

SOURCES D'ENERGIE ET MATIERE

QUELQUES IDEES SIMPLES

La vie, les activités des trois composants du vivant, bactéries, archées et eucaryotes, dépendent de l'énergie dont ils disposent. Faute d'énergie, pas de vie. Certes l'énergie n'est pas le seul facteur déterminant : l'eau, l'air, les matières premières, le sol fertile, l'environnement adéquat font parties des éléments favorisant la vie. Mais eux-mêmes résultent principalement de la transformation de l'énergie primordiale en atomes, puis molécules, cellules, etc..., résultant en un univers au sein duquel une Terre est apparue et s'est développée. La disponibilité de l'énergie représente la base nécessaire à l'organisation de la matière et au développement.

Louv' Science

Fête de la Science 07/10/2022



SOURCES D'ENERGIE ET MATIERE

QUELQUES IDEES SIMPLES

1. L'ENERGIE : DE QUOI PARLE-T-ON ?¹

Nous sommes tous entourés d'énergie : dans notre corps, notre maison, notre environnement... Elle est là, dans notre quotidien, mais qu'est-ce que l'énergie ?

Le mot « énergie » vient du Grec Ancien « energia », qui signifie « La force en action ». Ce concept scientifique est apparu avec Aristote et a fortement évolué au cours du temps. Aujourd'hui, l'énergie désigne « la capacité à effectuer des transformations ». Par exemple, l'énergie c'est ce qui permet de fournir du travail, de produire un mouvement, de modifier la température ou de changer l'état de la matière. Toute action humaine requiert de l'énergie : le fait de se déplacer, de se chauffer, de fabriquer des objets et même de vivre.

L'énergie est partout présente autour de nous : dans la rivière qui fait tourner la roue du moulin, dans le moteur d'une voiture, dans l'eau de la casserole que l'on chauffe, dans la force du vent qui fait tourner les éoliennes... et même dans notre corps humain.

L'énergie peut exister sous plusieurs formes. Parmi les principales :

- L'énergie thermique, qui génère de la chaleur
- L'énergie électrique ou électricité, qui fait circuler les particules – électrons - dans les fils électriques
- L'énergie mécanique, qui permet de déplacer des objets
- L'énergie chimique, qui lie les atomes dans les molécules
- L'énergie de rayonnement ou énergie lumineuse, qui génère de la lumière
- L'énergie musculaire qui fait bouger les muscles.

L'énergie se conserve. La quantité totale d'énergie dans un système donné ne change pas, on ne peut donc ni la créer, ni la détruire. L'énergie est transmise d'un élément vers un autre, souvent sous une forme différente.

Un exemple : quand on chauffe de l'eau, différentes transformations d'énergie ont lieu. En brûlant dans l'air, le bois libère son énergie chimique. Cette énergie se transforme en chaleur, l'énergie thermique, et en lumière, l'énergie de rayonnement. Lors de cette réaction, la quantité d'énergie totale ne change pas, elle change simplement de forme.

¹<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/essentiel-sur-energies.aspx>.

<https://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/energies/klein-qu-est-ce-que-energie.aspx>

2. A L'ORIGINE²

A l'origine quatre interactions fondamentales régissent l'Univers : l'interaction électromagnétique, l'interaction faible, l'interaction nucléaire forte et l'interaction gravitationnelle. Les interactions électromagnétique, forte et faible sont décrites par le modèle standard de la physique des particules, qui est en cohérence avec la physique quantique, tandis que l'interaction gravitationnelle est actuellement décrite par la théorie de la relativité générale. Chacune de ces interactions a contribué à la formation et à l'évolution de l'Univers : constitution des atomes et de leurs noyaux et des molécules, propagation de la lumière, mouvement des astres, A chacune est associée une énergie.

2.1 La naissance de la Terre

Le soleil s'est formé il y a 4,5682 milliards d'années, par l'effondrement gravitationnel d'une nébuleuse sur elle-même. Il recèle assez d'hydrogène dans son noyau pour que la réaction nucléaire dure encore 7,6 milliards d'années. Comme 7 autres planètes, la Terre primitive naît d'un nuage de poussière entourant la toute jeune étoile.

Pendant plusieurs millions d'années, sous l'effet de la gravitation, les poussières s'agglomèrent en morceaux de roche de plus en plus gros pour finalement donner naissance à une proto planète qui deviendra la Terre.

Entre 40 et 200 millions d'années plus tard, une autre jeune planète nommée Théia entre en collision avec la Terre à la vitesse de 54 000 km/h. De cette collision titanesque et de l'éjection de matière qui en résultera, se formera la Lune à mesure de l'agrégation des débris.

A la suite de cette collision la Terre se refroidit et la croûte terrestre se solidifie. Provenant du dégazage du magma et des volcans, une nouvelle atmosphère se constitue, dominée par l'azote, le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau et probablement du méthane. L'absence d'oxygène rendrait ce milieu irrespirable pour des êtres tels que nous, et la terre perdit toute son eau liquide.

Entre 4,1 et 3,8 milliards d'années, une pluie de météorites, de débris de corps glacés (astéroïdes, comètes) issus de la formation du système solaire s'abat sur la Terre lui permettant de constituer l'eau présente dans les océans.

Ce bombardement incessant n'apporte pas que de l'eau. En se décomposant au fond des océans, les météorites libèrent du carbone.



² Sur l'origine du système solaire voir le livre de Sylvain Chaty : *La colonisation de l'espace à l'œil nu*, Edition du CNRS, collection "à l'œil nu", (2020), dont certains éléments sont résumés ici.

2.2 Et vint la vie

La vie terrestre est basée sur la chimie du carbone et principalement de cinq atomes clés : hydrogène, azote, oxygène, phosphore et soufre. Les molécules simples contenant du carbone comme le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄) présentes sous forme gazeuse dans l'atmosphère, s'assemblent en générant les premières molécules organiques à l'origine de l'apparition et du développement de la vie : des briques élémentaires constituant des premiers organismes vivants.

Les êtres vivants s'épanouissent aujourd'hui sur Terre sous des formes tellement variées, qu'il est bon parfois de se rappeler qu'il n'en a pas toujours été ainsi. Pour arriver à une telle diversité, les organismes ont évolué, en suivant des scénarios différents, depuis un ancêtre commun universel, dénommé LUCA (**L**ast **U**niversal **C**ommon **A**ncestor).

Mais qui est-il exactement ? Si on considère que les premières cellules, briques de tous les organismes, apparaissent probablement sur Terre il y a entre 3,8 et 3,5 milliards d'années, quelles furent ces premières entités originelles qui allaient donner naissance à LUCA ? La descendance de LUCA fut riche de l'extrême diversité des êtres vivants, mais n'y a-t-il eu qu'un seul LUCA ou plusieurs ?

Les éléments disponibles sur la Terre primitive étaient-ils suffisants pour permettre l'émergence de LUCA ? Il est difficile, (voire impossible) aux chercheurs de créer la vie à partir des éléments constituant de la Terre primitive. Les molécules pré-biotiques (acides aminés) ne peuvent pas être constituées sur la Terre. D'où proviennent-elles ? Il reste la possibilité que ces éléments aient été synthétisés dans les nébuleuses interstellaires, véritables réservoirs de gaz et de poussières dont on sait aujourd'hui que plus de 150 molécules y ont été détectées, dont 112 molécules organiques contenant jusqu'à 13 atomes. Certains biologistes pensent qu'il a fallu l'apport de ces molécules au départ de la vie sur la Terre.

C'est dans l'eau froide des fonds marins, qu'issus des roches fracturées, s'échappent des liquides bouillants chauffés par le plasma. Au sein de ce bouillon chimique, différents composants s'assemblent en structures organiques complexes conduisant à la cellule ancestrale avant que sa lignée ne se sépare pour donner naissance aux trois domaines du vivant : les bactéries et les archées, procaryotes êtres unicellulaires, et les eucaryotes auxquels notre genre appartient :

- Les bactéries, dépourvues de noyau, dont les descendants sont aujourd'hui omniprésents, sont les premiers organismes à apparaître dans les profondeurs de l'océan, les plus vieux habitants de la planète.
- Les archées, vraisemblablement issues des bactéries primitives, apparaissent ensuite : souvent considérés comme des archéobactéries de l'extrême, elles seront plus tard les premiers organismes à coloniser les roches nues de la Terre primitive vers 500 millions d'années.
- Les eucaryotes, dont nous êtres humains, animaux, végétaux, et champignons faisons partie.

Et progressivement la vie s'étendit à la planète en se diversifiant au gré de transformations et d'évolution systémiques : Glaciations, éruptions volcaniques massives, collision avec un météorite : Au cours des 500 derniers millions d'années, cinq extinctions d'intensités différentes ont fait disparaître 75% des espèces animales et végétales.

2.3 L'énergie.

La vie, les activités des trois composants du vivant, bactéries, archées et eucaryotes, dépendent de l'énergie dont ils disposent. Faute d'énergie, pas de vie. Certes l'énergie n'est pas le seul facteur déterminant : l'eau, l'air, les matières premières, le sol fertile, l'environnement adéquat font parties des éléments favorisant la vie. Mais eux-mêmes résultent principalement de la transformation de l'énergie primordiale en atomes, puis molécules, cellules, etc..., résultant en un univers au sein duquel une Terre est apparue et s'est développée. **La disponibilité de l'énergie représente la base nécessaire à l'organisation de la matière et au développement.**

L'être humain exploite plusieurs phénomènes naturels pour obtenir de l'énergie. La source primaire d'énergie accessible sur Terre est le rayonnement dérivé de l'énergie primordiale constituante du soleil, des étoiles et du magma central terrestre, (mise à part l'énergie marémotrice issue de son interaction avec la lune).

Il existe un lien ancien et permanent entre l'utilisation de différentes formes d'énergie et l'évolution de nos sociétés depuis la préhistoire. L'utilisation des différentes formes d'énergie représente le fil conducteur d'une histoire matérielle de l'humanité dont les tournants majeurs furent la transformation néolithique, la révolution industrielle et l'entrée dans l'anthropocène.

Tout ce que l'homme consomme est de l'énergie transformée : transformations chimiques associées à son métabolisme, lipides, glucides, protéines nécessaires à sa physiologie ; mais aussi, chauffage, transport, fabrication de produits manufacturés, fonctionnement des machines, etc., ...

Si la quantité d'énergie disponible dans l'univers est quasiment infinie, le problème pour l'être humain est de contrôler celle qui est disponible sur Terre et de la transformer dans les formes utiles au moment où il en a besoin : d'où le rôle des convertisseurs³. Un convertisseur est un objet, un process, qui recueille une forme d'énergie et la transforme en une autre : ainsi en est-il de la machine à vapeur qui transforme la vapeur d'eau produite par le chauffage au charbon en énergie mécanique ou de la photosynthèse qui transforme l'énergie solaire en énergie chimique. Bien évidemment, toute transformation d'énergie entraîne des consommations et des pertes, l'énergie utile obtenue étant toujours moindre que l'énergie disponible au départ. Plusieurs transformations successives sont parfois nécessaires, accumulant ainsi les pertes. Les pertes se dissipant in fine en chaleur, la forme la plus dégradée de l'énergie.

Plantes et animaux sont des convertisseurs naturels. L'homme peut utiliser l'énergie accumulée dans les plantes (glucides, protéines végétales) en les consommant. Il peut aussi les brûler pour se chauffer. Les animaux au travail sont des convertisseurs transformant l'énergie chimique (glucides, protéines des fourrages) en énergie mécanique ; consommés à leur tour comme viande de boucherie, les animaux servent alors à transformer les fourrages en énergie chimique ayant une grande valeur nutritive pour l'homme sous forme de protéines et de lipides. Il en est ainsi de tout le cycle animal et végétal. Plantes et animaux impliquent eux aussi des pertes d'énergie dont une partie est liée à leur consommation propre. Hors de leur production d'énergie mécanique, les animaux de trait dissipent une part de leur énergie sous forme de chaleur.

³ *La trame de ce texte, et certaines idées ainsi que le concept de convertisseur sont empruntés à C. M. Cipolla, "Sources d'énergie et histoire de l'humanité", Annales Economies, sociétés, civilisations, 16^{ème} années, N° 3, (1961).*

Bref, ne consomme-t-il qu'une plante, que l'homme utilise une quantité d'énergie, fraction de l'énergie solaire employée par cette plante dans son cycle de vie ? mange-t-il de la viande, il utilisera à son profit une énergie représentant une fraction seulement de celle que l'animal a absorbé à partir des plantes dont il s'est nourrit. Quand l'homme consomme des protéines animales, il consomme un produit grevé de pertes cumulatives des deux convertisseurs successivement utilisés. Il en résulte que les peuples pauvres consomment moins de protéines animales que les peuples riches, les animaux concurrençant directement l'homme dans l'utilisation des plantes comme alimentation.

L'homme étant un convertisseur d'énergie, il produit de l'énergie mécanique. De ce constat est né la forme institutionnalisée de l'exploitation humaine qu'est l'esclavage.

Techniquement parlant, les êtres humains sont des moteurs⁴. À ceci près qu'il est impossible de les arrêter, (sauf par la mort, encore que la décomposition biochimique qui s'en suit réalimente le cycle de la vie). Même au repos, nous consommons un petit peu d'énergie pour maintenir le système en marche. Notre cœur, par exemple, consomme en continu pour faire circuler le sang dans nos veines. Notre cerveau consomme plus d'énergie que n'importe quel autre organe humain : jusqu'à 20 % de la consommation totale ! Deux tiers du budget énergétique du cerveau permettent aux neurones d'envoyer et de recevoir des signaux. Le dernier tiers est utilisé pour la « maintenance », c'est-à-dire l'entretien des cellules.

Pendant un effort physique, notre consommation énergétique augmente et est convertie en travail et en chaleur. Au repos, nous chauffons en permanence. Chez un individu en bonne santé et dont la corpulence est stable, toute la ration quotidienne de nourriture finit en chaleur.

Lors d'un effort, la production totale d'énergie augmente à peu près quatre fois comme le travail effectué, ce qui s'explique par le rendement musculaire de l'ordre de 25 %. L'effort s'accompagne d'une production de chaleur correspondant à l'énergie totale produite moins celle dispersée dans le travail effectué. L'évaporation, très gourmande en énergie, joue le rôle clé dans le mécanisme de thermorégulation qui permet de maintenir notre température.

3. L'HOMME PARASITE.

Depuis l'apparition des hominidés (-7 millions d'années) et à mesure de leurs évolutions et disparitions successives, jusqu'à l'homme que nous sommes (homo sapiens, à partir de -200 000 ans), les seuls convertisseurs que les hommes aient connus et employés, ont été les convertisseurs biologiques directement disponibles dans la nature : plantes, animaux, hommes. Ne connaissant ni l'agriculture ni l'élevage, nos lointains ancêtres chasseurs, pêcheurs, cueilleurs de fruits et de baies, consommateurs d'herbes sauvages, (cannibales à l'occasion), ne produisaient aucune énergie.

Bien sûr durant cette longue période, les hominidés apprirent à utiliser, entretenir, produire et domestiquer le feu⁵. Si des traces d'une utilisation temporaire et ponctuelle, probablement à partir de feux naturels, indiquent que le feu commencerait à être apprivoisé il

⁴ 4 P. Manil, *Futura Science*, 31/01/2019, <https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/energie-energie-sous-toutes-formes-1876/page/3/> .

⁵ 5 Ces informations consacrées à la domestication du feu sont issues de la traduction française d'un article de Wikipédia anglais intitulé « Control of fire by early humans ». https://fr.wikipedia.org/wiki/Domestication_du_feu .

Il y a 1,5 millions d'années, la présence incontestable il y a environ 400 000 ans, de foyers entretenus sur différents sites archéologiques est attestée par une accumulation d'os d'animaux brûlés et noircis, par les couches de cendres accumulées dans les sédiments, et par la présence d'une concentration de pierres impactées par une forte chaleur .

La maîtrise du feu qui permet le traitement des aliments par la chaleur est un élément clé de l'évolution humaine ; outre la détoxification de certains aliments entraînant une baisse de la mortalité et un sevrage plus rapide des enfants, la cuisson augmente la valeur énergétique des aliments, et les rend plus facilement assimilables. La cuisson de la viande mais surtout des légumes-racines tubéreuses agit comme une forme de « prédigestion », permettant de consacrer moins d'énergie à la digestion de la viande, des tubercules, ou de protéines. L'importance énergétique du tube digestif ainsi diminuée a permis d'octroyer plus d'énergie au cerveau humain. Comme des neuroscientifiques l'ont montré, le nombre de neurones est directement corrélé à la quantité d'énergie (ou de calories) nécessaire pour alimenter le cerveau. La cuisson des aliments a donc permis de faire sauter un verrou physiologique et métabolique, fournissant plus d'énergie au cerveau qui aujourd'hui ne représente que 2 % de la masse corporelle des hommes modernes mais consomme 20 % de l'énergie basale nécessaire au corps humain.

Le feu a fourni une protection contre les prédateurs autour des campements au sol. Grâce à l'éclairage qu'il permet, les humains ont pénétré les cavernes. Ils ont pu prolonger leurs activités durant la nuit, restreindre l'effet des rigueurs de l'hiver, et conquérir de nouveaux espaces dans les zones tempérées froides.

Le feu a aussi permis d'améliorer la qualité des outils en permettant de durcir au feu la pointe des épieux et des lances, puis en échauffant les matériaux (os, silex) pour les consolider ou faciliter leur débitage.

Enfin, il fut un facteur de convivialité et de socialisation le soir autour du foyer.

Pendant ces centaines de milliers d'années, les humains ont assuré leur subsistance avec la chasse, la pêche et la cueillette. Les chasseurs-cueilleurs commencèrent à contrôler leur environnement afin de favoriser le développement des espèces végétales et animales qu'ils consommaient. L'utilisation du feu notamment, permettait de créer des prairies pour les herbivores, la conservation de certaines plantes ou l'élimination du sous-bois des forêts pour faciliter la chasse. La sélection des individus à prélever ou à laisser en place pour assurer le renouvellement ou améliorer la qualité des populations de plantes ou d'animaux, furent des formes de gestion qui ont affecté l'histoire évolutive des espèces exploitées, dans une direction favorable aux humains.

Mais durant toute cette longue période qui a certes vu l'être humain mieux maîtriser son environnement, sécuriser sa fratrie, améliorer ses conditions de vie, développer ses techniques de prédateur grâce à la meilleure utilisation de la pierre et du bois (pierres taillées, silex, outils tranchants, armes, épieux) son rapport aux sources d'énergie ne changea pas. Tous ces pas en avant ne concernaient après tout que l'efficacité de l'homme animal de proie.

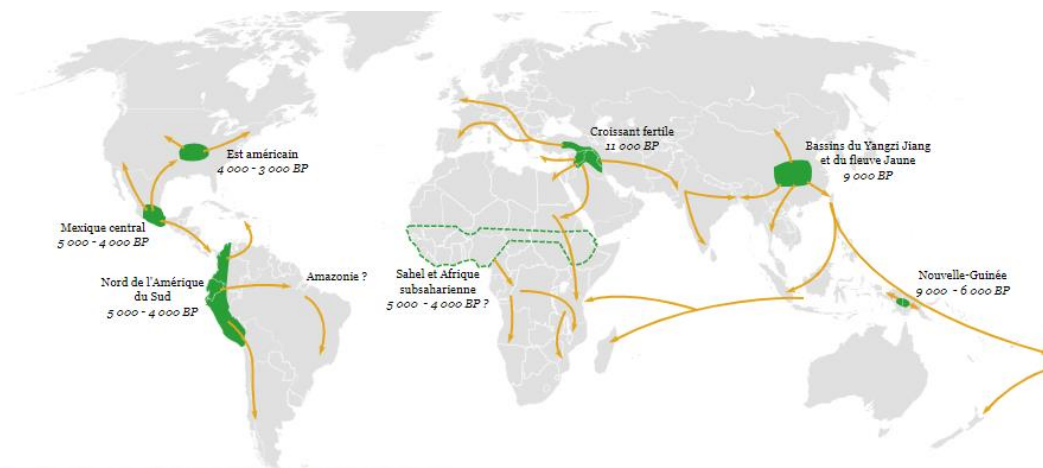
Durant toute cette période, l'homme demeura essentiellement un parasite dont les possibilités étaient limitées par la quantité existante de ces convertisseurs biologiques d'énergie dont il usait pour son développement et celui de son groupe. L'homme prélevait les ressources issues de ces convertisseurs biologiques et plus il était efficace plus il en prélevait.

4. LES PREMIERS PAS DE L'HOMME PRODUCTEUR.

Pour passer à l'agriculture⁶, les humains accumulent les connaissances sur les cycles biologiques des plantes et des animaux, développent les techniques qui permettent de les exploiter et apprennent à modifier à leur profit les cycles naturels (par exemple la reproduction et la sélection des espèces).

De manière générale, cette transition suppose plusieurs millénaires de proto-élevage et de proto-agriculture. Elle apparaît suffisamment radicale pour qu'on lui donne le nom de révolution néolithique, bien qu'elle soit très progressive.

Les conditions climatiques propices au développement de l'agriculture ne sont apparues que vers la fin du Pléistocène, soit 9 700 av. J.-C., à cause d'une faible productivité végétale due à une faible teneur en CO₂ de l'atmosphère terrestre. Préhistoriens et anthropologues s'accordent pour admettre que les premières expériences de domestication des plantes et des animaux eurent lieu au moyen orient (croissant fertile) et en Chine, il y a entre 7 et 9 000 ans.



D'après J. Diamond et al. (2002) "Farmers and Their Languages: The First Expansions", Science

Après cette révolution, la vie matérielle de l'homme demeure encore presque exclusivement dépendante des convertisseurs biologiques. Mais en apprenant à produire, donc à en augmenter la quantité, l'homme ouvrait le goulot d'étranglement qui constituait un obstacle à tout accès vers des niveaux de vie différents de celui des animaux. Du jour où l'homme devint agriculteur ou éleveur — ou les deux à la fois — son contrôle sur le monde extérieur s'affermait : à ce moment-là, une première civilisation technicienne commença. Cette nouvelle phase, agro-pastorale, ne commença pas au même instant pour tous les peuples (cf. carte). Mais on peut dire qu'en 2000 av. JC, la plus grande partie de l'Humanité avait atteint ce stade agro-pastoral et devait y demeurer jusqu'à la révolution industrielle.

Au cours des siècles de cette seconde phase, des progrès continus et innombrables furent faits, des innovations techniques apparurent ; mais, presque toutes visèrent à augmenter le taux de rendement technique des convertisseurs biologiques. Il en est ainsi :

⁶ Histoire de l'agriculture : https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_l%27agriculture

- Des améliorations qualitatives des plantes et des animaux, grâce aux hybridations, aux sélections et à leur acclimatation aux différentes régions et terrains.
- De toutes les découvertes et améliorations des différentes techniques d'irrigation, de rotation des cultures ou de fertilisation des terres.
- De l'invention d'outils spéciaux, comme la houe, la charrue et tant d'autres, contribuant à l'amélioration des rendements.
- Du façonnage des métaux qui doit être considéré dans la même perspective : La construction de charrues en fer, ouvrirent les terrains « durs » à la culture et permit ainsi l'extension de la production aux régions jusqu'alors trop pénibles à labourer.
- De l'utilisation des animaux de trait, de l'invention de la roue. Apparue vers 3500 av. J.-C., (dès les Sumériens) la roue est considérée comme le premier ouvrage technique significatif de l'histoire de l'humanité, que ce soit pour l'irrigation, les moulins, les tours de potiers ou pour le transport.
- De l'adaptation du fer à cheval et des améliorations consécutives des techniques de l'attelage, ...

Toutes ces inventions furent aussi autant d'étapes dans l'amélioration du taux de rendement des convertisseurs biologiques. En somme, **pendant des siècles et des siècles, l'humanité fut occupée essentiellement à perfectionner la découverte fondamentale de la révolution néolithique. Et tous ces perfectionnements représentaient un accroissement de la quantité d'énergie utile disponible.**

Toutefois durant cette longue période, quelques convertisseurs artificiels apparurent, se développèrent et diffusèrent : les moulins à eau et à vents et la navigation à voile constituèrent une exception importante à l'amélioration des convertisseurs biologiques.

L'origine du bateau à voile est attestée aux environs de l'an 3500 av. J.-C. A partir de cette date, des témoignages toujours plus nombreux signalent une diffusion rapide du bateau à voile, pour ainsi dire sur toutes les mers du monde. Le bateau à voile apporta une contribution décisive au développement économique des sociétés anciennes. Ce n'est pas un hasard, en effet, si toutes les grandes civilisations préindustrielles se sont développées autour de mers aisément navigables, (la Méditerranée par exemple).

Les moulins à eau⁷ ont, vraisemblablement, été découverts en Asie, mais à une époque encore non déterminée. En occident, le moulin à eau était en place dès l'Antiquité classique. Les sources arabes, grecques et latines, permettent de faire remonter l'invention du moulin à eau à Byzance et à l'école d'Alexandrie, au 3^{ème} siècle av. J.-C. Sa diffusion est avérée dans l'empire romain au 2^{ème} siècle apr. J.C., et son développement pris de l'importance en plein Moyen Age occidental. Le moulin à eau est crucial dans l'histoire des techniques à double titre :

- Il touche un aspect essentiel de l'alimentation humaine (la mouture des céréales),
- C'est la première application pratique d'un moteur, autre que l'homme ou l'animal, pour faire fonctionner un mécanisme.

Plus tardive, l'utilisation du moulin à vent est attestée en Perse pour l'irrigation. Il est apparu en 620 sur le territoire de l'est de l'actuel Iran, notamment à Nashtifan, dans la province du Khorassan, surnommée l'ancienne ville des moulins. Signalé très tôt en Grande-Bretagne (abbaye de Croyland en 870) le moulin à vent s'est généralisé en Europe vers le 12^{ème} siècle, d'abord sur les côtes maritimes des pays du Nord : Grande-Bretagne,

⁷ *Histoire du Moulin à eau, Philippe Fleury (2018) : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01718863>*

Pays-Bas, puis dans les pays de la bordure atlantique (Portugal, France), de la mer du Nord et de la mer Baltique (Belgique, Allemagne, Danemark) et dans les îles, y compris en mer Méditerranée. On les trouve sur des éminences, soit isolés, soit groupés en série, ainsi que dans des lieux éloignés des cours d'eau. La première attestation de moulin à vent en France, en 1170, figure dans une charte de la ville d'Arles.

Ces trois « machines » permirent à l'homme de capter de nouvelles sources d'énergie. Cela dit, l'importance du bateau à voile, des moulins à eau ou à vent, ne doit pas être surestimée. Des raisons techniques ou géophysiques évidentes limitèrent l'usage des moulins, tandis que des raisons techniques ou militaires limitèrent aussi l'usage et l'efficacité de la navigation à voile.

Dans l'ensemble, la découverte de ces convertisseurs artificiels ne réussit pas à changer la structure énergétique fondamentale des sociétés préindustrielles. Cette structure continua à avoir les caractéristiques suivantes :

- Faible disponibilité en énergie. Dans une société préindustrielle, sauf cas tout à fait exceptionnels, la disponibilité moyenne d'énergie devait être au-dessous de de 15 à 10 000 calories par homme et par jour.
- Cette disponibilité était issue en général de convertisseurs biologiques. On ne peut pas être très loin de la vérité en affirmant que plus de 80 % des disponibilités énergétiques étaient dérivées de ces moyens.
- Les besoins physiologiques élémentaires des populations absorbaient la plupart des disponibilités énergétiques, pour la plupart employées sous forme de nourriture et de chauffage. Faut-il préciser que la dépendance presque exclusive de « machines » biologiques présente deux gros inconvénients : le taux très bas de rendement et la limitation inévitable de la production en fonction de la quantité de terres disponibles pour la culture et l'élevage. Tout le développement économique des sociétés anciennes a été conditionné par ces faits fondamentaux.

5. L'HOMME PRODUCTEUR, EXPLOITANT : LA REVOLUTION INDUSTRIELLE

La révolution industrielle a apporté un changement décisif. La nature, la signification, les limites chronologiques de cette révolution font l'objet de nombreuses discussions et non sans raison.

Cependant, il n'est pas difficile d'admettre que la révolution industrielle est essentiellement le processus qui, au système traditionnel de production fondé sur des convertisseurs biologiques, va substituer un système de production fondé sur la mise en œuvre de nouvelles sources d'énergie. Ses origines viennent de loin. Elles prennent leurs sources dans le développement des sciences exactes au 16^{ème} siècle, le déploiement et la croissance du commerce particulièrement maritime et le développement de l'artisanat au début de l'époque moderne.

La découverte et l'adoption à une large échelle des processus de production d'un convertisseur mécanique construit par James Watt et permettant la transformation du charbon en énergie mécanique, marqua le véritable début de la révolution industrielle.

La machine à vapeur fut bientôt appliquée à la production textile, à la production minière, à l'industrie des transports. A peine lancé, le mouvement cumulatif s'accéléra de lui-

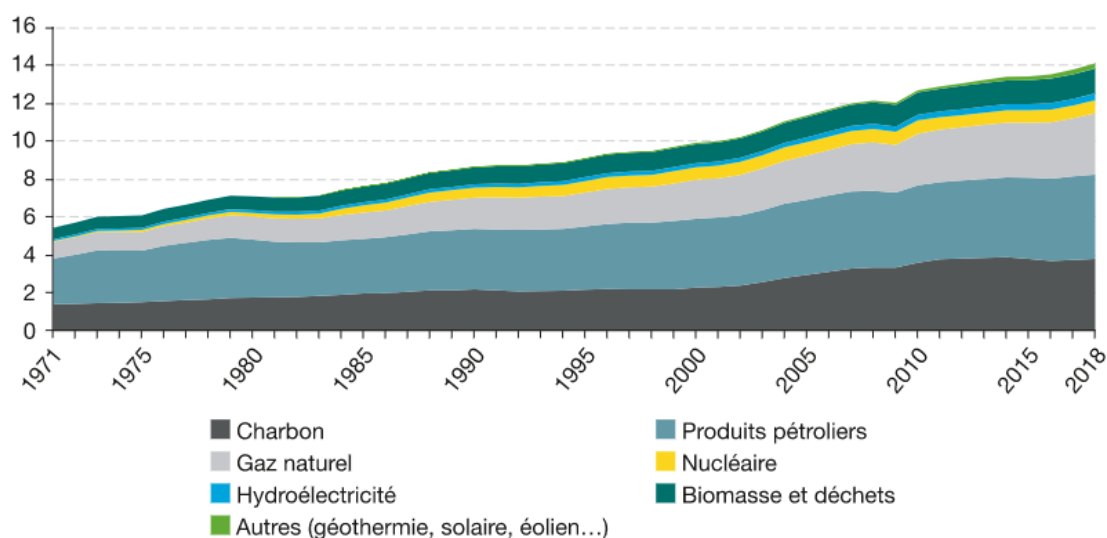
même. La disposition d'une nouvelle énergie permet à l'homme des recherches, des installations nouvelles, et des nouvelles découvertes. Après la machine à vapeur, suivirent les moteurs électriques, la lampe à incandescence, le moteur à explosion, etc., jusqu'aux réacteurs nucléaires qui seront sans doute suivi d'autres demain encore... (fusion thermonucléaire).

Pour la production d'énergie, la révolution industrielle a permis d'utiliser de façon intense et sur une grande échelle, des éléments dont l'emploi auparavant était rare ou tout à fait nul. Le recours aux convertisseurs biologiques a progressivement diminué voir a été abandonné comme le remplacement de la traction animale au profit de la traction par des engins à moteurs thermiques (tracteurs, autocars, engins de chantiers, ...) ou électriques (transports ferroviaires).

Avec l'exploitation des ressources fossiles, l'énergie disponible pour l'humanité augmente. Les nouvelles sources d'énergie découvertes par la révolution industrielle fournirent 305 Mtep en 1800. En 1900, elles en donnèrent trois fois plus (1 092 Mtep) et, en 2000, quasiment dix fois plus (9 242 Mtep)⁸.

CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE

En Gtep



L'accroissement fabuleux des disponibilités énergétiques mondiales, très supérieur à l'augmentation simultanée de la population mondiale, a permis non seulement une expansion de la consommation directe de l'énergie, mais aussi l'utilisation à une large échelle de l'énergie dans les procédés productifs et l'augmentation progressive d'énergie disponible par unité de travail.

La productivité du travail humain augmenta proportionnellement et la production mondiale de biens connut une phase pluriséculaire d'étonnante expansion.

⁸ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>
<https://www.encyclopedie-energie.org/>

6. L'ANTHROPOCENE

La révolution industrielle est-elle finie ? L'humanité est au début d'un processus gigantesque de transformation. Hier la révolution industrielle partie d'Angleterre s'est répandue dans d'autres pays et continents. Sa propagation (3 à 4 siècles) a été d'une rapidité sans commune mesure avec celle de la révolution néolithique (plusieurs millénaires). Si une large part de l'humanité est, encore à présent, plutôt employée à l'agriculture et à l'élevage qu'à l'industrie, cette situation évolue rapidement.

Les pays et les peuples en voies de développement exigent leur part du développement énergétique. Quelques soient les aspirations politiques des peuples, chacun veut sa révolution industrielle. Aujourd'hui on observe les tendances suivantes :

- L'augmentation de la population mondiale, l'amélioration progressive du standing de vie et l'industrialisation des pays sous-développés supposent un taux très important d'augmentation de la consommation mondiale d'énergie. On produit de plus en plus, et on demande de plus en plus d'énergie.
- La révolution industrielle s'est déroulée dans le cadre de l'utilisation de sources d'énergies fossiles qui existent en quantités limitées. Que sait-on des réserves ? Si les opinions divergent, aucun doute cependant, ces ressources ne dureront pas indéfiniment. Si la demande en énergie disponible augmente, l'homme doit chercher de nouveaux convertisseurs qui lui permettent d'utiliser d'autres sources d'énergie renouvelable⁹ (énergie solaire, éolienne, hydraulique) ou pratiquement inépuisables (nucléaire).
- L'utilisation massive des énergies fossiles avec la libération des gaz à effet de serre est sans conteste à l'origine du réchauffement climatique.
- Les activités humaines sont en train de laisser une empreinte profonde dans notre environnement. Certes, l'impact de l'homme sur celui-ci dure depuis des siècles voire des millénaires. Mais notre espèce est devenue une force en mesure de modifier sensiblement l'évolution de la Planète.
- Une nouvelle phase dans l'histoire énergétique de l'humanité se dessine : nouvelles sources d'énergie plus difficiles mettre en œuvre, énergies propres et sans risque demandant des efforts importants pour les contrôler, respect de l'environnement, ...

Le terme de chronologie géologique « Anthropocène » signifie littéralement "l'âge de l'Homme". Il a été employé initialement par des chercheurs soviétiques au début des années 1960, puis théorisé par Paul Josef Crutzen, prix Nobel de Chimie en 1995. Depuis, l'idée a fait son chemin jusqu'à la reconnaissance officielle, le 29 août 2016, par un groupe international d'experts réunis au Congrès géologique international du Cap (Afrique du Sud) :

« L'Homme est devenu une force telle qu'il modifie la planète », y a déclaré Catherine Jeandel, directrice de recherche au CNRS.

Les activités humaines sont en train de laisser une empreinte profonde dans les couches géologiques. Quand l'Anthropocène a-t-il vraiment commencé ? Plusieurs marqueurs sont évoqués, proches de nous :

⁹ La notion d'énergie renouvelable est un abus de langage. L'énergie solaire, par exemple, n'est pas a priori renouvelable ; c'est sa disponibilité pour des millénaires encore qui, à notre échelle, la rend inépuisable, donc renouvelable par opposition aux énergies fossiles. Mais l'énergie utilisée un jour pour produire l'électricité à partir de panneaux ne se reconstitue pas elle est remplacée en continu par la flux de rayonnement provenant du soleil.

- En 1962, quand s'accélère l'exploitation intensive du charbon et du pétrole et l'utilisation massive des engrais chimiques et de nouveaux matériaux (céramiques, plastiques, ciments) ?
- En 1945, lors de l'utilisation des premières bombes atomiques marquant durablement les sédiments et roches de radionucléides ?

Faut-il dater l'anthropocène des débuts de l'ère industrielle ?

- En 1809, au début de la révolution industrielle marquant l'accroissement des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ?
- En 1784, date du brevet de la première machine à vapeur de James Watt ?
- Du néolithique, lors de la sédentarisation de l'homme ?
- Il y a 100 000 ans lors de la domestication du feu ?

A ce stade de connaissance, laissons la science en décider ; mais "Adieu donc à notre aire géologique actuelle, l'Holocène".

7. LES SOURCES D'ÉNERGIE.

L'énergie est issue de différentes sources d'énergie qui peuvent être classifiées en deux groupes : les énergies non renouvelables, dont les sources ont des stocks sur Terre limités et les énergies renouvelables qui dépendent d'éléments que la nature renouvelle en permanence.

7.1 Les sources d'énergie non renouvelables

Énergies fossiles

Dans les énergies non renouvelables, on trouve les énergies dites fossiles : ce sont les résidus des matières végétales et organiques accumulés sous terre pendant des centaines de millions d'années. Ces résidus se transforment en hydrocarbure (pétrole, gaz naturel et de schiste, charbon...). Pour pouvoir les exploiter, il faut puiser dans ces ressources qui ne sont pas illimitées, c'est pourquoi les énergies fossiles ne sont pas renouvelables.

Énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est « localisée » dans le noyau des atomes. Dans les centrales nucléaires actuelles, on utilise la fission (cassure) des noyaux d'uranium, élément que l'on retrouve sur Terre dans les mines. Les mines d'uranium s'épuiseront un jour tout comme le charbon, le gaz et le pétrole.

Au rythme de l'utilisation des ressources actuellement exploitées, on estime les réserves de pétrole à 40 ans, de gaz naturel conventionnel à 60 ans et de charbon à 120 ans. Les réserves d'uranium, combustible de l'énergie nucléaire, à 100 ans avec les réacteurs actuels.

7.2 Les sources d'énergies dites renouvelables

Le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie sont des sources qui ne s'épuisent pas et sont renouvelées en permanence.

Biomasse et géothermie : quelles différences ?

La biomasse et la géothermie sont deux sources d'énergies bien distinctes.

La géothermie est l'énergie générée par la chaleur des profondeurs de la Terre et sa radioactivité. Le mot « géothermie » vient du grec « geo » (la terre) et « thermos » (la chaleur). On l'exploite pour chauffer des habitations grâce à des forages légers.

La biomasse a, quant à elle, pour source le Soleil dont l'énergie de rayonnement est transformée en énergie chimique par les matières organiques d'origine végétale (bois), animale, bactérienne ou fongique (champignons). Il existe des centrales « biomasse » qui produisent de l'électricité avec la combustion de matières organiques.

Parmi toutes ces sources d'énergie, on distingue les énergies primaires des énergies secondaires.

7.3 Énergie primaire

Une énergie primaire est une énergie brute n'ayant pas subi de transformation, dont la source se trouve à l'état pur dans l'environnement. Le vent, le Soleil, l'eau, la biomasse, la géothermie, le pétrole, le charbon, le gaz ou l'uranium sont des sources d'énergies primaires.

7.4 Énergie secondaire

On appelle « énergie secondaire » une énergie qui est obtenue par la transformation d'une énergie primaire.

Par exemple, l'électricité est une énergie secondaire qu'on obtient à partir de plusieurs énergies primaires : l'énergie solaire avec des panneaux, l'énergie nucléaire avec des réacteurs, l'énergie hydraulique avec des barrages ou encore l'énergie du vent avec des éoliennes. Il n'existe pas d'électricité à l'état naturel.

L'essence, le gasoil et les biocarburants sont également des énergies secondaires ; on les obtient par la transformation du pétrole, qui lui, est brut ou de la biomasse. L'hydrogène, qui n'existe pas à l'état pur, est également une énergie chimique secondaire car il faut le produire.

8. CHOIX ENERGETIQUES : QUELS CRITERES PHYSIQUES JUSTIFIENT LES CHOIX ?

Les choix énergétiques se portent naturellement vers des sources de plus en plus fortes densité d'énergie. Cette évolution est dictée par une demande croissante d'énergie dans les sociétés industrielles ou en voie de le devenir et suit le progrès des connaissances sur la structure de la matière qu'accompagne le développement technologique.

Ces dernières années, cette tendance s'inverse. Le retour à des choix énergétiques de sources de moindre densité, est justifié par des critères d'utilisation (dispersion, localisation), de coût d'investissement et d'exploitation, et d'impact sur l'environnement.

Quels sont les critères purement physiques qui éclairent ces choix ? On exprime ci-dessous les processus de physique élémentaire mis en jeu qui sous-tendent les divers modes de production d'énergie et le niveau d'énergie libérée par chaque processus.

6.1 Choisir une unité d'énergie pour comparer les processus.

L'énergie utilisée sera l'électron volt (eV) qui correspond à l'énergie cinétique acquise par un électron soumis à une différence de potentiel de 1 volt (V), ($E_c = \frac{1}{2}mv^2 = eV$). Cette énergie est très faible. Pour donner une idée elle est égale à $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule (J). Il faut dépenser 1 J pour élever de 1 mètre (m) une masse de 100 grammes (g) ou pour élever de $0,25^\circ$ C une masse de 1g d'eau¹⁰.

6.2 A quoi correspondent des énergies inférieures ou égales à des fractions d'électron volt.

Au niveau de quelques dixièmes d'électron volt, on trouve les phénomènes liés à l'utilisation de l'énergie cinétique des molécules (chutes d'eau, marées, vents, ...), de la chaleur interne de notre globe (géothermie) ou des gradients thermiques dans les mers (i.e. le courant circulant entre une zone chaude et une zone froide). Ainsi à titre d'exemple :

- Une molécule d'eau ayant une vitesse de l'ordre de 40 m/s (soit une chute d'environ 100 m sous l'effet de son poids), a une énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2}mv^2 = 0,15$ eV.
- Une molécule d'oxygène dans un vent de 100 km/h (~ 30 m/s) a une énergie cinétique de 0,15 eV
- En géothermie l'énergie d'une molécule d'eau à 100° C est de $E_c = \frac{3}{2}kT = 0,04$ eV.

Dans ces trois exemples, les énergies sont faibles et il faut utiliser des quantités considérables de matière si on veut récupérer une énergie utilisable (grands débits sur des hauteurs importantes en hydroélectricité). Cet inconvénient est compensé par la relative facilité d'utilisation. C'est ce qui explique que les premiers moteurs à eau furent des moteurs hydrauliques développés en Chine et en Inde il y a plus de trois mille ans ; c'était de grandes roues à godets qui tournaient sous l'action du flux d'eau du fleuve et servaient à l'irrigation des cultures. Plus proche de nous c'est ce même principe qui a inspiré la construction de la machine de Marly. Dans les mêmes conditions le vent fut utilisé pour actionner les moulins.

On comprend ainsi qu'il a fallu à l'homme atteindre une certaine connaissance de la nature et maîtriser des techniques élaborées, fussent-elles aujourd'hui considérées comme rudimentaires, afin de disposer d'aide dans ses tâches quotidiennes.

Sinon la seule énergie disponible était celle de l'animal qu'il fallut domestiquer, ou de l'homme qui fut malheureusement victime de l'esclavage, capables de déplacer ou soulever aisément 100 g à 1 m en dépensant une énergie de 1 joule. Encore que cette énergie animale résulte d'un long processus conduisant de la récolte à l'alimentation, par la synthèse des aliments au travers du métabolisme pour produire l'énergie capable de nous faire soulever un poids.

¹⁰ NB : cela signifie que pour faire cuire un œuf à la coque c'est-à-dire pour porter à ébullition 1 litre d'eau à 20° , il faut de l'ordre de 40 000 Joules.

6.3 Accroître la densité d'énergie.

L'homme a cherché d'autres sources d'énergie dans lesquelles les processus élémentaires libéraient plus d'énergie. Dans l'ordre de quelques eV on trouve l'absorption de l'énergie solaire : l'énergie d'un photon du spectre visible (0,5 micron pour la couleur jaune) correspond à 2,5 eV. Dans cet ordre de grandeur de niveau énergétique on trouve aussi tous les combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole). L'électron volt, c'est l'ordre de grandeur de l'énergie de liaison des molécules (4 eV pour la liaison carbone, et, brûler du carbone équivaut à rompre les liaisons). On gagne ainsi en densité d'énergie un facteur de l'ordre de 10 à 100 par rapport aux énergies précitées. Mais on doit encore utiliser de grandes quantités de matière ou de grandes surfaces dans le cas du solaire. Et qui plus est dans le cas des énergies fossiles les notions d'épuisement se posent (même s'il reste de grandes incertitudes sur les réserves potentiellement disponibles). L'utilisation de ces énergies est relativement aisée car on manipule des quantités d'énergies encore faibles. La densité d'énergie est ici rapportée à l'énergie disponible dans 1 kg de matière ou 1 m² de surface. L'utilisation des énergies fossiles est connue depuis l'antiquité. Le premier four solaire date de 1767 (H. B. de Saussure).

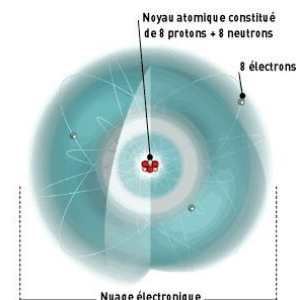
6.4 L'atome et la structure de la matière.

C'est à partir de la fin du 19^{ème} siècle, que l'homme s'est intéressé à la structure fine de la matière. On sait aujourd'hui que la matière peut être représentée suivant trois niveaux :

- Au niveau atomique, l'atome est formé d'un noyau (10⁻¹⁵mètre) chargé positivement autour duquel gravitent des électrons chargés négativement, assurant la neutralité électrique de l'ensemble. La dimension typique d'un atome est de 10⁻¹⁰ mètre et l'interaction qui entre en jeu entre les constituants est l'interaction électromagnétique. Les bases de l'électro magnétisme ont été jetées par Maxwell dans la seconde partie du 19^{ème} siècle. Le cadre théorique est celui de la mécanique quantique élaborée dans la première moitié du 20^{ème} siècle à partir des travaux de Planck, Dirac, Einstein, de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, ... Il repose sur deux notions :
 - La quantification (i.e. les échanges d'énergie au sein d'un atome sont proportionnelles à la fréquence du rayonnement émis selon la célèbre formule $E=h\nu$ (h constante de Planck, ν fréquence du rayonnement) ;
 - La dualité onde-corpuscule (i.e. les propriétés des particules peuvent tantôt se décrire comme des objets matériels animés tantôt comme des ondes).

Ainsi, les divers niveaux d'énergie possibles pour les électrons au sein de l'atome sont quantifiés et l'écart entre deux niveaux est de l'ordre de quelques eV (spectre visible) à quelques milliers d'eV (rayons X et Gamma). La transition d'un électron d'un niveau à l'autre se fait par absorption ou par émission d'un photon.

Au niveau atomique interviennent donc le noyau atomique considéré comme un tout, les électrons et les photons.

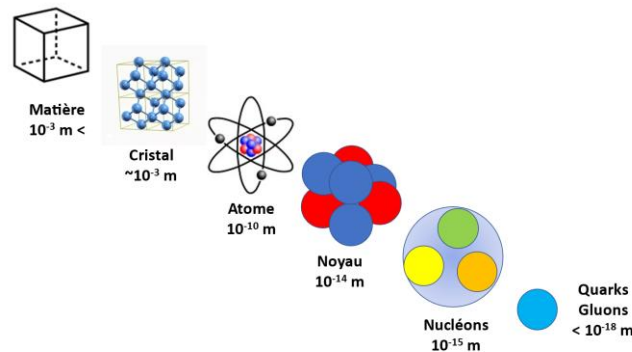


Représentation de l'atome d'oxygène, (échelle métrique non respectée).

- **Au niveau nucléaire** le noyau est constitué de nucléons (A) répartis en neutrons (N) et protons (Z) positivement chargés de manière à assurer la neutralité de l'atome (dans un atome, il y a autant de protons dans le noyau que d'électrons autour du noyau).

$$A \text{ (nucléons)} = Z \text{ (protons)} + N \text{ (neutrons)}$$

Le noyau peut être considéré comme un sac de billes de dimension de l'ordre de 10^{-15} m. Remarque : si la dimension de l'atome est de 10^{-10} m et celle du noyau de 10^{-14} à 10^{-15} m (100 000 fois plus petite), alors l'atome est essentiellement constitué de vide !!!



Le cadre théorique est toujours celui de la mécanique quantique, les états d'énergie possibles des nucléons sont quantifiés, l'énergie entre niveaux est de l'ordre de 10 keV à plusieurs MeV, et donc de mille (10^3) à un million (10^6) de fois plus élevé que pour les énergies fossiles par exemple).

Au sein du noyau les nucléons interagissent. Ces interactions sont décrites au travers de deux modèles :

- Les interactions fortes, qui assurent la cohésion du noyau. Les portées de ces interactions sont de l'ordre de grandeur de la dimension du noyau soit 10^{-15} m.
 - Les interactions faibles qui sont à l'origine des transmutations radioactives au sein du noyau par émission de positons (le positon est l'anti-électron, de même charge mais de signe opposé ; quand un électron rencontre un anti-électron, les deux particules s'annihilent et il en résulte l'émission d'un photon de forte énergie (rayonnement gamma)). La portée des interactions faibles est inférieure à 10^{-15} m.
- **Au niveau subnucléaire**, la connaissance de la nature des nucléons passe par celle de la nature des interactions fortes et faibles, autrement dit de la capacité d'investigation du noyau sur des longueurs très petites ($< 10^{-15}$ m), ce qui correspond à la capacité de produire de très grandes énergies. Les nucléons sont eux même formés de composants élémentaires dénommés quarks. Ceux-ci peuvent être de différents types se distinguant par leur charge, et différentes propriétés quantiques (étrangeté, charme, ...). L'énergie des transitions entre états des nucléons est quantifiée et de l'ordre de 300 MeV (300 millions d'électrons volts). Ces explorations sont à l'origine des accélérateurs de particules, comme celui du CERN par exemple destiné à accroître la connaissance de la physique interne des noyaux.

6.5 Les sources de fortes densités d'énergie.

La seconde moitié du 20^{ème} siècle a vu le remplacement des sources d'énergie faisant appel à l'énergie cinétique des molécules ou aux énergies de liaison de l'électron au sein de l'atome par le développement de sources d'énergie faisant appel aux énergies de liaisons des nucléons au sein du noyau.

Ceci représente un saut qualitatif sans précédent dans l'énergie récupérable au niveau des processus élémentaires puisqu'il atteint quelques millions d'électrons volt (MeV). Ainsi :

- La fission d'un atome d'Uranium (^{235}U) libère une énergie d'environ 200 MeV ;
- La fusion de deux atomes de deutérium (isotope de l'hydrogène) produit 4 MeV ;
- Celle d'un atome de tritium et d'un atome de deutérium 18 MeV.

Le gain par rapport à la combustion du carbone est de l'ordre du million. La quantité de matière utilisée pour produire une même énergie est plus faible, et la question des réserves moins préoccupantes en particulier avec les surgénérateurs nucléaires.

En revanche, ces densités d'énergie mises en jeu sont ici considérables ; elles réclament des solutions technologiques contrôlées et sécurisées.

Comparaison de quelques sources d'énergie.

Energie mise en jeu (eV)	Processus élémentaire	Energie pour 1 kg de matière	Quantité de matière par MW.h
0,15	Energie cinétique d'une molécule d'eau (40 m/s)	0,233 kWh	4291 kg
4	Combustion du charbon	9 kWh	110 kg
$200 \cdot 10^6$	Fission de ^{235}U	$23 \cdot 10^6$ kWh	43 μg
$18 \cdot 10^6$	Fusion deutérium tritium	$200 \cdot 10^6$ kWh	5 μg

9. LES UNITES

Dans le système universel d'unité, l'unité d'énergie est le joule. Suivant le domaine d'application on utilise des unités multiples (kilojoule, Mégajoule, ...) ou sous multiples ou des équivalences. Le tableau ci-dessous résume les principales unités utilisées.

Unités	J	kWh	Tep	Tec	eV	Ca	
Joule	J	1	$2,78 \cdot 10^{-07}$	$2,39 \cdot 10^{-11}$	$3,41 \cdot 10^{-11}$	$6,24 \cdot 10^{+18}$	0,239
Kilowattheure	kWh	3 600 000	1	$8,6 \cdot 10^{-05}$	$1,23 \cdot 10^{-04}$	$2,24 \cdot 10^{+25}$	$8,6 \cdot 10^{+05}$
Tonne équivalent Pétrole	Tep	$4,186 \cdot 10^{+10}$	$1,163 \cdot 10^{+04}$	1	1,43	$2,61 \cdot 10^{+29}$	$1,00 \cdot 10^{+10}$
Tonne équivalent Charbon	Tec	$2,93 \cdot 10^{+10}$	$8,138 \cdot 10^{+03}$	0,69	1	$1,828 \cdot 10^{+29}$	$7,00 \cdot 10^{+10}$
Electron volt	eV	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$4,45 \cdot 10^{-26}$	$3,83 \cdot 10^{-30}$	$5,47 \cdot 10^{-30}$	1	$3,82 \cdot 10^{-20}$
Calorie	Ca	4,184	$1,16 \cdot 10^{-06}$	$9,99 \cdot 10^{-11}$	$1,43 \cdot 10^{-10}$	$2,61 \cdot 10^{+19}$	1

Un joule* (J) est l'énergie pour nécessaire pour déplacer une force de 1 newton* sur 1 mètre de distance.

Un Wattheure (Wh) est une l'unité de mesure d'énergie qui correspond à la quantité produite en une heure par une machine d'un watt. **Le kilowattheure (kWh)**, qui vaut 1000 wattheure, sert à mesurer la consommation de chaque foyer

Une tonne d'équivalent pétrole (Tep) représente la quantité d'énergie contenue dans une tonne de pétrole brut, soit 41,868 gigajoules. Cette unité est utilisée pour exprimer dans une unité commune la valeur énergétique des diverses sources d'énergie.

Une tonne équivalent charbon (Tec) est une unité de mesure de l'énergie. 1 tec correspond au pouvoir calorifique inférieur d'une tonne de charbon, et dépendait initialement du charbon de référence. Aujourd'hui, un tec vaut conventionnellement 7 Gcal, soit 29,307 60 Gigajoule

Un électron volt (eV) est l'énergie cinétique acquise par un électron soumis à une différence de potentiel de 1 volt (V), ($E_c = \frac{1}{2}mv^2 = eV$). Cette énergie est très faible. Pour donner une idée elle est égale à $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule (J)

Une calorie (cal) représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 gramme d'eau sous une pression atmosphérique normale. L'unité de mesure officielle internationale de l'énergie est le joule, mais la calorie est très largement utilisée, en particulier en diététique. La kilocalorie est une unité de mesure de l'énergie, équivalant à mille calories. Le besoin énergétique journalier humain moyen se situe entre 2000 et 2700 cal, dépendant du sexe, de l'âge, de la taille et du poids.