

Chapitre 01

Les différentes ressources d'énergie

L'énergie est un facteur essentiel du développement et de l'évolution des sociétés humaines, que cela soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie ou sur le plan du développement des activités industrielles.

L'énergie est ce qui permet de fournir un travail, de faire fonctionner des machines. Il existe pour nous de nombreuses sources d'énergie (pétrole-charbon-gaz, nucléaire, solaire, eau, éolien, biomasse, ...)

1. Différentes formes d'énergies

L'énergie existe sous de multiples formes :

- Énergie mécanique
- Énergie chimique
- Énergie électrique
- Énergie rayonnante
- Énergie éolienne
- Énergie nucléaire

2. Les sources d'énergies

1) Les sources d'énergie sont :

- ✓ Soit des matières premières
- ✓ Soit des phénomènes naturels employés pour produire de l'énergie.

2) On distingue :

- ✓ Les énergies fossiles.
- ✓ Les énergies renouvelables.

2.1. Les énergies fossiles

Le charbon, le pétrole et le gaz naturel proviennent de la décomposition de végétaux et d'organismes vivants qui ont été enfouis sous la terre. Les ressources diminuent quand on les utilise car il leur faut des millions d'années pour se former et sont donc des sources d'énergies non renouvelable.

A) Les carburants issus du pétrole.

Le pétrole brut, est une huile minérale foncée et visqueuse qui viens du sous-sol, et qui provient des restes d'animaux et de végétaux morts, le pétrole est donc une source d'énergie fossile non renouvelable.

Le raffinage permet d'isoler ses divers constituants et d'obtenir, après épuration, des carburants. La combustion de ce carburant crée de l'énergie.

- **L'essence**

L'essence contient des métaux comme le plomb, rejetés dans l'air en même temps que les gaz d'échappement. Les rejets de plomb sont nocifs pour la santé et l'environnement.

- **Le gazole**

Le gazole est le carburant utilisé dans les moteurs Diesel. Le rendement énergétique du moteur Diesel est bien supérieur à celui du moteur à essence, il émet 14 fois plus de particules et il contient du soufre responsable de la formation de dioxyde de soufre SO₂. Ces particules sont responsables de la pollution de l'air.

- **Le kérosène**

Le pétrole peut devenir aussi après transformation, du kérosène, ce carburant est un peu plus lourd que l'essence mais plus léger que le gazole, il est utilisé pour les avions.

B) Le charbon

Le charbon est une matière combustible qui provient de résidus fossilisés de forêts. Lentement elles se sont transformées en charbon.

Quand l'homme a découvert le charbon il l'a utilisé pour chauffer les maisons ou faire tourner les machines des usines ou faire fonctionner les trains. Aujourd'hui on s'en sert encore pour produire de l'électricité, mais lorsqu'il brûle il émet beaucoup de CO². Cette émission de CO² est très polluante et accélère le réchauffement climatique. Le charbon est donc une source d'énergie fossile non renouvelable.

C) Le gaz

Il y a des millions d'années des organismes vivants microscopiques ont été enfouis dans le sol et se sont transformés en gaz naturel sous l'action d'une température élevée, d'une forte pression et de l'absence de contact avec l'air.

Ces poches de gaz naturel se trouvent entre 3 000 et 4 000 mètres sous la surface de la Terre. C'est un très bon combustible qu'on utilise par exemple pour faire la cuisine, chauffer l'eau des maisons et produire du chauffage.

Le gaz naturel est le moins polluant des combustibles fossiles, car sa combustion émet moins de particules et produit moins de CO₂.

2.2.Énergie nucléaire

L'énergie nucléaire provient également d'une matière première qui est l'uranium, c'est donc une énergie fossile. Cependant on la considère comme une alternative aux autres énergies fossiles car elle n'émet pas de CO₂ et offre une certaine indépendance énergétique même si elle suscite des problèmes de sécurité et de stockage des déchets radioactifs.

3. Energies renouvelables

Les énergies renouvelables, comme leur nom l'indique, ne sont pas des énergies fossiles. Appelées aussi énergies propres car provenant des phénomènes naturels (vent, rayonnement solaire), leur exploitation est en plein essor : elles ne permettent pas encore de remplacer les autres sources d'énergie mais offrent la possibilité de réduire de façon significative l'utilisation des combustibles fossiles.

3.1. Hydroélectricité

Les centrales hydrauliques convertissent l'énergie des cours d'eau, des chutes d'eau et même des marées ou de la houle et constituent une source d'énergie inépuisable et n'émettant pas de CO₂. En revanche, les conséquences sur le milieu aquatique ou l'environnement en général peuvent être importantes, notamment si la construction d'un barrage conduit à l'inondation de terres sur grande superficie (ex : barrage des Trois Gorges, en Chine).

3.2. Energie éolienne

Cette énergie verte est promise à un bel avenir au vu de son caractère inépuisable (capter un millième de l'énergie éolienne disponible sur Terre permettrait théoriquement de subvenir à la totalité des besoins mondiaux en électricité). Cependant elle reste à l'heure actuelle assez capricieuse puisqu'elle dépend de la force des vents et pose des problèmes de surface au sol et de nuisances sonores et visuelles.

3.3. Energie solaire

L'énergie lumineuse du soleil est recueillie grâce à des capteurs sur des panneaux solaires et est convertie en énergie électrique (solaire photovoltaïque) ou thermique (solaire thermique, comme pour les chauffe-eaux solaires). L'installation de panneaux photovoltaïques peut permettre aux particuliers de subvenir à plus de la moitié de leurs besoins en chauffage (eau et habitation).

3.4. Energie géothermique

Le principe est d'exploiter le flux géothermique naturel à la surface du globe. En général ce flux est assez faible et nécessite des dispositifs importants (forage...) pour pouvoir être capté. Ce type d'énergie ne dépend pas des conditions atmosphériques et a donc l'avantage d'être quasi continu. Les techniques se sont sophistiquées dans les pompes à chaleur géothermiques, qui absorbent la chaleur du sol via un réseau de capteurs horizontaux ou verticaux pour la restituer à l'intérieur du logement.

3.5. Biomasse

L'énergie de la biomasse est produite par combustion directe de matière biologique comme le bois ou par conversion en biocarburants. Même si la combustion produit des gaz à effet de serre, la biomasse reste une énergie renouvelable : la croissance des arbres absorbe autant de CO₂ que leur combustion n'en libère dans l'atmosphère.

3.6. Energie marémotrice

L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créés par les marées et causés par l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil. Elle est utilisée soit sous forme d'énergie potentielle - l'élévation du niveau de la mer, soit sous forme d'énergie cinétique - les courants de marée.

Chapitre 02

Stockage de l'énergie

L'équilibre offre demande d'électricité, nécessaire au fonctionnement des réseaux électriques, est aujourd'hui de plus en plus fragile. Le réseau est conçu pour résister à un certain nombre d'aléas : climatiques par exemple pour la consommation (en France, une baisse de 1°C de la température en hiver entraîne une augmentation de la puissance appelée de 2,3 GW), pertes d'ouvrages pour la production, etc.

Le recours croissant à des solutions de production intermittentes d'électricité, éolien principalement, constitue une source de fragilité supplémentaire. Les fluctuations de production, dictées par les aléas météorologiques, sont indépendantes de la consommation. Il faut donc gérer des situations nouvelles : surproduction d'électricité en période de faible consommation, moyen de production sur lequel on ne peut pas compter en période de pointe.

Le stockage d'énergie est une solution transverse et complémentaire. Certes la filière manque de maturité, mais les avantages sont multiples :

- Un gain environnemental lié au déverrouillage du déploiement à grande échelle d'énergies décarbonées, ainsi qu'en cas de remplacement de centrales thermiques.
- La capacité d'apporter des réponses centralisées ou décentralisées pour des contraintes locales ou globales.
- Une indépendance vis-à-vis des ressources fossiles, avantage économique sur le long terme car une augmentation des prix de ces ressources et de celui du CO2 est prévisible.

Le stockage d'électricité nécessite plusieurs étapes de transformation. Il existe cinq formes de stockage d'électricité :

	Transformation 1	Stockage d'énergie	Transformation 2	
Electrochimie – Accumulateurs	Réaction électrochimique	Potentiel électrochimique	Réaction électrochimique inverse	Stockage électrochimique / chimique
Hydrogène	Electrolyse de l'eau	Hydrogène	Pile à combustible	
Inertie – Volant d'inertie	Moteur entraînant un disque	Energie cinétique de rotation	Alternateur récupérant l'énergie cinétique	Stockage mécanique
Gravitaire – STEP²	Pompage	Energie potentielle gravitaire	Turbinage	
Air comprimé – CAES³	Compresseur	Air comprimé	Turbinage	

Tab 1. Les formes de stockage d'électricité

L'énergie peut également être stockée sous sa forme thermique et ensuite restituée sous forme de chaleur :

Stockage par chaleur sensible	Utilisation d'un matériau (liquide, solide) qui emmagasine la chaleur apportée pour la restituer ultérieurement
Stockage thermochimique	Utilisation d'un réactif dont la réaction chimique réversible est endothermique et exothermique ⁴ .
Stockage par chaleur latente	Utilisation d'un matériau dont l'apport de chaleur entraîne un changement de phase ⁵ et qui restitue cette chaleur en sens inverse

Tab 2. Les formes de stockage d'électricité

Enfin, le stockage supraconducteur est une technologie encore au stade de démonstration semi-industrielle qui consiste à stocker l'électricité sous la forme d'énergie magnétique grâce à l'utilisation de bobines supraconductrices. Elle est ensuite directement restituée sous forme électrique.

1. Présentation des différentes technologies disponibles

Les pages suivantes proposent une présentation détaillée de chacune des technologies de stockage stationnaire disponibles ou en cours de développement.

Le principe de fonctionnement, illustré, est rappelé ainsi que les données techniques, les avantages et inconvénients de chacune d'elles.

1.1. Station de transfert d'énergie par pompage –STEP-

Le principe consiste en deux réservoirs d'eau situés à des altitudes différentes. Lors des périodes de faible consommation (durant laquelle la demande - et donc le coût - de l'énergie sont moins élevés) l'eau est pompée vers le réservoir le plus haut. Lors des périodes de forte demande, l'eau circule dans l'autre sens et rejoint, par gravitation, le réservoir le plus bas. Elle fait tourner lors de son passage une turbine qui alimente un alternateur et produit de l'électricité. C'est la solution de stockage à grande échelle la plus répandue et dont le coût d'investissement est parmi les plus bas. La contrainte réside dans la nécessité de trouver des sites appropriés qui se font de plus en plus rares. De nouveaux types de STEP sont envisagés notamment en bord de mer (STEP marine), la mer représentant le réservoir inférieur et un réservoir supérieur étant installé sur la côte.

Avantages

Mature, bon rendement, durée de vie (+40 ans) et cyclage

Inconvénients

Contrainte d'emplacement, impact environnemental et acceptabilité du public

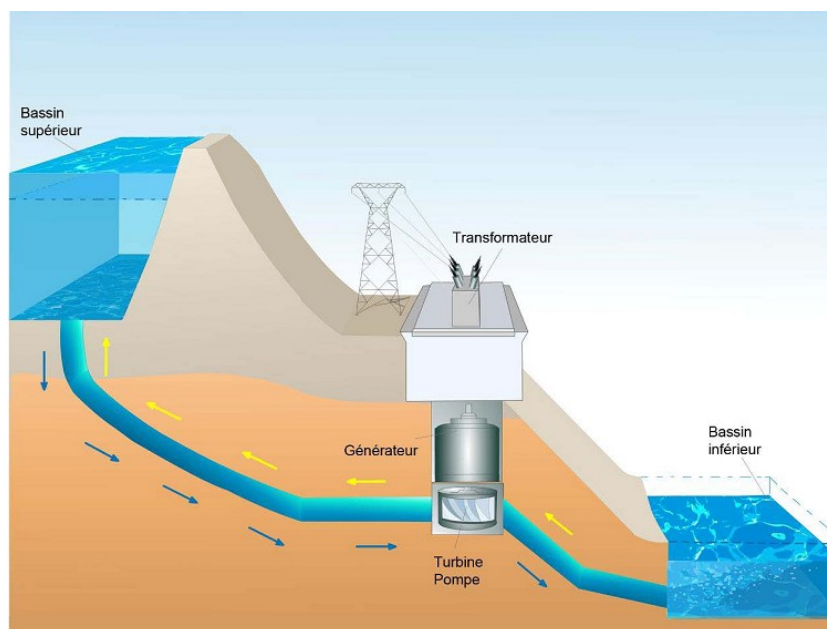


Fig 1. Station de transfert d'énergie par pompage

1.2. Stockage par air comprimé CAES

En l'anglais Compressed Air Energy Storage. Grâce à un compresseur, alimenté pendant les heures creuses de demande d'électricité, de l'air comprimé est produit puis stocké dans une cavité sous-terrainne.

Lors des périodes de pointe, l'air comprimé passe dans une chambre de combustion où il est réchauffé grâce à l'apport de gaz naturel avant d'être détendu dans une turbine. Sans cette étape de réchauffement, la température atteinte lors de la détente de l'air serait beaucoup trop basse et la turbine serait vite endommagée. Celle-ci est reliée à un alternateur qui produit de l'électricité. Si le rendement n'est pas très bon, il reste meilleur qu'une turbine à gaz classique.

Une des améliorations en cours d'étude, le CAES adiabatique, vise à stocker la chaleur produite lors de la compression de l'air pour la restituer lors de la détente du gaz, ce qui permet l'utilisation de turbines à air pour régénérer de l'électricité sans aucune émission directe.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Pas d'émission CO2 (CAES adiabatique)- Grande puissance et grande capacité	<ul style="list-style-type: none">- Coût d'investissement- Site de stockage géologique adapté

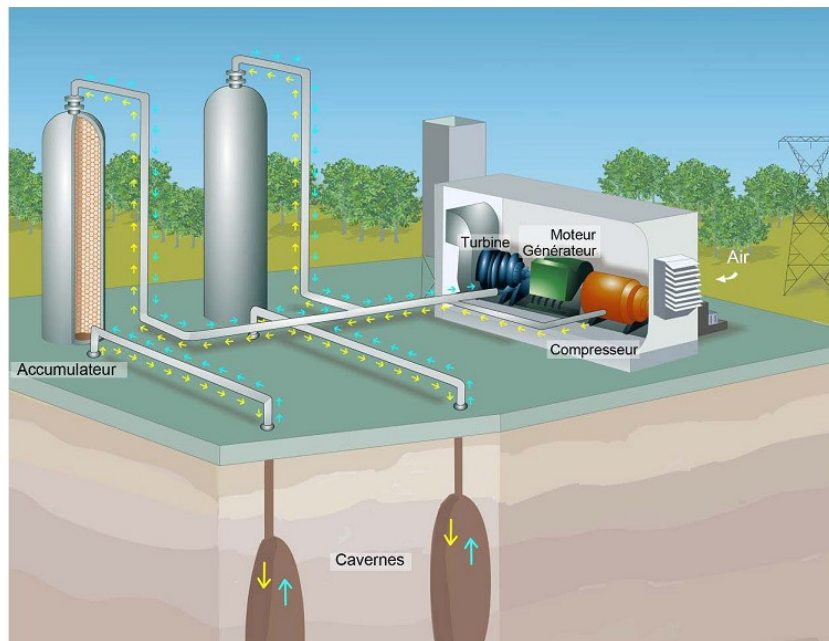


Fig 2. Stockage par air comprimé

1.3. Système inertiel de stockage d'énergie (SISE)

Ce système de stockage repose sur le principe physique qui consiste à emmagasiner de l'énergie cinétique en faisant tourner à très grande vitesse une masse autour d'un axe.

Le volant d'inertie est accéléré ou freiné par un moteur-générateur électrique qui permet ainsi d'effectuer les charges et décharges du système. Pour éviter les frottements, les parties tournantes sont guidées par des paliers souvent magnétiques. L'ensemble du système est logé dans une enceinte de confinement sous basse pression, afin de limiter les pertes aérodynamiques sources d'auto-décharge. Le SISE est utilisé dans de nombreux domaines : régulation de fréquence, lissage de la production éolienne et solaire, stockage et restitution de l'énergie de freinage des véhicules.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Temps de réponse très court- Très bon rendement- Longue durée de vie- Peu de maintenance- Peu de constructeur	<ul style="list-style-type: none">- Forte autodécharge- Problèmes de sécurité- Coût

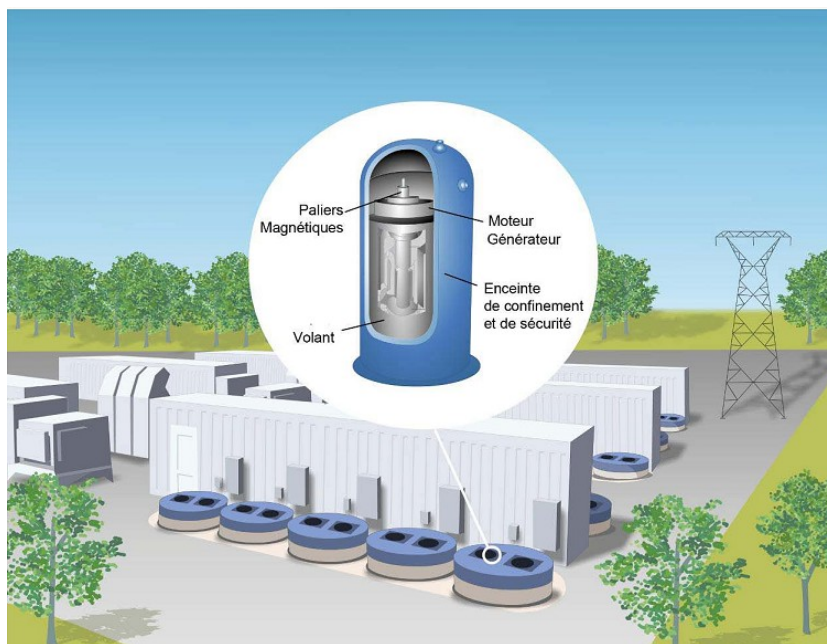


Fig 3. Système inertiel de stockage d'énergie

1.4. Stockage sous forme d'hydrogène

Les trois étapes du processus de stockage par le vecteur hydrogène sont : l'électrolyse de l'eau, le stockage de l'hydrogène produit et la pile à combustible.

- Tout d'abord la production d'hydrogène lors des périodes creuses grâce à la décomposition de l'eau par électrolyse. L'apport d'électricité permet à l'électrolyseur de décomposer l'eau H_2O en oxygène et hydrogène $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$
- Ensuite l'hydrogène est stocké dans un réservoir sous forme gazeuse, liquide ou solide.
- Il est enfin retransformé dans une pile à combustible. Selon la réaction inverse de l'électrolyse, l'hydrogène s'associe avec l'oxygène (les ions traversent une membrane tandis que les électrons circulent dans un circuit créant un courant électrique), la réaction ne rejette que de l'eau et de la chaleur.

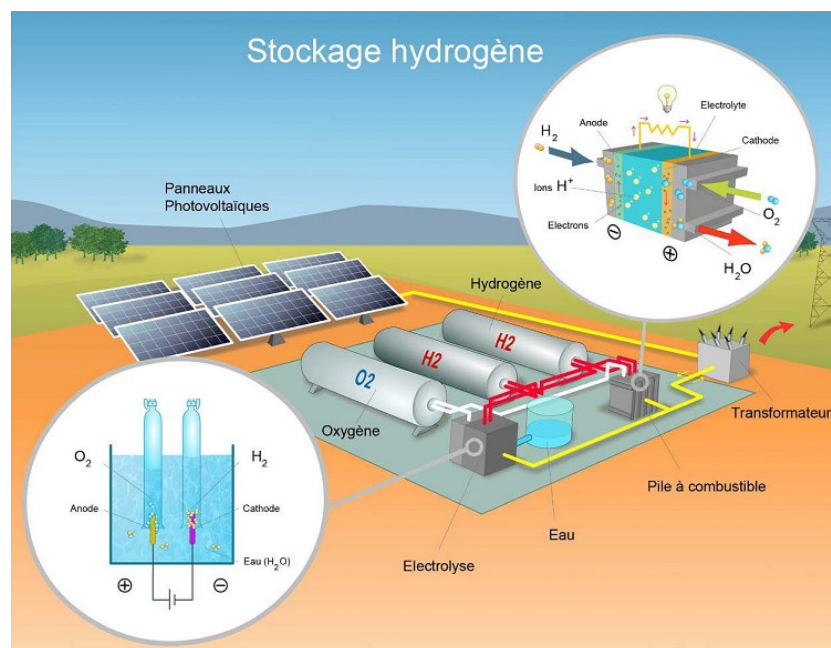


Fig 4. Stockage sous forme d'hydrogène

1.5. Stockage thermique par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible a fait ses preuves depuis des milliers d'années. Il s'agit par exemple du simple fait de poser une pierre près d'un feu, de la déplacer et de profiter de la chaleur qu'elle restitue dans le temps. C'est aussi le principe que l'on retrouve dans l'utilisation d'un ballon d'eau chaude ou d'une simple bouillote. Dans le cas d'une centrale thermodynamique, il s'agit de stocker la chaleur emmagasinée au cours de la journée d'ensoleillement. Le fluide caloporteur (qui transporte la chaleur) circule jusqu'à un échangeur thermique relié à deux réservoirs de sels fondus. Les sels fondus froids passent à travers l'échangeur et emmagasinent à leur tour la chaleur du fluide, ils sont ensuite stockés dans un réservoir de sels chauds.

Au coucher du soleil, le circuit s'inverse et les sels chauds circulent, à travers l'échangeur, vers le réservoir à sels froids. La chaleur est ainsi cédée au fluide caloporteur (autour de 500°) et permet d'alimenter une turbine pour produire de l'électricité.

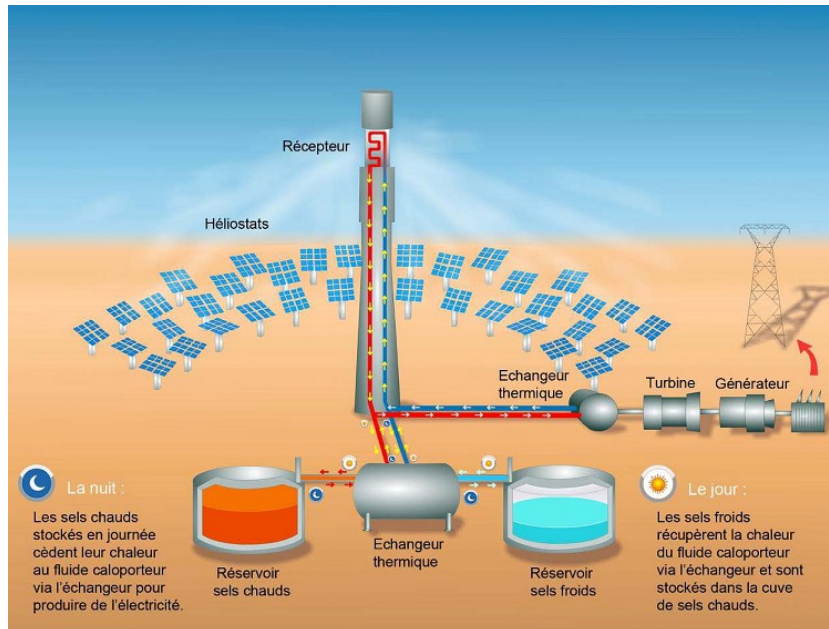


Fig 5. Stockage thermique par chaleur sensible

1.6. Stockage thermochimique couplé à un système solaire thermique

Le principe repose sur l'utilisation d'un réactif (bromure de strontium pour des installations dans l'habitat), stocké dans une cuve. En période estivale, l'eau chaude apportée par le système solaire combiné va céder sa chaleur à l'air apporté de l'extérieur via l'échangeur eau-air.

Cet air chaud va ensuite permettre d'assécher le réactif. Le réactif peut être conservé sec pendant plusieurs mois. En période hivernale, le circuit est inversé, l'air extérieur frais et humide circule à travers le réactif qui, en se réhumidifiant, va dégager de la chaleur grâce à une réaction chimique exothermique. L'air ainsi chauffé (autour de 70°C) passe dans l'échangeur et cède sa chaleur à l'eau qui va circuler jusqu'au ballon et permettre une utilisation sanitaire.

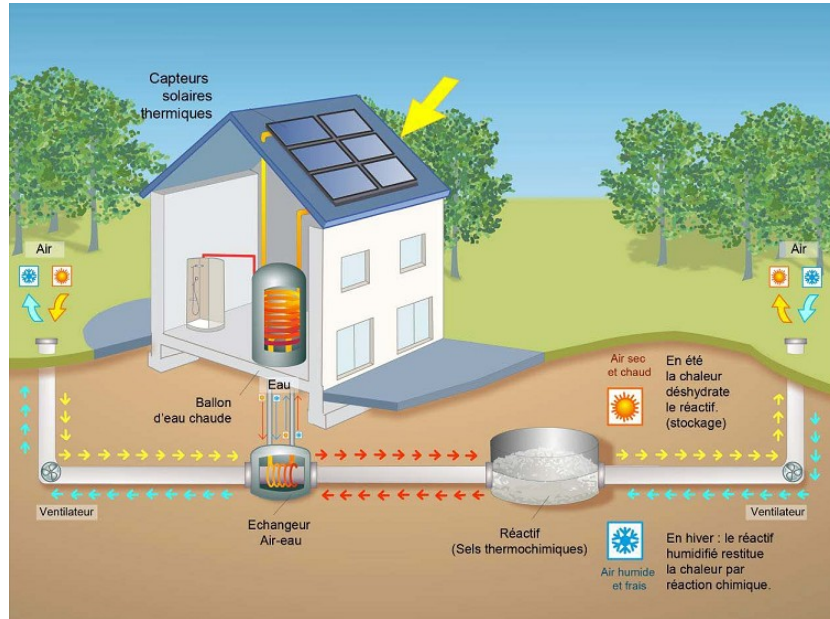


Fig 6. Stockage thermochimique couplé à un système solaire

1.7. Stockage thermique par changement de phase

Le principe du stockage via des matériaux à changement de phase (MCP) consiste à utiliser des matériaux qui passent d'un état solide à liquide lors d'un apport de chaleur. Par exemple, la paraffine. Placée dans une cuve de stockage sous forme solide à température ambiante, elle est traversée par des tuyaux en cuivre dans lesquels circule de l'eau. Lorsque l'eau chaude arrive, la paraffine se réchauffe et passe de la forme solide à liquide. A l'inverse, la paraffine va céder sa chaleur en se resolidifiant si c'est de l'eau froide (autour de 15°C) qui circule dans le tube.

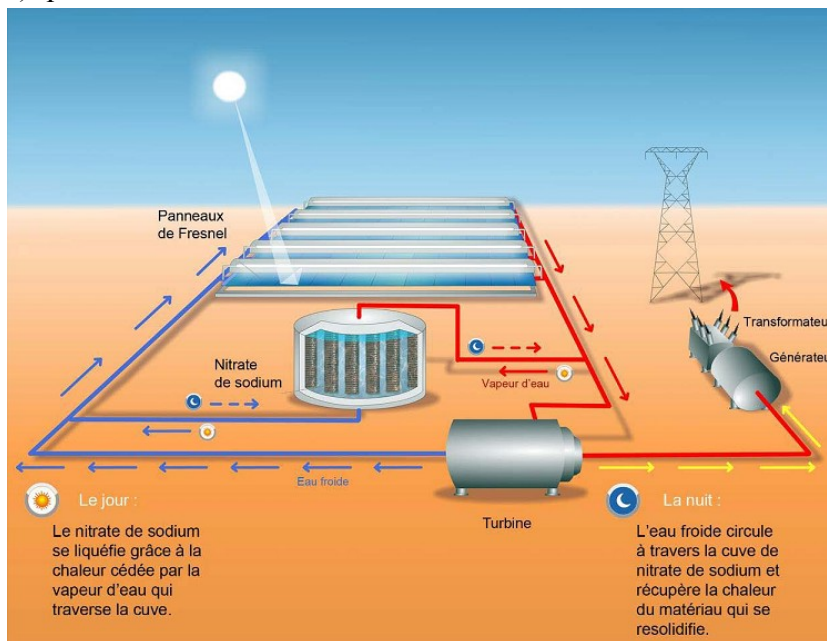


Fig 7. Stockage thermique par changement de phase

Une installation classique consiste à mettre le MCP dans un grand réservoir au milieu duquel passent des tubes pour transporter le fluide caloporteur. Le MCP et le fluide peuvent être différents suivant la production de chaleur qui lui est associée, et donc la température ou quantité de chaleur que l'on souhaite stocker.

1.8. Stockage à inductance supraconductrice – SMES

L'énergie est stockée par l'intermédiaire d'un courant électrique envoyé dans une bobine constituée d'un fil supraconducteur. Une fois la bobine court-circuitée (fermée), le courant circule sans perte d'énergie car il n'y a pas de frottement (les électrons circulent en continu). Il y a alors production d'un champ magnétique dans les bobines. L'énergie est donc stockée dans la bobine sous une forme magnétique et électrique, et peut être récupérée dans un très court laps de temps. Les rendements peuvent être très élevés et les principales pertes sont localisées dans les connexions et dans le convertisseur électronique de puissance. Le rendement instantané en puissance peut dépasser les 95%.

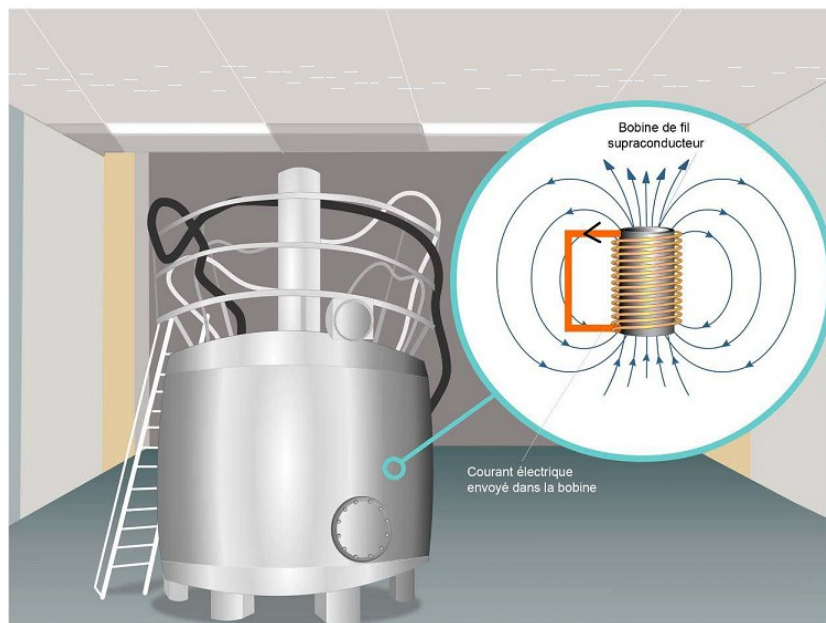


Fig 8. Stockage à inductance supraconductrice

1.9. Supercondensateurs

Le supercondensateur est un moyen de stocker l'énergie sous forme électrostatique. Il est constitué de 2 électrodes poreuses, généralement en carbone activé, plongées dans un électrolyte liquide et séparées par un séparateur laissant circuler les ions mais pas les électrons. L'interaction des électrodes et de l'électrolyte entraîne l'apparition spontanée d'une accumulation de charges aux interfaces, on parle de formation d'une double couche

électrochimique : une couche de charges positives et une couche de charge négatives, l'ensemble étant électriquement neutre. Les plus gros supercondensateurs ont été développés majoritairement pour une utilisation dans le domaine des transports.

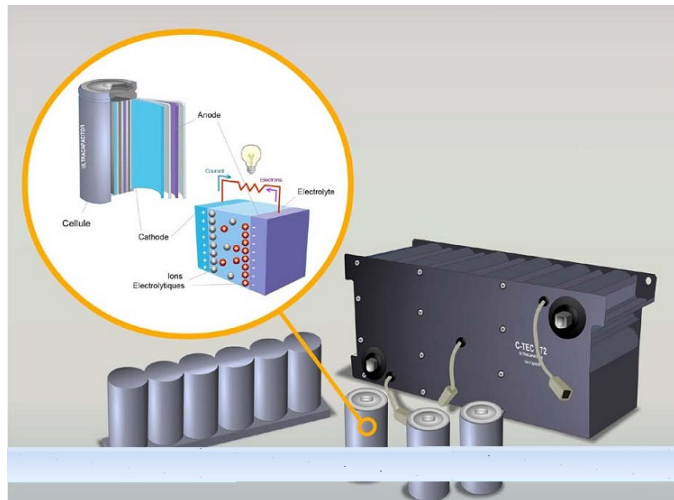


Fig 9. Les Supercondensateurs

1.10. Batteries

La batterie est un assemblage d'accumulateurs qui stocke l'énergie électrique issue de la circulation des ions entre deux électrodes à travers un électrolyte, et des électrons qui se déplacent à travers un circuit extérieur.

2. Critères de choix d'une technologie de stockage

Il existe différentes technologies de stockage stationnaire capables de s'adapter au mieux au système de production d'énergie, au besoin, à l'investissement...

L'ensemble de ces technologies se complètent et doivent permettre de réfléchir en terme de réseau de stockage. Chaque réseau (thermique, électrique, production d'hydrogène) peut se développer en parallèle et ainsi couvrir l'ensemble des besoins. Les critères de choix d'une technologie de stockage dépendent du besoin, auquel on associe un cahier des charges, des contraintes de réglementation, de coût et d'environnement...

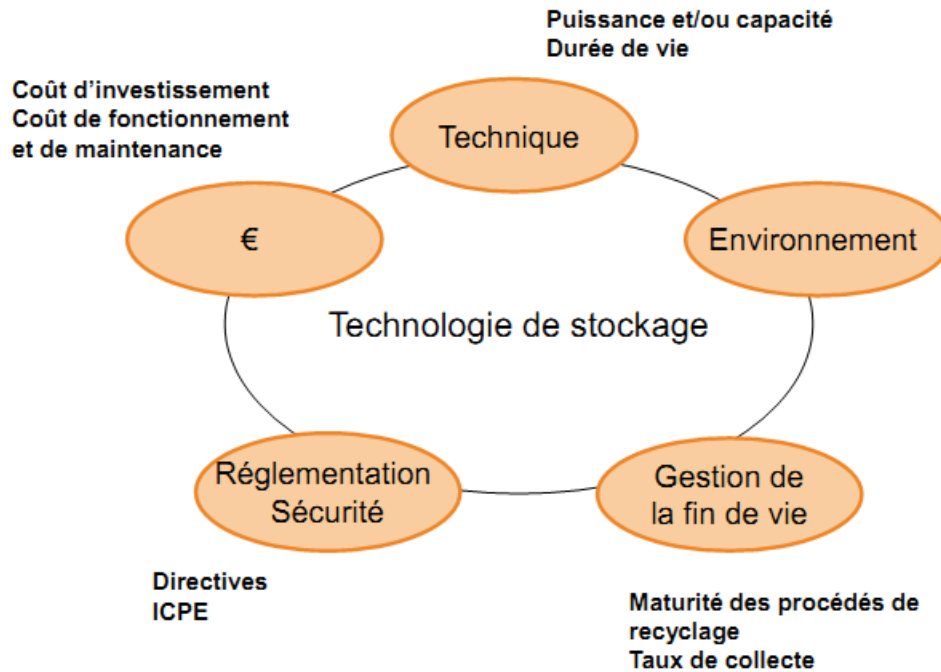


Fig 10. Criteres de choix d'une technologie de stockage

Stockage d'énergie électrique

La sélection d'un système de stockage sur un site donné dépend de plusieurs critères de choix :

- Quantité et nature d'énergie disponible ;
- Puissances disponibles ;
- Densité de stockage en énergie et puissance, qui conditionne le volume et le poids du système ;
- Coût et maintenance qui sont liés à la maturité de la technologie ;
- Nombre de cycles et profondeur de décharge ;
- Sécurité.

Chapitre 03

Consommations, réserves et évolutions des ressources d'énergie

La consommation d'énergie finale dans le monde en 2009 était de près de 8,4 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (*Key World Energy Statistics 2011, AIE*). Elle a augmenté de plus de 40% entre 1990 et 2008. Les autres estimations place la consommation mondiale d'énergie à 12,2 milliards de tep.

La consommation énergétique mondiale va exploser : on estime que les besoins énergétiques mondiaux vont représenter de 570 à 600 exajoules par an en 2020.

Selon une étude de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) la génération d'électricité provenant des renouvelables représentera 25% du mix électrique totale en 2018. La croissance de la production atteindra 4% entre 2012 et 2018 à 685 TW/h soit +6% par an. Elle a déjà progressé de 8.5% en 2012.

Les énergies renouvelables, l'hydroélectricité en tête de file, sont 8% du mix électrique (contre 2% à 4% entre 2006 et 2011). L'étude de l'AIE prévoit une augmentation de cette part à 11% en 2018.

Les experts ont élaborés 3 prévisions pour estimer la croissance de la consommation énergétique mondiale. Les besoins vont au moins doubler et pourrait même quadrupler et serait en 2100 de 830 à 1750 exajoules par an.

L'une des difficultés que l'on rencontre, lorsque l'on fait une telle analyse est la multiplicité des unités d'énergie utilisées (tonnes équivalent pétrole, TW.h, exajoule EJ...). Quelques équivalences utiles lorsque l'on veut analyser les nombreuses données disponibles dans différents secteurs :

1 W.h = 3600 J (1 TW.h = 10^{12} W.h, 1 EJ = 10^{18} J)
1 t.e.p. \cong 11 600 kW.h (tonne équivalent pétrole)
1 baril (159 l ou 140 kg) \cong 1700 kW.h
1 BTU (British Thermal Unit) \cong 252 cal \cong 1050 J
1 thermie = 100 000 BTU

Tab 1 : Unités de mesure d'énergie

Les valeurs énergétiques moyennes des principaux combustibles sont données dans le tableau 2 :

hydrogène	gaz naturel	propane	butane	charbon	fuel	essence	bois	uranium naturel
34 kW.h/kg	10 à 12 kW.h/m ³	26,7 kW.h/m ³	34,9 kW.h/m ³	7,2 kW.h/dm ³	11,6 kW.h/dm ³	12 kW.h/dm ³	2 à 4 kW.h/kg	116 000 kW.h/kg

Tab 2 : Valeurs énergétique des principaux combustibles

1. Ressources et consommation d'énergie

1.1. Le pétrole

Les réserves de pétrole sont difficiles à estimer et font l'objet de nombreuses controverses. On dénombre environ 30 000 gisements rentables, de quelques dizaines à quelques centaines de km². Parmi eux, l'on distingue 450 à 500 gisements dits "géants" (avec des réserves supérieures à 70 millions de tonnes), dont une soixantaine de "super-géants" (avec des réserves supérieures à 700 millions de tonnes). 60 % des "super-géants" sont au Moyen-Orient.

Le Moyen-Orient restera la principale zone de production, mais d'autres régions ont un fort potentiel : la Russie, l'Afrique de l'Ouest, le Brésil et le Golfe du Mexique. L'Asie centrale (Kazakhstan, Turkménistan) l'est également, mais des problèmes d'acheminement vers la mer entravent son développement.

1.2. Le gaz naturel

Selon l'Union Internationale de l'Industrie du Gaz, les réserves conventionnelles de gaz naturel correspondent à 65 années de production au rythme actuel. Environ 40 % des réserves sont concentrées dans les quelque 25 gisements géants de la planète, dont deux se trouvent en Europe (Groningue aux Pays-Bas et Troll en mer du Nord norvégienne). L'amélioration des techniques d'exploration devrait permettre d'augmenter les réserves accessibles.

Les réserves connues de gaz naturel se trouvent principalement au Moyen-Orient (40,1%) et en Russie (32,4%).

1.3. Le charbon

Les réserves de charbon, abondantes et géographiquement bien réparties, sont évaluées à 471 milliards de tep. Le charbon est, en général, majoritairement consommé dans le pays producteur.

1.4. L'uranium

Les réserves de minerai d'uranium exploitées actuellement sont dispersées dans de nombreux pays (26 % dans l'ex-Union soviétique, 27 % en Australie, 17 % en Amérique du Nord et 20 % en Afrique). Au rythme actuel de consommation (environ 450 réacteurs sont en service dans le monde) et sans tenir compte de stockages abondants, les réserves d'uranium devraient couvrir au moins les 50 années à venir.

1.5. L'énergie solaire

La surface de la terre reçoit chaque année $1,6 \cdot 10^{18}$ kW.h (équivalent à une puissance continue de $180 \cdot 10^6$ GW, 30% sont directement réfléchis dans l'espace, 45% sont absorbés, convertis en chaleur et rayonnés dans l'infrarouge.

Les 25% restant alimentent les cycles hydrologiques (24%) et la photosynthèse (0,06%) soit l'équivalent d'une moyenne de $45 \cdot 10^6$ GW.

L'énergie rayonnée au sol vaut environ $720 \cdot 10^{15}$ kW.h. Selon les régions, l'énergie reçue à la surface de la terre varie, par m^2 , de 1100 kW.h à 2300 kW.h/an, soit une puissance moyenne (répartie sur l'année, en tenant compte des alternances jour-nuit et des périodes nuageuses) de 120 à 260 W par m^2 et une puissance crête de plus d'1 kW/ m^2 .

Cette énergie peut être directement transformée en chaleur avec un excellent rendement ou, encore, en électricité mais dans des conditions nettement moins bonnes. Une partie de cette énergie sert à la photosynthèse : $950 \cdot 10^{12}$ kW.h, ce qui conduit à la production lente de matières combustibles comme le bois ou les fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). Les combustibles fossiles à la différence du bois sont le fruit d'une longue accumulation et ne peuvent être considérés comme renouvelables.

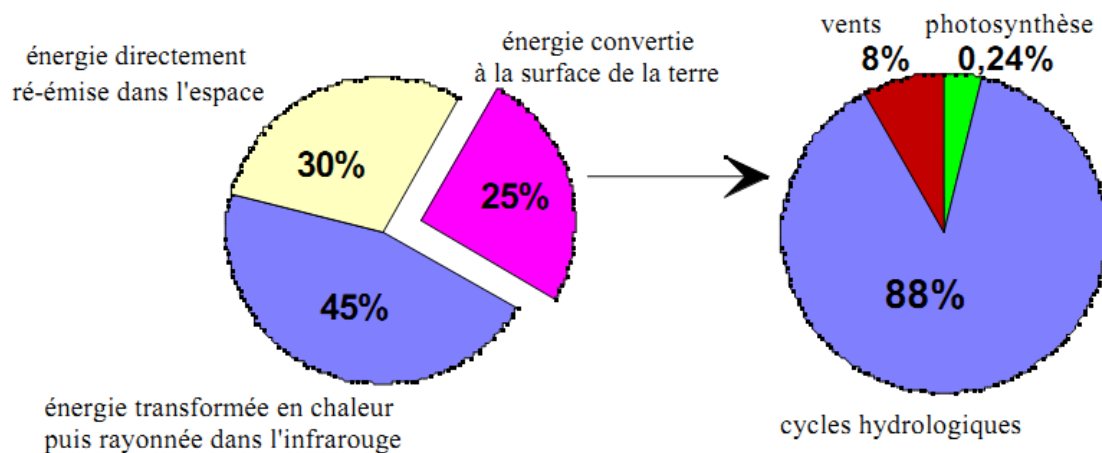


Fig.1 Répartition des $1600 \cdot 10^{15}$ kW.h reçus annuellement du soleil par la terre

1.6.L'énergie hydraulique

Aujourd'hui, l'énergie hydraulique est la principale énergie renouvelable utilisée pour la production d'électricité. L'énergie hydraulique techniquement exploitable, d'après [Web_LANL], vaut 25.10^{12} kW.h (15.10^{12} kW.h, d'après [CHAB_EU97]), soit environ 5 à 8 fois ce qui est déjà exploité. Le potentiel est déjà bien utilisé dans les pays de l'OCDE mais il peut encore se développer dans nombre de pays en voie de développement.

1.7.L'énergie éolienne

Les ressources exploitables mondialement sont énormes et sont estimées [Web_LANL] à 1.1015 kW.h/an. En France, sur les côtes, la réserve est de 4000 à 6000 kW.h/m², en plaine, on obtient de 300 à 1000 kW.h/m² (la surface comptée est celle de l'hélice face au vent, axe horizontal). Ainsi une hélice de 40 m de diamètre brasse 1200 m² et produira, sur un site à 1000 kW.h/m², environ $1,2.10^6$ kW.h par an. Le gisement éolien français est estimé à 60.10^9 kW.h. [EDF_sept97] soit 13% de la production actuelle d'électricité.

1.8.La géothermie

Le noyau terrestre en fusion dégage une énergie correspondant à une puissance estimée à $35\ 000$ GW soit une énergie annuelle de 300.10^{12} kW.h. Selon les lieux, le flux géothermique varie de $0,05$ à 1 W/m², ce qui est très faible par rapport au rayonnement solaire. Les réserves exploitables sont d'environ 26.10^{12} kW.h en haute énergie (150 à 350°C , utilisée pour la production d'électricité) et 280.10^9 kW.h en basse énergie (50 à 90°C pour le chauffage).

2. Quelques Chiffres concernant la consommation de l'énergie

En 1960, les pays en voie de développement consommaient 23% de l'énergie mondiale, en 1995, la proportion est passée à 30% et on estime qu'en 2020, elle sera de 42%. Selon une des évaluations les plus optimistes, la consommation mondiale d'énergie devrait ainsi augmenter de 50% d'ici à 2020 ($13,4$ GTEP) [REE_mars96] :

Asie sud-est	Asie du sud	Afrique+ Moyen Orient	Afrique subsahar.	Amérique latine	Europe OCDE	Amérique du nord	CEI	Japon, Austral. N. Zélande	Europe Centrale
+48%	+15%	+7,7%	+6,4%	+13,1%	+3,9%	+2,7%	+1,2%	+0,9%	0,4%

Tab 3 : Accroissement de la consommation énergétique de 1995 à 2005

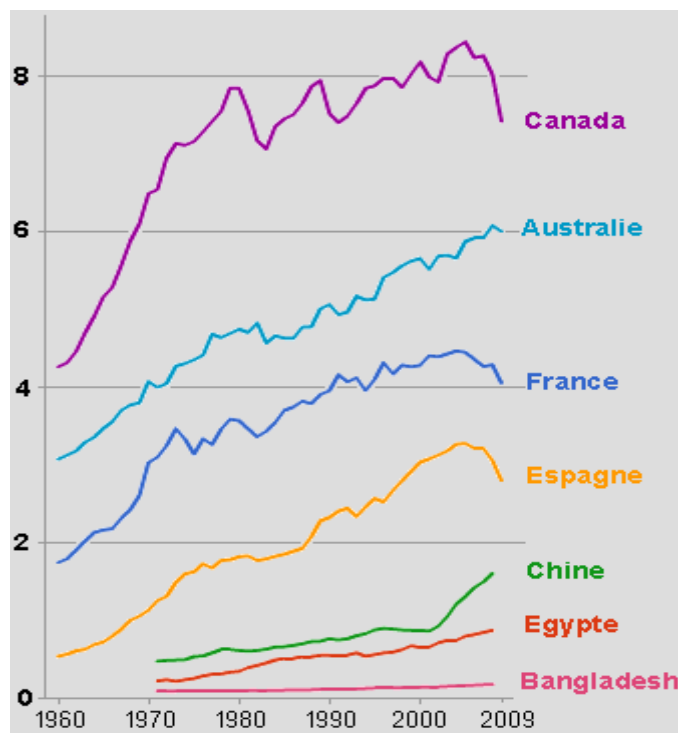


Fig.2 Consommation d'énergie par habitant par de 1960 à 2009 en Tep

3. Quelques Chiffres concernant l'Algerie

Energie	
Production de pétrole en barils / jour (2007)	1 371,6
Consommation d'énergie (TEP / Hab.) (2011)	1,108
Consommation d'électricité (Kwh par habitant) (2011)	1 091
% électricité produite à partir de combustibles fossiles (2010)	97,5 %
Pourcentage énergie importée (2010)	-272,84 %

Fig.3 Consommation d'énergie en Algerie

Chapitre 04

Différents types de pollutions

La définition la plus générale du terme de pollution a été donnée par le premier rapport du conseil sur la qualité de l'environnement de la maison blanche (1965) « la pollution » dit ce rapport « est une modification défavorable du milieu naturel qui apparait en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, au travers des effets directes ou indirects altérants les critères de répartition des flux de l'énergie des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et en produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède ou les possibilités récréatives du milieu ».

1. Les sources de la pollution atmosphérique

Pour mieux connaître et maîtriser la pollution de l'air, il est nécessaire de savoir quelles sont les sources de pollution, de les identifier et les quantifier.

1.1. Pollution d'origine naturelle

Il y a beaucoup de sources naturelles de pollution qui sont souvent beaucoup plus grandes que leurs équivalents synthétiques, à savoir :

- Les sources normales de dioxyde de soufre incluent les dégagements des volcans, de la décomposition biologique et les feux de forêts. En 1983 le Programme d'Environnement des Nations Unies a estimé une entre 80 millions et 288 millions de tonnes d'oxydes de soufre par an (comparé à environ 79 millions de tonnes provenant des sources humaines dans le monde).
- Les sources naturelles d'oxydes d'azote incluent les volcans, la décomposition biologique et les éclairs. Les estimations varient entre 20 et 90 millions de tonnes par an d'oxyde d'azote libérés par les sources naturelles (comparées à environ 22 millions de tonnes de sources humaines dans le monde entier).

1.2. Pollution d'origine anthropique

➤ La production d'énergie thermique

Au niveau individuel ou tertiaire (chauffage des logements et des bureaux) comme au niveau industriel (production de vapeur ou d'électricité), la combustion de combustibles fossiles (charbon, fioul lourd, etc.) produit d'importantes émissions polluantes. Le dioxyde de carbone (CO₂), produit inévitable de la combustion des matières organiques dont la concentration croissante dans l'atmosphère contribue à l'effet de serre, le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x), les poussières, les métaux lourds, etc. sont concernés.

➤ L'industrie

L'industrie est à l'origine des émissions spécifiques dues aux processus de traitement ou de fabrication employés. En quantités variables, selon les secteurs industriels, elle est émettrice de monoxyde et de dioxyde de carbone, de dioxyde de soufre, d'oxyde d'azote, de poussière, de composés organiques volatils (COV), de métaux lourds, etc.

➤ Les transports et l'automobile

La pollution due aux transports a longtemps été considérée comme un problème de proximité, essentiellement perçue dans les villes en raison de la densité du trafic. Aujourd'hui, on sait que les transports, essentiellement routiers et en particulier l'automobile, sont une source de pollution importante. Les moteurs à explosion sont ainsi de très loin la première cause d'émissions d'oxydes d'azote et de divers

hydrocarbures. Les moteurs diesels, moins polluants pour ce qui concerne ce dernier type d'émissions, sont en revanche à l'origine de particules et de dioxyde de soufre. La contribution des transports à la pollution ne cesse de s'accroître du fait de l'augmentation du trafic directement liée à l'évolution économique, en dépit des nombreux progrès technologiques réalisés au cours des dernières années.

➤ **Les déchets**

Les déchets sont considérés comme l'une des plus grandes sources de pollution. Qu'ils soient abandonnés dans une décharge ou incinérés, par leur décomposition ils sont producteurs de plusieurs polluants, tels que le méthane, l'acide chlorhydrique, les métaux lourds, les dioxines et les furanes.

➤ **Les activités agricoles**

L'agriculture contribue également à la pollution atmosphérique. Ses émissions (essentiellement l'ammoniac, le méthane, le protoxyde d'azote, le monoxyde de carbone et les produits phytosanitaires) sont liées à la décomposition des matières organiques et à l'utilisation d'engrais et de produits phytosanitaires.

2. Pollution des eaux

Il y en a deux sources majeurs de la pollution de l'eau; les sources directes et les sources indirectes. Les sources directes incluent les usines, les facilités de traitement d'eaux d'égout, systèmes septiques, et les autres sources qui clairement déchargent les polluants en les sources d'eau. Les sources indirectes sont plus difficiles d'identifier, parce qu'ils ne peuvent pas être tracé à un endroit spécifique. Les sources indirectes incluent l'écoulement qui inclut sédiment, engrais, les chimiques et des déchets des animaux des fermes, champs, sites de construction et des mines.

L'Agence de protection de l'environnement des États-Unis divise la pollution d'eau en les six catégories suivantes :

- Les déchets biodégradables qui consistent principalement des déchets humains et des déchets animaux. Quand les déchets biodégradables entrent un approvisionnement d'eau, les déchets fournissent une source d'énergie (carbone organique) pour les bactéries. Carbone organique est converti à anhydride carbonique et eau, qui peut causer la pollution atmosphérique et la pluie acide.
- Les nutriments des plantes, comme des phosphates et nitrates, entrent dans l'eau à travers des eaux d'égout, et bétail et l'écoulement d'engrais. Phosphates et nitrates sont aussi trouvés dans les déchets industriels.
- La chaleur peut être une source de pollution de l'eau. Quand la température de l'eau monte, le montant d'oxygène dissous abaisse. La pollution thermique

peut être naturelle, dans le cas des sources chaudes ou des étangs peu profonds pendant l'été, ou fait par les humains, par la décharge de l'eau qui a été utilisé pour refroidir les centrales électriques ou autre équipement industriel. Les poissons et les plantes requièrent des certaines températures et niveaux d'oxygène pour vivre, alors la pollution thermique souvent réduit la diversité de la vie aquatique dans l'eau.

- Sédiment est un des sources les plus communes de la pollution de l'eau. Sédiment consiste du matériel organique ou minéral solide qui est lavé ou soufflé de la terre aux sources d'eau. La pollution des sédiments est difficile d'identifier, parce qu'il vient des sources indirectes, comme la construction, les opérations agricoles et de bétail, la sylviculture, les inondations, et l'écoulement des villes.
- Les produits chimiques dangereux et toxiques sont d'habitude les matériels qui sont fait par les humains qui ne sont pas utilisé et déposé proprement. Les sources directes de la pollution chimique incluent les décharges industrielles et les fuites d'huile.
- Les polluants radioactifs comprennent les décharges d'eau d'égout des usines, hôpitaux et mines d'uranium. Ces polluants peuvent également provenir des isotopes naturels, comme le radon. Les polluants radioactifs peuvent être dangereux, et il prend plusieurs années avant que les substances radioactives ne sont plus considérées dangereuses.

3. Pollution du sol

Ce sont la plupart du temps **les activités humaines** qui sont à l'origine des pollutions des sols :

- Les **installations industrielles** peuvent, dans le cas d'une fuite, d'un accident, ou encore dans l'abandon d'une usine, provoquer une pollution du site.

- L'**épandage des produits phytosanitaires** et les rejets des bâtiments d'élevage, des exploitations agricoles sont également à l'origine de nombreuses pollutions des sols (notamment par l'azote et les phosphates), qui vont à leur tour amener la contamination des eaux de ruissellement, et par la suite les cours d'eaux.

- Les **actions des collectivités territoriales** peuvent également être à l'origine d'une pollution des sols : gestion des décharges et des stations d'épuration, utilisation de produits phytosanitaires par les services des espaces verts, gestion de jardins partagés, etc.

Des **événements géographiquement éloignés** peuvent également produire des pollutions de sols, qu'il s'agisse d'événements naturels (les retombées des cendres d'un volcan suite à une forte éruption par exemple), ou technologiques (retombées radioactives suite à un essai nucléaire ou une catastrophe, comme lors de l'accident de Tchernobyl).

Chapitre 05

Détection et traitement des polluants et des déchets

La pollution est la dégradation d'un écosystème par l'introduction, généralement humaine, de substances ou de radiations altérant de manière plus ou moins importante le fonctionnement de cet écosystème

1. Purification d'air

Un **purificateur d'air** est un appareil destiné à supprimer la pollution domestique et industrielle, il filtre l'air et élimine les mauvaises odeurs.

Les purificateurs d'air améliorent la qualité de l'air. Ils sont employés par l'industrie pour filtrer et éliminer les résidus toxiques, dans les hôpitaux et les compagnies aériennes pour empêcher la propagation des virus et des bactéries. Ils sont également utilisés dans les bureaux et les maisons pour améliorer l'hygiène, la qualité de vie de chaque individu et diminuer les risques de contagion et de maladies.

2. Types de purificateur

Pour les traitements de la pollution domestique mais aussi industrielle, on distingue généralement quatre types de purificateurs d'air :

- les purificateurs d'air par filtration
- les purificateurs d'air par ioniseur
- les purificateurs d'air par combustion
- les purificateurs d'air par photocatalyse.

2.1.Purificateur d'air par filtration

Les purificateurs par filtrage ne détruisent pas la pollution domestique. Ils la filtrent :

- soit à partir de filtres de haute capacité
- soit à l'aide d'un ionisateur

Pour détruire la pollution de l'air et les résidus volatils, il convient d'utiliser un autre type de purificateur en complément.

Le filtre HEPA (High Efficiency Particulate Air filter) sert à filtrer les allergènes, pollens, bactéries et virus mais reste inutile pour les polluants chimiques. Ce filtre de Haute Capacité est utilisé dans les milieux hospitaliers ou encore dans les climatiseurs d'avion.

Outre son coût élevé, le remplacement du filtre est soumis à une procédure stricte, ce qui réduit ses possibilités d'utilisation domestique et individuelle. Ce purificateur n'a pas d'action sur les polluants chimiques (détergent ménager, pollution atmosphérique, etc.).

2.2.Purificateur d'air par ioniseur

La purification d'air par ioniseur produit une réaction chimique : il génère des ions négatifs (anions) qui amalgament les particules en suspension. En les chargeant négativement, la poussière, les pollens, les poils d'animaux et tout autre composé organique volatil (COV) nocif tombent au sol ou se fixent au mobilier.

L'ioniseur capture mais ne détruit pas les particules, les COV doivent alors être aspirés par un autre moyen.

Les purificateurs d'air par ionisation ne traitent pas les pollutions chimiques de type industriel et domestique, ni les bactéries et virus dans l'air. Ils sont complétés par d'autres types de purificateurs, en général, les filtres HEPA.

2.3.Purificateur d'air par Combustion

Les purificateurs d'air par combustion détruisent les particules en brûlant les particules nocives ou en élevant la température de l'air. Ils rejettent de l'air purifié mais augmentent la concentration d'ozone (O_3) dans l'air, génèrent une odeur désagréable et augmentent la température ambiante.

Plasma

La purification d'air par plasma, est une technologie qui propulse à l'extérieur de l'appareil un oxydant. En excitant l'oxygène de l'air, il détruit les particules nocives dans l'air.

Cette technique est généralement mieux adaptée aux usages industriels qu'à la purification d'air domestique. Cette technique s'utilise notamment pour diminuer les émissions de gaz des pots d'échappements, notamment celles des voitures diesel.

Cette purification est utile pour la destruction des bactéries et des virus, elle est issue de la conquête spatiale, n'est maîtrisée que par un très faible nombre de sociétés (Air In Space, Biozone Europe). Dès lors, il n'y a pas vraiment de concurrence permettant au grand public de bénéficier de cette technologie à un coût attractif.

2.4.Purificateur d'air par photocatalyse

Le purificateur d'air par photocatalyse combine la filtration des particules volatiles et la destruction des virus et des bactéries, solvants, détergents et oxydes d'azote.

Il se compose d'un ventilateur, qui capture les particules, d'une lampe ultra-violet de type UV-A (ou UV-C) et un média-catalytique du dioxyde de titane (TiO₂).

Au contact des ultraviolets, le catalyseur (du dioxyde de titane, par exemple) devient un puissant oxydant qui détruit les odeurs, les composés organiques volatiles (COV, allergènes et pollens), les résidus de la pollution chimique et atmosphérique tels que les oxydes d'azote (NO_x) rejetés par les pots d'échappement. Le catalyseur détruit aussi les bactéries et les virus grâce à ce phénomène naturel.

3. Traitement des eaux usées

Le prétraitement consiste en trois étapes principales qui permettent de supprimer de l'eau les éléments qui gêneraient les phases suivantes de traitement. Toutes les stations d'épuration ne sont pas forcément équipées des trois, seul le dégrillage est généralisé, les autres sont le dessablage et le déshuilage.

3.1. Dégrillage et tamisage

Le dégrillage et le tamisage permettent de retirer de l'eau les déchets insolubles tels que les branches, les plastiques, serviettes hygiéniques, etc. En effet, ces déchets ne pouvant pas être éliminés par un traitement biologique ou physico-chimique, il faut donc les éliminer mécaniquement. Pour ce faire, l'eau usée passe à travers une ou plusieurs grilles dont les mailles sont de plus en plus serrées. Celles-ci sont en général équipées de systèmes automatiques de nettoyage pour éviter leur colmatage, et aussi pour éviter le dysfonctionnement de la pompe (dans les cas où il y aurait un système de pompage).

3.2. Dessablage

Le dessablage permet, par décantation, de retirer les sables mélangés dans les eaux par ruissellement ou amenés par l'érosion des canalisations. Ce matériau, s'il n'était pas enlevé, se déposerait plus loin, gênant le fonctionnement de la station et provoquant une usure plus rapide des éléments mécaniques comme les pompes. Les sables extraits peuvent être lavés avant d'être mis en décharge, afin de limiter le pourcentage de matières organiques, la dégradation de celles-ci provoquant des odeurs et une instabilité mécanique du matériau.

3.3. Dégraissage

C'est généralement le principe de la flottation qui est utilisé pour l'élimination des huiles. Son principe est basé sur l'injection de fines bulles d'air dans le bassin de déshuilage,

permettant de faire remonter rapidement les graisses en surface (les graisses sont hydrophobes). Leur élimination se fait ensuite par raclage de la surface. Il est important de limiter au maximum la quantité de graisse dans les ouvrages en aval pour éviter par exemple un encrassement des ouvrages, notamment des canalisations. Leur élimination est essentielle également pour limiter les problèmes de rejets de particules graisseuses, les difficultés de décantation ou les perturbations des échanges gazeux. Le dessablage et le déshuilage se réalisent le plus souvent dans un même ouvrage : les sables décantent au fond de celui-ci tandis que les graisses remontent en surface. Le déshuilage peut aussi se faire par coalescence. Ce procédé permet un niveau de déshuilage hors-norme

Le traitement secondaire se fait le plus couramment par voie biologique. Une voie physico-chimique peut la remplacer ou plus souvent s'y ajouter pour favoriser la floculation et coagulation des boues ou permettre, par exemple, la fixation des phosphates.

4. Traitement du sol

Quatre techniques sont envisageables selon le type de pollution :

- in situ,
- sur site après excavation des terres,
- hors site,
- par confinement.

4.1. Le traitement in situ

Ce mode de traitement permet d'extraire et de traiter les polluants sur place. Ces derniers sont soit dégradés, soit fixés dans le sol grâce à des liants hydrauliques.

Nature de la pollution	Principe du traitement	Type de traitement
Produits volatils	Extraction des polluants volatils par mise en dépression	Venting (extraction sous vide)
Hydrocarbures	Dégradation des polluants par des bactéries	Bio-dégradation
Hydrocarbures volatils et semi-volatils	Combinaison des deux techniques précédentes	Bio-venting
Polluants vaporisables (solvants chlorés)	Mise en phase vapeur des polluants dissous	Stripping
Tous produits (notamment polluants organiques ou métaux)	Entraînement des polluants à l'eau et récupération par pompage	Lessivage

4.2. Le traitement sur site après excavation des terres

Il permet d'extraire et de traiter les terres à dépolluer. La terre peut ensuite être laissée sur le site ou évacuée après traitement.

Nature de la pollution	Principe du traitement	Type de traitement
Hydrocarbures légers et lourds, métaux	Extraction à l'eau ou avec un solvant	Lavage
Hydrocarbures volatils non chlorés (essence, fuel, kérosène)	Evaporation et/ou craquage et/ou combustion incomplète	Désorption thermique

4.3. Le traitement hors site

Il permet d'excaver et d'évacuer les déchets, terres et eaux polluées vers un centre de traitement ou de stockage adapté.

Nature de la pollution	Type de traitement
Toutes (sauf contraintes d'acceptation)	Enfouissement des terres en site de classe I
Hydrocarbures	Traitement biologique en centre collectif
Toutes (sauf contraintes d'acceptation)	Incinération en centre spécialisé

4.4. Le confinement

Le confinement permet de laisser les terres à dépolluer sur le site en empêchant la propagation des polluants grâce à une barrière étanche : géo membrane, couverture imperméable, paroi moulée, etc. L'érosion des sols, la percolation de l'eau vers la nappe et le ruissellement sur les terres polluées sont ainsi évités.

5. Traitement des déchets

5.1. Traitement thermique par incinération

Les installations sont équipées de systèmes de traitement et d'épuration des fumées avant rejet à l'atmosphère allant bien au-delà des prescriptions réglementaires, conformément aux objectifs du groupe d'anticipation réglementaire. Les rejets sont mesurés et analysés en continu, et sont soumis à contrôle par des laboratoires agréés. Ils sont également soumis au contrôle des DREAL.

L'énergie thermique dégagée par les installations d'épuration et de traitement des fumées est récupérée et valorisée sous forme d'électricité et/ou de vapeur.

5.2. Stockage

Les déchets sont stockés dans des alvéoles dédiés conçues sous plan assurance qualité, et dont les niveaux d'étanchéité vont au-delà des prescriptions réglementaires afin de garantir, sur le long terme, la préservation des milieux. La traçabilité y est garantie grâce à une gestion 3D du remplissage qui permet de faire un repérage topographique des déchets stockés.

5.3. Traitement physico-chimique

Les traitements sont fonction de la nature du déchet : traitement des effluents sur des résines échangeuses d'ions, neutralisation des pH extrêmes (acides-bases), cassage des émulsions huileuses par centrifugation, traitement biologique, ...

Chapitre 06

Impact des pollutions sur la santé et l'environnement

Visible ou insidieuse, la pollution atmosphérique apparaît de plus en plus présente en ville. Inlassablement, elle resurgit lors des périodes de grandes chaleurs. Mais quel est son réel impact sur la santé ? Peut-elle aggraver certaines maladies ou favoriser leur apparition ? Des effets sur la mortalité sont-ils observés ?

De nombreuses études permettent aujourd'hui d'affirmer que même à des niveaux faibles, la pollution a des effets néfastes sur notre santé. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, "trois millions de personnes meurent chaque année sous l'effet de la pollution atmosphérique, soit 5 % des 55 millions de décès annuels dans le monde. Vu la marge d'incertitude des estimations, le nombre réel des décès annuels pourrait se situer entre 1,4 et 6 millions".

Quels sont les risques ?

Les polluants peuvent être de différentes natures. Il peut s'agir de gaz ou de particules ayant des propriétés irritantes pour l'appareil respiratoire. Les conséquences vont d'une baisse de la capacité respiratoire à une incidence sur la mortalité à plus ou moins long terme.

A court terme :

Polluants	Effets sur la santé
Dioxyde d'azote (NO₂)	<p>Gaz irritant pouvant pénétrer profondément dans les poumons. Il altère l'activité respiratoire et augmente les crises chez les asthmatiques.</p> <p>Chez les plus jeunes, il favorise des infections microbiennes des bronches. Les effets de ce polluant ne sont pas tous identifiés. Il est un bon indicateur de la pollution automobile.</p>
Ozone (O₃)	<p>Gaz agressif, fortement irritant pour les muqueuses oculaires et respiratoires. Il pénètre aisément jusqu'aux voies respiratoires les plus fines. Il peut ainsi entraîner des irritations du nez, des yeux et de la gorge, des altérations de la fonction pulmonaire, des essoufflements et des toux. Il exacerbe les crises d'asthme.</p> <p>Il ne semble pas possible de déterminer un seuil en dessous duquel ce polluant serait totalement inoffensif. De plus, les effets d'une exposition chronique sur le long terme restent encore mal connus.</p>
Dioxyde de soufre (SO₂)	<p>Gaz irritant pouvant entraîner des crises chez les asthmatiques, augmenter les symptômes respiratoires aigus chez l'adulte et l'enfant : gêne respiratoire, accès de toux ou crises d'asthme.</p>
Particules en suspension	<p>Les plus grosses sont retenues par les voies aériennes supérieures. Les plus dangereuses sont les plus fines, car elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons et transporter des composés toxiques.</p> <p>Elles augmentent le risque d'infections respiratoires aiguës chez l'enfant et renforcent des sensibilités allergiques ou des pathologies préexistantes.</p> <p>Une grande partie de cette pollution vient des transports. Les émissions des moteurs diesels sont particulièrement riches en particules de petites tailles. De plus, certaines particules en suspension contiennent des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) aux propriétés mutagènes et cancérogènes</p>

Monoxyde de carbone (CO)	A fortes doses, il est un toxique cardio-respiratoire souvent mortel ; A faibles doses, il diminue la capacité d'oxygénation du cerveau, du coeur et des muscles. Sa nocivité est particulièrement importante chez les insuffisants coronariens et les foetus.
Benzène (C6H6)	Composé cancérigène pour l'homme.

Source : DRASS

A long terme

Les effets à long terme restent mal connus car difficiles à évaluer. Cependant, certaines études américaines comparant les indices de mortalité des villes ayant la meilleure qualité d'air avec les plus polluées semblent confirmer l'action néfaste de la pollution.

Au niveau planétaire

La pollution de l'air est due à l'émission d'éléments de différentes sortes dans l'atmosphère. Même s'ils sont émis localement (au niveau d'une ville par exemple), ces polluants ont des conséquences à la fois au niveau local, régional et planétaire :

- **les pluies acides** : sous l'effet des oxydes d'azote (NO_x) et du dioxyde de soufre (SO₂), les pluies, neiges, brouillard deviennent plus acides et altèrent les écosystèmes ;
- **la contribution à l'effet de serre et au réchauffement planétaire** : l'industrie, l'agriculture, les transports émettent des polluants tels que le gaz carbonique, le méthane... Ces gaz participent à l'effet de serre et donc au réchauffement planétaire.
- **la destruction de la couche d'ozone** : la couche d'ozone est une partie de la stratosphère qui contient de l'ozone (O₃). Située entre 30 et 40 nbsp;km de la surface terrestre, la couche d'ozone permet d'absorber une partie importante du rayonnement ultraviolet (UV) du soleil qui est dangereux pour les organismes vivants.

Sans couche d'ozone, la vie sur Terre ne serait pas possible. Mais depuis le milieu des années 1980, les scientifiques ont mesuré une forte baisse de l'ozone dans la stratosphère au-dessus du continent de l'Antarctique. C'est le fameux « trou de la couche d'ozone »