infarctus, accidents vasculaires cérébraux), ces dernières résultant notamment d'un phénomène d'inflammation systémique de bas grade induit par la pénétration des particules les plus fines dans la circulation sanguine. Les populations les plus vulnérables à ces effets incluent les enfants, dont l'appareil respiratoire est encore en développement, les personnes âgées, et les personnes déjà atteintes de pathologies respiratoires ou cardiovasculaires préexistantes.

6.3.2. Effets cancérigènes

Plusieurs polluants environnementaux sont classés comme cancérigènes avérés ou probables pour l'homme par les organismes internationaux de référence, sur la base d'études épidémiologiques et toxicologiques convergentes : c'est notamment le cas de certains hydrocarbures aromatiques polycycliques (issus de combustions incomplètes), de l'amiante (utilisé historiquement comme isolant et aujourd'hui interdit dans de nombreux pays), de certains métaux lourds (arsenic, chrome hexavalent, cadmium), et, plus récemment, de la pollution atmosphérique par les particules fines elle-même, classée cancérigène avérée pour le poumon depuis 2013 par le Centre international de recherche sur le cancer.

6.3.3. Effets sur le développement et la reproduction

Certains polluants, qualifiés de perturbateurs endocriniens, interfèrent avec le système hormonal des organismes exposés, même à de très faibles doses, en imitant, bloquant ou modifiant l'action des hormones naturelles. Une exposition à ces substances durant des périodes critiques du développement (grossesse, petite enfance) peut avoir des conséquences durables sur le développement neurologique, la fertilité future ou la survenue de certaines pathologies à l'âge adulte, ce qui justifie une vigilance réglementaire particulière concernant l'exposition des femmes enceintes et des jeunes enfants à ces substances, indépendamment des seuils habituels de toxicité aiguë.

6.4. Impacts des pollutions sur les écosystèmes

6.4.1. Acidification des milieux

Les émissions atmosphériques de dioxyde de soufre et d'oxydes d'azote, en se combinant à l'humidité atmosphérique, forment respectivement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique,

qui retombent au sol sous forme de pluies acides, parfois à grande distance de leur source d'émission. Ces retombées acides peuvent altérer durablement la chimie des sols et des eaux de surface, perturber la croissance forestière (dépérissement des forêts observé dans plusieurs régions d'Europe et d'Amérique du Nord dans les années 1980), et acidifier les lacs et cours d'eau au point de menacer la survie de nombreuses espèces aquatiques sensibles au pH, notamment certaines espèces de poissons.

6.4.2. Eutrophisation et perte de biodiversité aquatique

L'eutrophisation des milieux aquatiques, déjà évoquée au chapitre 4 sous l'angle de la pollution de l'eau, constitue également une menace majeure pour la biodiversité aquatique : la prolifération d'algues qu'elle favorise peut réduire fortement la pénétration de la lumière dans l'eau, affectant les plantes aquatiques situées en profondeur, tandis que la désoxygénation consécutive à la décomposition de cette biomasse algale peut créer des zones dites mortes, où la concentration en oxygène dissous devient trop faible pour permettre la survie de la plupart des organismes aquatiques, comme cela est observé de façon récurrente dans certaines zones côtières fortement soumises aux apports agricoles.

6.4.3. Bioaccumulation et bioamplification

Certains polluants persistants et peu solubles dans l'eau, en particulier certains métaux lourds (mercure) et certains composés organiques persistants (dérivés de pesticides organochlorés aujourd'hui interdits, dioxines), présentent une forte affinité pour les tissus graisseux des organismes vivants, ce qui provoque leur accumulation progressive dans les tissus au fil du temps (bioaccumulation individuelle), puis leur concentration croissante à chaque niveau de la chaîne alimentaire (bioamplification ou bioconcentration trophique), les prédateurs situés au sommet de la chaîne alimentaire (grands poissons prédateurs, mammifères marins, rapaces) présentant ainsi des concentrations de polluants souvent plusieurs ordres de grandeur supérieures à celles mesurées dans le milieu environnant lui-même, avec des conséquences potentiellement graves sur leur reproduction et leur survie.

6.5. Le changement climatique : mécanisme et conséquences

6.5.1. Le mécanisme de l'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel indispensable à la vie telle que nous la connaissons : sans lui, la température moyenne de la surface terrestre serait inférieure d'environ 33 °C à sa valeur actuelle. Le rayonnement solaire, essentiellement dans le domaine visible, traverse l'atmosphère et réchauffe la surface terrestre, qui réémet à son tour un rayonnement infrarouge de plus grande longueur d'onde. Ce rayonnement infrarouge est en partie absorbé par les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère (vapeur d'eau, CO_2, méthane,

protoxyde d'azote, entre autres), qui le réémettent ensuite dans toutes les directions, y compris vers la surface terrestre, retenant ainsi une partie de la chaleur qui, en l'absence de ces gaz, se serait dissipée directement vers l'espace. L'augmentation de la concentration atmosphérique de ces gaz, résultant des activités humaines présentées au chapitre 4, renforce artificiellement cet effet de serre naturel, provoquant un déséquilibre radiatif qui se traduit par une accumulation progressive de chaleur dans le système climatique terrestre.

6.5.2. Les conséquences observées et projetées du changement climatique

Les conséquences du changement climatique, déjà mesurables aujourd'hui et amenées à s'intensifier selon les scénarios d'émissions futures évoqués au chapitre 3, incluent : l'augmentation de la température moyenne de surface, avec une hausse déjà supérieure à 1,1 °C par rapport à l'ère préindustrielle ; la multiplication et l'intensification des événements météorologiques extrêmes (vagues de chaleur, sécheresses, précipitations intenses, cyclones plus intenses) ; l'élévation du niveau moyen des mers, résultant à la fois de la dilatation thermique de l'eau de mer et de la fonte des glaciers continentaux et des calottes polaires ; l'acidification des océans, résultant de l'absorption d'une partie du CO_2 atmosphérique par les eaux marines, qui menace notamment les organismes à squelette ou coquille calcaire (coraux, mollusques) ; et des perturbations profondes des écosystèmes terrestres et marins, avec des déplacements d'aires de répartition de nombreuses espèces et des risques accrus d'extinction pour les espèces les moins capables de s'adapter ou de migrer suffisamment rapidement.

6.5.3. Atténuation et adaptation : deux réponses complémentaires

Face au changement climatique, deux grandes catégories de réponses sont généralement distinguées. L'atténuation regroupe l'ensemble des actions visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre à la source, ou à en renforcer l'absorption (puits de carbone naturels comme les forêts et les océans, ou technologies de captage et stockage du carbone) : développement des énergies renouvelables et du nucléaire (chapitre 1), amélioration de l'efficacité énergétique, sobriété des usages, électrification des transports. L'adaptation, quant à elle, regroupe les mesures visant à réduire la vulnérabilité des sociétés et des écosystèmes aux conséquences du changement climatique déjà engagées ou inévitables à court et moyen terme, quel que soit le succès des efforts d'atténuation futurs : adaptation des cultures agricoles à des conditions climatiques modifiées, renforcement des infrastructures face aux événements extrêmes, gestion adaptative des ressources en eau, ou recul stratégique de certaines activités humaines dans les zones littorales les plus exposées à la montée des eaux.

Ces deux réponses ne sont pas substituables l'une à l'autre : l'atténuation seule, même ambitieuse, ne peut annuler les effets du changement climatique déjà engagés par les émissions passées (en raison de la longue durée de vie atmosphérique du CO_2, voir section

6.5.1), ce qui rend l'adaptation indispensable à court et moyen terme ; inversement, une adaptation seule, sans effort d'atténuation suffisant, conduirait à devoir s'adapter à des changements climatiques d'une ampleur croissante et potentiellement ingérable au-delà d'un certain seuil de réchauffement. La plupart des stratégies climatiques nationales et internationales combinent donc aujourd'hui ces deux approches de façon complémentaire.

6.6. Conclusion

Ce dernier chapitre a présenté les mécanismes par lesquels les pollutions étudiées au chapitre 4 affectent la santé humaine, à travers les voies d'exposition et la relation dose-réponse, ainsi que les écosystèmes naturels, à travers les phénomènes d'acidification, d'eutrophisation et de bioaccumulation, avant de conclure sur le changement climatique, conséquence globale et systémique de l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'ensemble de ce module aura ainsi parcouru la chaîne complète des enjeux énergétiques et environnementaux contemporains : depuis les ressources énergétiques disponibles et leur stockage (chapitres 1 et 2), en passant par les questions de disponibilité et de réserves (chapitre 3), jusqu'aux pollutions générées par leur exploitation, à leur détection et à leur traitement (chapitres 4 et 5), et enfin à leurs conséquences ultimes sur la santé humaine et sur l'environnement (ce chapitre). Cette vision d'ensemble constitue le socle indispensable à toute réflexion éclairée sur la transition énergétique et environnementale à mener dans les décennies à venir.

Références bibliographiques

1. D. J. C. MacKay, « Sustainable Energy — Without the Hot Air », UIT Cambridge, 2008.

2. G. M. Masters, « Renewable and Efficient Electric Power Systems », 2nd ed., Wiley, 2013.

3. G. Boyle (Ed.), « Renewable Energy: Power for a Sustainable Future », 3rd ed., Oxford University Press, 2012.

4. J. Twidell, T. Weir, « Renewable Energy Resources », 3rd ed., Routledge, 2015.

5. J. Andrews, N. Jelley, « Energy Science: Principles, Technologies, and Impacts », 3rd ed., Oxford University Press, 2017.

6. P. Breeze, « Power Generation Technologies », 3rd ed., Newnes/Elsevier, 2019.

7. Agence Internationale de l'Énergie (AIE), « World Energy Outlook », rapport annuel.

8. B. Multon, « Stockage de l'énergie électrique », Techniques de l'Ingénieur.

9. R. A. Huggins, « Energy Storage: Fundamentals, Materials and Applications », 2nd ed., Springer, 2016.

10. T. M. Letcher (Ed.), « Storing Energy: With Special Reference to Renewable Energy Sources », 2nd ed., Elsevier, 2022.

11. M. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, « Energy Storage Systems—Characteristics and Comparisons », Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008.

12. J.-M. Chevalier, « Les grandes batailles de l'énergie », Gallimard, 2012.

13. GIEC (IPCC), « Climate Change 2021: The Physical Science Basis », Cambridge University Press, 2021.

14. GIEC (IPCC), « Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change », Cambridge University Press, 2022.

15. G. T. Miller, S. Spoolman, « Environmental Science », 15th ed., Cengage Learning, 2016.

16. S. E. Manahan, « Environmental Chemistry », 10th ed., CRC Press, 2017.

17. G. M. Masters, W. P. Ela, « Introduction to Environmental Engineering and Science », 3rd ed., Prentice Hall, 2007.

18. Metcalf & Eddy (rév. G. Tchobanoglous et al.), « Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery », 5th ed., McGraw-Hill, 2013.

19. M. L. Davis, D. A. Cornwell, « Introduction to Environmental Engineering », 5th ed., McGraw-Hill, 2013.

20. P. A. Vesilind, W. A. Worrell, D. R. Reinhart, « Solid Waste Engineering », 2nd ed., Cengage Learning, 2011.

21. Organisation Mondiale de la Santé (OMS), « Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air », 2021.

22. Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC/IARC), monographies sur les agents cancérigènes.

23. P. Baccini, P. H. Brunner, « Metabolism of the Anthroposphere », 2nd ed., MIT Press, 2012.

24. R. Deglise, « L'énergie dans le monde : ressources et technologies », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2010.

25. J.-M. Jancovici, « Le monde sans fin » (bande dessinée avec C. Blain), Dargaud, 2021.

26. C. Ngô, J. Natowitz, « Nos besoins en énergie : ressources, consommation, impact environnemental », EDP Sciences, 2018.

27. N. Armaroli, V. Balzani, « Energy for a Sustainable World », Wiley-VCH, 2011.