

PROGRAMME DES COLLÈGES

THÈMES DE CONVERGENCE

THÈME 1 : ÉNERGIE

SOMMAIRE

Introduction	p. 2
Présentation générale	p. 4
Liens avec les programmes (tableau synoptique)	p. 6
Quelques pistes	p. 9
des exemples de problématiques et de sujets possibles	p. 9
des propositions d'activités	p. 10
<u>ANNEXES</u>	p. 16
1. L'énergie se conserve	p. 16
2. Harmonisation du vocabulaire. Les unités. Ordres de grandeur	p. 19
3. Illustrations graphiques en complément de la présentation générale	p. 29
4. De l'importance du développement durable	p. 35
5. Des cartes de ressources énergétiques renouvelables	p. 38
6. Stockage de l'énergie	p. 40
7. Quelques ressources bibliographiques et muséographiques	p. 46
éléments de bibliographie	p. 46
pistes et ressources des musées	p. 48

INTRODUCTION

Choix du thème :

L'énergie a été choisie compte tenu de son importance pour le développement des sociétés humaines et du fait de la croissance de la demande énergétique moyenne dans le monde, associé à une inégalité de la consommation et à l'accès aux sources d'énergie. C'est un thème riche en contenus et en représentations diverses. Il s'agit d'un concept physique fondamental, certes difficile à introduire avec rigueur, mais unificateur dans la description des phénomènes à toute échelle, aussi bien subatomique, terrestre, qu'astronomique. En particulier, l'énergie est indispensable à la vie et aux activités humaines. L'accès aux ressources énergétiques conditionne en grande partie l'évolution des sociétés. Aujourd'hui, la demande énergétique par l'humanité est si importante que tout choix concernant la distribution, la transformation et l'utilisation de l'énergie a des répercussions non seulement sur l'économie mondiale mais aussi sur l'équilibre écologique de toute la planète.

Objectifs :

Ce thème de convergence a pour objectif de rapprocher les points de vue et de permettre à l'élève de s'approprier, progressivement, par une réflexion pluridisciplinaire et à travers de nombreux exemples de la vie courante, ce concept qu'est l'énergie.

L'élève doit construire ce concept à partir de la définition purement phénoménologique de l'énergie à l'école primaire : « l'utilisation d'une source d'énergie est nécessaire pour chauffer, éclairer, mettre en mouvement... » Il existe différentes (res)sources d'énergie utilisables (le pétrole, le charbon, l'uranium, le Soleil, la biomasse, le vent...). À l'échelle d'une génération humaine, certaines (res)sources se renouvellent (énergie solaire, éolienne, hydroélectrique, marémotrice, issue de la biomasse), mais ce n'est pas le cas pour les autres (énergies fossiles, nucléaires...) qui constituent aujourd'hui la majeure partie de notre approvisionnement.

Une définition plus qualitative du concept d'énergie est possible au collège : l'énergie possédée par un système est une grandeur qui caractérise son aptitude à produire des actions ; la mesure ou la détermination de l'énergie nécessaire à une action est essentielle pour effectuer les bilans indispensables au choix de la source appropriée et à une gestion raisonnée de celle-ci.

Ce concept continuera à être enrichi dans la suite des études au lycée et au niveau supérieur.

Un autre objectif de ce thème est donc de conduire l'élève à une réflexion argumentée sur la gestion aujourd'hui des ressources énergétiques pour demain et de favoriser son implication citoyenne dans le développement durable. Dans une démarche d'éducation du consommateur et de l'utilisateur, ce thème conduit également à une sensibilisation aux problèmes environnementaux.

Mise en œuvre :

Chaque discipline traite ce sujet avec son vocabulaire spécifique et ses choix adaptés en respectant la cohérence d'ensemble.

Les problématiques choisies ne sont que des exemples, des pistes de travail détaillés dans la suite du document ou sur des sites académiques.

Plusieurs thèmes de convergence se recouvrent. En ce qui concerne celui sur l'énergie, des liens sont possibles avec les thèmes « environnement et développement durable », « météorologie et climatologie », « sécurité », « santé ».

Architecture du document d'accompagnement :

Ce document comporte :

1. **une présentation générale autour de questions concernant l'énergie;**
 2. **des liens avec les programmes** sous la forme d'un tableau synoptique ;
 3. **quelques pistes** avec des exemples de problématiques, des **sujets** possibles et des propositions d'activités - évaluations ;
 4. **des annexes constituées :**
- **de compléments théoriques** destinés aux professeurs afin :
 - de mieux appréhender, la notion **de conservation de l'énergie**, notion sous-jacente dans les programmes mais qui n'est pas explicitement au programme du collège. Les termes *production d'énergie, consommation d'énergie, pertes d'énergie* sont usuellement employés. En réalité, la propriété la plus remarquable que possède l'énergie, et qui justifie l'importance donnée à ce concept, est celle de sa conservation. Voir l'*ANNEXE 1 : L'ÉNERGIE SE CONSERVE*.
 - de mieux maîtriser
 - ◆ **le vocabulaire** : clarification et mise en cohérence du vocabulaire correspondant aux nombreux termes utilisés dans le langage courant et dans les différentes disciplines d'enseignement au collège, les professeurs devant s'efforcer d'être rigoureux et d'utiliser le terme propre afin de prévenir tout risque de confusion dans l'esprit des élèves.
 - ◆ **les unités** d'énergie et de puissance du système international, les correspondances avec des unités utilisées dans des domaines spécifiques étant données, les multiples et sous-multiples d'unités étant précisés sous forme de tableaux.
 - ◆ **les ordres de grandeurs** illustrant différents domaines relatifs aux programmes des disciplines et des champs correspondants à des ouvertures d'ordre culturel.
 - Voit l'*ANNEXE 2 : HARMONISATION DU VOCABULAIRE - LES UNITÉS - ORDRES DE GRANDEUR*.
 - **d'illustrations graphiques**, en complément de la présentation générale. Voir l'*ANNEXE 3 : ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES EN COMPLÉMENT DE LA PRÉSENTATION GÉNÉRALE*.
 - de références de **sites** consultables pour des **cartes des ressources énergétiques renouvelables**. Voir l'*ANNEXE 4 : CARTES DES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES RENOUVELABLES*.
 - d'un document permettant de mieux comprendre **l'importance du développement durable**. Voir l'*ANNEXE 5 : DE L'IMPORTANCE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE*.
 - d'un document concernant les problèmes posés par le **stockage de l'énergie** : (analyse des besoins, précisions sur les formes, les caractéristiques et les performances des stockages). Voir l'*ANNEXE 6 : STOCKAGE D'ÉNERGIE*.
 - de quelques **références bibliographiques et muséographiques**. Voir l'*ANNEXE 7 : RESSOURCES BIBLIOGRAPHIQUES*.

Le développement des activités humaines, la croissance de la population mondiale et l'augmentation du coût des matières premières énergétiques nécessitent une réflexion globale et citoyenne sur la place des énergies fossiles, nucléaires et renouvelables. La prise en compte du développement durable devient indispensable. Le transport et le stockage de l'énergie verront sans doute la mise en œuvre de nouvelles technologies.

Il semble important que l'élève, futur citoyen, prenne conscience :

1. de l'ampleur des activités humaines consommatrices d'énergie :

La population mondiale augmente fortement depuis l'an 1000 ; elle pourrait atteindre 10 milliards d'habitants vers 2050-2100. Voir le **document 1 de l'annexe 3**.

Les besoins énergétiques individuels fluctuent par personne et par jour : les besoins métaboliques sont en moyenne de 2,5 kWh mais les autres besoins varient fortement en fonction des habitudes et du niveau de développement industriel d'un pays. Par exemple, un français consomme en moyenne 120 kWh tandis qu'un américain consomme 250 kWh, un indien 30 kWh, un népalais 5kWh.

La puissance mondiale consommée depuis l'apparition de l'Homme est en conséquence fortement croissante depuis la révolution industrielle (seconde moitié du XIX^{ème} siècle). Elle atteignait environ 12 000 GW (soit 8 000 fois moins que la puissance moyenne rayonnée par le Soleil) en l'an 2000 et pourrait atteindre 100 000 GW en 2050-2100 si les 10 milliards d'êtres humains potentiels avaient le comportement énergétique d'un nord-américain actuel (ce qui ne se produira vraisemblablement pas pour des raisons à la fois économiques et environnementales). Voir le **document 2 de l'annexe 3**.

La consommation humaine mondiale d'énergie primaire est en forte croissance ces dernières décennies avec plusieurs scénarii possibles entre 2000 et 2020. Voir le **document 3 de l'annexe 3**.

Dans le même temps on observe que les fluctuations des cours des matières premières énergétiques affectent l'économie et la stabilité politique :

- L'évolution du coût du baril de pétrole entre 1965 et 2005 est révélatrice, avec une forte incidence des conflits internationaux. Voir le **document 4 de l'annexe 3**.
- Le cours de l'uranium est également instable. Voir le **document 5 de l'annexe 3**.

2. de l'impact de ces activités humaines sur l'environnement :

Les rejets de gaz à effet de serre sont dus notamment à la combustion des produits carbonés.

La production de 1 kWh électrique à partir de charbon entraîne le rejet de 1 kg de dioxyde de carbone CO₂ ; à partir de gaz en cycle combiné, le rejet est 0,38 kg.

Parcourir 10 km en voiture entraîne le rejet par le véhicule de 1 à 2 kg de dioxyde de carbone selon la consommation du véhicule et son carburant.

La combustion de 1 kg de carbone dégage 3,6 kg de dioxyde de carbone, l'un des principaux gaz à effets de serre.

Les courbes traduisant d'une part la consommation de carburants fossiles et, d'autre part, la teneur en dioxyde de carbone dans l'atmosphère, présentent des allures comparables. Voir les **documents 6 de l'annexe 3**.

Dans le passé la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a déjà varié. Mais aujourd'hui, la concentration en CO₂ dépasse l'amplitude des cycles des 400 000 dernières années...

Voir le **document 7 de l'annexe 3**.

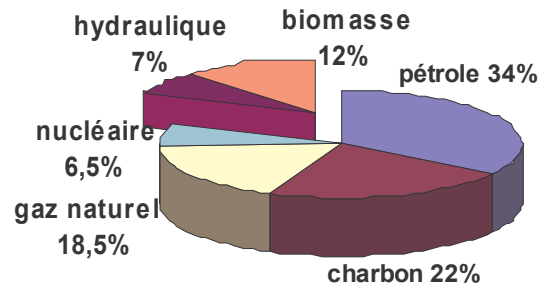
En à peine plus de 200 ans, nous aurons rejeté dans l'atmosphère, sous forme de dioxyde de carbone, l'élément carbone que la nature avait mis 600 millions d'années à piéger...

La nature pourra-t-elle réguler une aussi violente perturbation ?

3. du fait que les ressources sont épuisables :

Les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturels) ainsi que les matières fissiles (fission nucléaire) constituent les matières premières ou ressources primaires. Ils satisfont plus de 80 % des besoins actuels.

Les énergies renouvelables (hydraulique et biomasse) représentent moins de 20%, dont beaucoup de bois non renouvelé (ce cas est rencontré dans les pays très pauvres ; le bois n'est alors plus une énergie renouvelable et sa combustion contribue à la dégradation de l'environnement).



4. du fait que les vecteurs d'énergie pourraient être conduits à évoluer :

- ils sont actuellement produits essentiellement à partir des ressources primaires.

Le vecteur énergétique le plus courant pour le citoyen des pays riches est **l'électricité**. 82 % de l'électricité mondiale est d'origine NON renouvelable (nucléaire et fossile). Voir le **document 8 de l'annexe 3**.

L'électricité mondiale d'origine renouvelable est à 90 % hydraulique. Voir le **document 9 de l'annexe 3**.

- dans l'avenir le vecteur énergétique pourrait être le dihydrogène : il n'existe pas à l'état naturel sur la Terre ; il faut dépenser de l'énergie pour le produire (comme l'électricité), il peut être obtenu à partir de la dissociation de l'eau, d'hydrocarbures...L'une des étapes la plus difficile de son cycle est son stockage, en outre cette opération est coûteuse.

Voir l'**ANNEXE 5 : STOCKAGE D'ÉNERGIE**.

5. que le Soleil pourrait satisfaire les besoins énergétiques mais....

Certes, à lui seul le Soleil rayonne à la surface de la Terre l'équivalent d'environ 8 000 fois l'ensemble des activités énergétiques humaines actuelles, mais il faudrait savoir convertir cette énergie, ne serait-ce qu'une infime partie, ce qui permettrait alors de satisfaire l'ensemble des besoins de l'humanité...

Voir le **document 10 de l'annexe 3**.

LIENS AVEC LES PROGRAMMES

Pour chacune des disciplines concernées de façon privilégiée (mathématiques, sciences physiques et chimiques, sciences de la vie et de la Terre, éducation physique et sportive, histoire-géographie-éducation civique, technologie), les liens avec les programmes sont explicités dans le **tableau synoptique** ci-dessous qui précise dans chaque colonne les apports de chacun des niveaux (6^{ème}, 5^{ème}, 4^{ème} et 3^{ème}) ; en italique sont mentionnées les contributions des programmes non encore arrêtés ou des prolongements de programmes.

	6 ^e	5 ^e	4 ^e	3 ^e <i>(en attente des programmes définitifs)</i>
Mathématiques	<p>Ecriture et comparaison des nombres. Ordre de grandeur.</p> <p>Demi-droite graduée.</p> <p>Grandeurs proportionnelles</p> <p>Application d'un taux de pourcentage.</p> <p>Lecture de tableaux, de diagrammes et de graphiques.</p> <p>Unités d'aire et de volume (1L = 1dm³)</p>	<p>Proportionnalité (cadre numérique). Calculs de pourcentages. Utilisation des écritures fractionnaires, proportions.</p> <p>Décimaux relatifs. Repérage sur une droite, dans le plan.</p> <p>Lecture et construction de diagrammes et de tableaux.</p> <p>Calculs d'effectifs et de fréquences.</p> <p>Grandeurs et mesures : longueurs, masses, durées, angles.</p> <p>Utilisation d'un tableur-grapheur</p>	<p>Proportionnalité : caractérisation graphique, calcul d'une quatrième proportionnelle, opérations sur les pourcentages, notion d'indice.</p> <p>Utilisation des puissances de dix. Notation scientifique.</p> <p>Calculs de moyennes.</p> <p>Calculs d'aire et de volumes.</p> <p>Vitesse moyenne, unités de vitesse.</p>	<p>Fonction : image d'un nombre par une fonction (courbe, tableau, formule). Fonction linéaire, lien avec la notion de proportionnalité, fonction affine.</p> <p>Etendue d'une série statistique, médiane, notion de quartiles, approche de la dispersion.</p> <p>Grandeurs composées : grandeurs produits et grandeurs quotients (volumes, débits, vitesses, puissance...), unités (kWh, m³/s, euros/km...)</p> <p>changements d'unités.</p>
Sciences physiques et chimiques		<p>Dans le prolongement du programme :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'augmentation de la température de l'eau liquide nécessite un apport d'énergie - La vaporisation de l'eau nécessite un apport d'énergie - L'évaporation d'une eau salée ou sucrée nécessite un apport d'énergie - De l'énergie est consommée dans une pile qui alimente une lampe. - De l'énergie peut être transférée (sous forme de 	<p>Dans le prolongement du programme :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lors d'une combustion, l'énergie libérée est transférée sous forme de chaleur et sous forme de rayonnement au milieu extérieur. - Le générateur fournit de l'énergie au circuit (conducteur ohmique) qui s'échauffe et transfère à l'extérieur sous forme de chaleur (transfert thermique) ; lampe qui brille et transfère essentiellement à l'extérieur sous forme de chaleur 	<p>Combustions et transfert thermique (dégagement de chaleur).</p> <p>Consommation électrique et puissance. Unités (joule, watt, kWh).</p> <p>Transfert sous forme d'énergie électrique d'énergie mécanique ou d'énergie chimique ou nucléaire cédée par une source.</p> <p>Énergie cinétique et sécurité routière.</p>

		<p>rayonnement) d'une source de lumière vers un récepteur</p>	<p>(transfert thermique) et de rayonnement.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lumière reçue et lumière absorbée par un objet : couleur de l'objet et modification éventuelle de sa température. - Pour une lentille, concentration en un foyer (étymologie du mot) d'une partie de l'énergie transférée sous forme de rayonnement depuis une source. 	
<p>Sciences de la vie et de la Terre</p>	<p>Origine de la matière des êtres vivants.</p> <p>Les végétaux chlorophylliens n'ont besoin pour se nourrir que de matière minérale, à condition de recevoir de la lumière.</p>	<p>Respiration et occupation des milieux de vie</p> <ul style="list-style-type: none"> - à la lumière, les végétaux contribuent à oxygéner le milieu <p>Fonctionnement de l'organisme et besoin en énergie.</p> <ul style="list-style-type: none"> - activité musculaire et modifications (rythmes respiratoire et cardiaque, température corporelle) à l'échelle de l'organisme. - Augmentations de la consommation en nutriments et O₂ et du rejet en CO₂ des organes en fonction de leur activité accrue. - L'énergie libérée au cours de la réaction chimique entre des nutriments et du dioxygène est utilisée pour le fonctionnement des organes et est transférée en partie sous forme de chaleur. - Les nutriments proviennent de la digestion des aliments. 	<p>L'activité interne du Globe.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Des contraintes s'exerçant en permanence sur les roches conduisent à une accumulation d'énergie qui aboutit à leur rupture au niveau d'une faille qui engendre un séisme. - Le volcanisme se manifeste par deux types d'éruptions : coulées de lave et explosion. - Les plaques lithosphériques sont animées de mouvements qui engendrent des déformations des roches. <p>La transmission de la vie chez l'Homme.</p> <ul style="list-style-type: none"> - déplacement des spermatozoïdes. - mouvements des cils vibratiles de la frange des trompes utérines. 	<p>Diversité et unité des êtres vivants.</p> <ul style="list-style-type: none"> - mouvements des chromosomes lors de la division cellulaire. <p>Risques infectieux et protection de l'organisme.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Déplacements amiboïdes des phagocytes. <p>Responsabilité individuelle en matière de santé</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'obésité. <p>Responsabilité collective en matière d'environnement.</p> <ul style="list-style-type: none"> - les énergies renouvelables.

		<ul style="list-style-type: none"> - Les aliments sont source d'énergie. - Les besoins énergétiques de l'organisme. <p>L'homme prélève dans son environnement géologique les matériaux qui lui sont nécessaires.</p>		
<h2>Éducation physique et sportive</h2>	<p><i>Compétence traversant tout le collège : identifier et apprécier les conditions et les déterminants de l'action</i> <i>Le concept d'énergie est présent dans toutes les activités physiques de l'élève, quelle que soit la discipline sportive abordée. Ne sont proposées ici que les compétences générales du programme et quelques connaissances ou notions qui s'y rapportent.</i></p> <p>Compétences générales en classe de 6^{ème} ou au niveau 1 : Les caractéristiques et les contraintes de l'environnement : conséquences sur la production d'énergie pour agir dans les différentes activités. Les effets de la motricité et de l'effort physique sur le corps : réchauffement corporel ; quantité d'énergie maximale disponible (tests valeur physique de « terrain ») ; réactions corporelles perceptibles aux différentes intensités (aisance ; essoufflement ; douleurs musculaires ; arrêt de l'activité). La maîtrise de ses émotions dans le respect des règles et de l'adversaire : concentration, attention et dosage de l'engagement.</p> <p>Compétences générales à partir du cycle central ou au niveau 2 : <i>L'appréciation et la régulation de ses possibilités et ses ressources, au regard des actions à entreprendre : travailler à des intensités imposées et variées (faible ; moyenne ; élevée) ; importances des ressources énergétiques (endurance, vitesse, force, souplesse) selon les APSA ; l'alimentation et l'hydratation nécessaires pour supporter l'effort intense : glucides et activité physique ; importance des protéines pour réparer les blessures ; quantité et fréquence de l'hydratation.</i> <i>La mise en relation des exercices réalisés avec les effets qu'ils produisent sur le développement corporel.</i> <i>Exercices types pour entretenir les qualités physiques (fréquence des répétitions et intensité de l'exercice)</i> <i>Travailler à la limite de ses possibilités pour développer ses ressources.</i> <i>Produire à nouveau de l'énergie pour favoriser la récupération (footing dit de « décrassage »).</i></p>			

<h2>Histoire-Géographie</h2> <h3>Éducation civique</h3>	<p>En géographie, localisation des principales richesses énergétiques aujourd'hui.</p> <p>Rôle de ces ressources dans la richesse comparative de quelques Etats (qui produit ? qui consomme ?) et impact sur l'aménagement du territoire (ex : le pétrole dans le Sahara algérien).</p> <p>Conséquences du manque de source d'énergie et quelles remédiations possibles (ex : l'électricité dans les métropoles des pays pauvres).</p> <p>En EC, on peut aborder le thème du gaspillage énergétique lors des leçons sur la responsabilité vis-à-vis du cadre de vie et de l'environnement (notion d'éco-citoyenneté).</p>	<p>En géographie, les ressources énergétiques dans le développement des pays proposés. Conditions d'exploitation et de transformation. Impact sur les Hommes et sur l'environnement et l'aménagement du territoire (ex : l'hydroélectricité en Chine).</p> <p>Extraction, transport, raffinage et utilisation de la richesse énergétique dans les pays du sud et dans un pays post industriel.</p> <p>Identification et localisation de quelques ressources énergétiques significatives, selon le continent ou l'Etat étudié. Leur rôle sur l'organisation de l'espace et le niveau de développement du territoire concerné.</p> <p>En histoire, l'étude du renouveau des campagnes peut être vue sous l'angle particulier de la maîtrise du moulin à eau et à vent et des conséquences démographiques.</p>	<p>En géographie, identification et localisation de quelques ressources ou aménagements énergétiques significatifs, en Europe ou dans certains Etats européens. Impact sur l'aménagement du territoire (ex : la Russie).</p> <p>L'Europe sous dépendance énergétique ? Quelles sont les réponses à la volonté de diversification et d'autonomie ?</p> <p>En histoire, l'Encyclopédie et l'étude de l'âge industriel peuvent servir de base à la réflexion sur les progrès liés à la découverte et à la maîtrise des sources énergétiques nouvelles : (machine à vapeur ; moteur à explosion ; révolution des transports), aux conséquences géographiques et politiques des localisations de ces sources énergétiques et aux transformations sociales que l'utilisation de ces énergies ont engendrées.</p>	<p>En géographie, ressources énergétiques dans les puissances économiques majeures : quels enjeux géopolitiques dans le monde actuel ?</p> <p>Importance et répartition de quelques grandes ressources énergétiques confrontées à leur consommation à l'échelle de la planète ou des Etats-Unis, du Japon et de l'Union européenne. Pour la France, l'énergie et le développement industriel.</p> <p>En histoire, on peut aborder cette question lors de l'étude de la croissance et ses conséquences, à propos des chocs pétroliers et de la nécessité de diversifier les sources d'approvisionnement énergétiques. Thème de l'indépendance énergétique.</p> <p>En EC, les questions relatives à l'énergie peuvent être abordées lors des débats sur l'expertise scientifique et technique dans la démocratie : prise de conscience des responsabilités.</p>
<h2>Technologie</h2>	<p>(thème des transports)</p> <p>Identification et comparaison de l'énergie de fonctionnement des différents objets techniques ou produits étudiés en classe.</p> <p>Identification des éléments de stockage, distribution et transformation de l'énergie.</p> <p>Identification du caractère plus ou moins polluant d'une énergie : lien avec EDD.</p>	<p><i>Construction et aménagement de son cadre de vie- énumérer les différentes sources d'énergie.</i></p> <p><i>Comment obtenir un meilleur confort en réalisant des économies d'énergie.</i></p> <p><i>Choix des systèmes de production de « chaleur » et de « froid » économiques.</i></p>	<p><i>Utilisation et maîtrise de l'énergie.</i></p> <p>La maîtrise de la consommation d'énergie : lien vers le développement durable.</p> <p><i>Les différentes formes d'énergie, leur production et leur utilisation.</i></p> <p><i>Localisation de la source d'énergie et son implantation dans le produit technique.</i></p>	<p><i>Histoire des solutions à un problème technique : choix d'une énergie</i></p> <p><i>Réalisation d'un projet en tenant compte des enjeux énergétiques.</i></p>

QUELQUES PISTES (problématiques ; activités)

1. Une **trame notionnelle** est présentée sur les sites disciplinaires des académies de Paris et d'Aix-Marseille.

La trame précise les composantes notionnelles élémentaires (mots clés ou courts énoncés explicatifs) et les liens logiques qui les relient dans la perspective de construire un premier niveau d'approche du concept d'énergie en fin de collège.

Les cadres rectangulaires correspondant à chaque discipline sont de couleurs différentes.

Les ovales rouges correspondent aux autres thèmes de convergence.

2. **Des exemples de problématiques**, articulées sur des liens avec les programmes, sont proposées sur des grands thèmes, déclinés en **sujets possibles** à traiter avec les élèves de façon pluridisciplinaire :

- l'Homme et les énergies (production et transfert) :
 - quelles sont les ressources utilisables aujourd'hui ?
 - quelles sont les formes d'énergie utilisées par l'homme ?
 - comparaison des réserves et de la consommation : un premier bilan énergétique
- l'énergie solaire (la capter, l'utiliser ou la transformer) :
 - peut-elle couvrir les besoins énergétiques quotidiens ?
 - quels en sont les coûts ?
- gestion des ressources énergétiques (aujourd'hui pour demain) :
 - présentation des énergies renouvelables et non renouvelables
 - des alternatives aux énergies fossiles ?
- de l'énergie : pour quoi faire ? Et en particulier pour le mouvement :
 - quels sont nos besoins légitimes/rationnels ?
 - quelles technologies à mettre en œuvre ?

Pour chaque tableau, la contribution de chaque discipline se trouve dans un cadre de couleur propre à chacune d'elle. Dans chacun de ces cadres, les apports de chaque niveau (6^{ème}, 5^{ème}, 4^{ème} et 3^{ème}) sont précisés ; en italique sont mentionnées les contributions des programmes non encore arrêtés de 3^{ème} ; en rouge, celles de programmes en cours de réécriture.

sciences de la vie et de la Terre

6^{ème} : les végétaux chlorophylliens n'ont besoin pour se nourrir que de matière minérale, à condition de recevoir de la lumière.

5^{ème} : nutriments et dioxygène libèrent de l'énergie utilisable pour le fonctionnement de l'organisme humain. Cette énergie est transférée en partie sous forme de chaleur. Les aliments sont « source d'énergie ». Mais ils peuvent s'accumuler d'où les problèmes d'obésité et de malnutrition.

4^{ème} : les séismes et le volcanisme sont mis en relation avec une libération d'énergie liée à l'activité interne de la terre. L'éducation aux risques doit permettre de débattre sur les dangers.

technologie

6^{ème} (thème des transports) : identifier et comparer l'énergie de fonctionnement des différents objets techniques ou produits étudiés.

5^{ème} : *construire et aménager son cadre de vie – Choix des systèmes de production de « chaleur et de froid » économiques.*

4^{ème} : *utiliser et maîtriser l'énergie – Localiser la source d'énergie et son implantation dans le produit technique - Énumérer les paramètres associés à l'alimentation, la transformation, le transport, le stockage et la nature de l'énergie.*

Utilisation des TIC :

exploitation d'images de représentation 3D d'objets techniques qui utilisent différentes formes d'énergie.

histoire géographie éducation civique

6^{ème} : les grands types de paysage : l'électricité dans les métropoles des pays pauvres ; le pétrole dans le Sahara algérien.

5^{ème} : les ressources énergétiques du **Maghreb**, les ressources pétrolières du **Moyen-Orient**, le pétrole de l'**Alaska** : conditions d'exploitation et de transformation ; impact sur les Hommes et sur l'environnement.

4^{ème} : l'âge industriel : les nouvelles énergies et leurs conséquences géographiques et sociales / **La Russie** : ressources énergétiques et contraintes dans l'aménagement du territoire.

3^{ème} : les puissances économiques majeures : ressources, dépendance et enjeux énergétiques ; **élaboration et organisation du monde actuel** : géopolitique du pétrole et relations internationales.

L'Homme et les énergies

(production et transfert) :

- ressources utilisables aujourd'hui
- formes d'énergie utilisées par l'homme
- les réserves, la consommation : un bilan énergétique

mathématiques

6^{ème}, 5^{ème} : représentation et gestion de données. Proportionnalité.

4^{ème}, 3^{ème} : comparaison d'ordres de grandeur, puissances de 10, notation scientifique. Changement d'unités, grandeur produit. Traitement de données.

physique-chimie

3^{ème} : citer les différentes sources d'énergie qui interviennent dans la production d'énergie électrique.

éducation physique et sportive

6^{ème} : *CG le dosage de l'effort, effets de l'effort physique (avec SVT ...).*

CP : course de durée : réguler son allure.

Contenus : allure de course correspondant à sa VMA. (Vitesse Maximale Aérobie / allures de course sur- et sous-maximales). Combiner différentes vitesses durant une course continue.

5^{ème}/4^{ème} : *CG : règles d'hygiène de vie, effets de l'entraînement sur le développement corporel.*

CP : course de durée : respecter un tableau de marche / estimer et expérimenter la VMA à partir de tests de terrain.

3^{ème} : *CG concrétiser des connaissances mobilisées dans d'autres disciplines (notre fonctionnement dans l'effort).*

CP athlétisme : mettre en rapport les actions athlétiques avec les processus énergétiques (éducation à la santé) / Conditions d'efficacité et ressources (énergétiques ...) / Dosages des efforts consentis pour une efficacité maximale.

Vers un entraînement autonome (éducation à la santé).

sciences de la vie et de la Terre

6^{ème} : seuls les végétaux chlorophylliens sont capables de capter la lumière pour transformer la matière minérale en matière organique : ce sont des producteurs primaires.

5^{ème} : à la lumière, les végétaux chlorophylliens contribuent à oxygéner le milieu.

3^{ème} : *responsabilité collective en matière d'environnement : les énergies renouvelables.*

technologie

6^{ème} : les transports, nature de l'énergie de fonctionnement. Chaîne de transformation de l'énergie.

5^{ème} : *architecture et cadre de vie - comment obtenir un meilleur confort en réalisant des économies sur la facture d'énergie ?*

4^{ème} : *utiliser et maîtriser l'énergie – La maîtrise de la consommation d'énergie : approche du développement durable.*

histoire géographie

5^{ème} : l'Afrique : le rôle de l'architecture de la ville du Maghreb dans l'utilisation de l'énergie solaire.

éducation physique et sportive

L'énergie solaire

(la capter, l'utiliser ou la transformer)

- Peut-elle couvrir les besoins énergétiques quotidiens ?
- Quels en sont les coûts ?

physique-chimie

5^{ème} : condition nécessaire pour la vision : l'entrée de la lumière dans l'œil (approche d'une forme d'énergie : lumière nécessaire à la vision).

4^{ème} : concentration de l'énergie avec la lentille mince convergente.

3^{ème} : *énergie transférée par le rayonnement solaire (photopile).*

mathématiques

6^{ème}, 5^{ème} : représentation et gestion de données. Proportionnalité.

4^{ème}, 3^{ème} : comparaison d'ordres de grandeur, puissances de 10, notation scientifique. Changement d'unités, grandeur produit. Traitement de données.

sciences de la vie et de la Terre

5^{ème} : l'action de l'Homme, dans son environnement géologique, influe sur l'évolution des paysages (discuter d'un exemple local de la responsabilité de l'Homme dans la gestion de son environnement géologique).

3^{ème} : *responsabilité collective en matière d'environnement (énergies renouvelables).*

technologie

6^{ème} (thème des transports) : à partir de l'objet technique étudié, identifier les éléments de transformation de l'énergie.

5^{ème} : *construire et aménager son cadre de vie – L'énergie. Enumérer les différentes sources d'énergie.*

4^{ème} : *utiliser et maîtriser l'énergie – Les différentes formes d'énergie, leur production, leur utilisation.*

histoire géographie éducation civique

Quelles sont les réponses à la volonté de diversification et d'autonomie ?

6^{ème} : **les grands repères géographiques** : localisation des principales richesses énergétiques aujourd'hui. Qui produit, qui consomme ?

4^{ème} : **l'Europe** sous dépendance énergétique ?

3^{ème} : **la France** : la dépendance énergétique, les nouvelles sources d'énergie (éoliennes, biocarburants...) et leur impact sur l'aménagement du territoire.

Gestion des ressources énergétiques

(aujourd'hui pour demain)

- Énergies renouvelables et non renouvelables
- Des alternatives ?

éducation physique et sportive

physique-chimie

3^{ème} : *les espèces chimiques présentes dans la pile contiennent de l'énergie chimique qui est en partie transférée sous d'autres formes d'énergie.*

Expliquer la production d'énergie électrique dans une centrale hydraulique ou éolienne et par rayonnement solaire.

Comment est obtenue l'énergie électrique ?

mathématiques

6^{ème}, 5^{ème} : représentation et gestion de données. Proportionnalité.

4^{ème}, 3^{ème} : comparaison d'ordres de grandeur, puissances de 10, notation scientifique. Changement d'unités, grandeur produit. Traitement de données.

sciences de la vie et de Terre

6^{ème} : pour les végétaux la quantité d'énergie lumineuse conditionne la répartition dans le milieu.

5^{ème} : le fonctionnement de l'organisme nécessite l'énergie des nutriments et du dioxygène ; les aliments sont « source d'énergie » qu'il faut gérer (apports énergétique des aliments, besoins énergétiques de l'organisme).

3^{ème} : l'énergie est un facteur déterminant de la motricité (EPS).

technologie

6^{ème} : thème les transports, identifier les éléments de stockage, distribution et de transformation de l'énergie.

5^{ème} : *architecture et cadre de vie (domotique) construire et aménager son cadre de vie ?*

4^{ème} : *énergie et environnement [secteur thermique résidentiel, secteur des déplacements, secteur des appareils électroménagers équipant les logements, secteur des consommations indirectes (industrie alimentaire, industrie lourde, consommations publiques....)]. Utiliser et maîtriser l'énergie ?*

histoire géographie éducation civique

Quelles sont les techniques pouvant remédier au manque de source d'énergie ?

5^{ème} : **l'Afrique**: le problème de l'extraction, du transport, du raffinage et de l'utilisation de la richesse énergétique au Maghreb ; **la diversité de l'Asie** : l'hydro-électricité en Chine ; **les deux Amériques** : l'hydro-électricité au Brésil et dans le Colorado.

éducation physique et sportive

6^{ème} : *CG le dosage de l'effort, effets de l'effort physique (avec SVT ...).*

CP : course de durée : réguler son allure.

Contenus : allure de course correspondant à sa VMA (Vitesse Maximale Aérobie) / allures de course sur- et sous-maximales. Combiner différentes vitesses durant une course continue.

5^{ème} / 4^{ème} : **CG** : règles d'hygiène de vie, effets de l'entraînement sur le développement corporel.

CP : course de durée : respecter un tableau de marche / estimer et expérimenter la V.M.A. à partir de tests de terrain.

3^{ème} : **CG** concrétiser des connaissances mobilisées dans d'autres disciplines (notre fonctionnement dans l'effort).

CP athlétisme : mettre en rapport les actions athlétiques avec les processus énergétiques (éducation à la santé) / Conditions d'efficacité et ressources (énergétiques...) / Dosages des efforts consentis pour une efficacité maximale. Vers un entraînement autonome (éducation à la santé).

De l'énergie: pour quoi faire?

Et en particulier pour le mouvement

- **Quels sont nos besoins légitimes/rationnels ?**
- **Quelles technologies à mettre en œuvre ?**

physique-chimie

3^{ème} : traduire les transformations énergétiques dans un diagramme incluant les énergies « perdues ».

Calculer l'énergie électrique transférée à un appareil pendant une durée donnée.

Comparaison des ordres de grandeurs de puissance électrique.

mathématiques

6^{ème}, 5^{ème} : représentation et gestion de données. Proportionnalité.

4^{ème}, 3^{ème} : comparaison d'ordres de grandeur, puissances de 10, notation scientifique. Changement d'unités, grandeur produit. Traitement de données.

2. **Quelques activités** sont proposées avec des entrées pluridisciplinaires.

- Des **exemples explicites d'activités** à conduire avec les élèves sont proposés sur **le site de l'académie de Paris, d'Aix-Marseille, de Nantes, d'Orléans-Tours** :
 - activités associant géographie et mathématiques :
 - ◆ « la production de pétrole dans le monde » en classe de 6^{ème} : production mondiale, exemple d'une région productrice (Moyen-Orient), les importations de pétrole. Les données sont exploitées de façon intégrée dans les deux disciplines.
 - ◆ « le charbon en Asie » en classe de 5^{ème} : les réserves mondiales, la production de charbon en Asie, la consommation de charbon en Asie, le charbon cadeau empoisonnée pour la Chine. Les données sont exploitées de façon intégrée dans les deux disciplines.
 - activités associant les SVT et les mathématiques :
 - ◆ énergie et cerveau : on raisonne en exploitant quelques données relatives au fonctionnement du cerveau humain (consommation moyenne de dioxygène, images traduisant la consommation de sucre par le cerveau).
 - ◆ support géologique : Les séismes résultent d'une rupture brutale des roches en profondeur et se manifestent par des déformations en surface de la Terre. On s'intéresse au lien existant entre séisme et déformations. On exploite une photographie et une image satellitale du séisme de El-Asnam en Algérie. On calcule la magnitude d'un séisme sur l'échelle de Richter.
 - activités associant les mathématiques, les SVT, la physique-chimie ou l'histoire-géographie autour de la proportionnalité : l'exemple de la proportionnalité est présenté avec le volume de carburant en relation avec son prix en euros ; différentes façons de procéder en classe de sixième, cinquième et quatrième sont proposées. Des cas de non proportionnalité sont donnés (apports énergétiques conseillés en fonction de l'âge et du sexe ; consommation d'un véhicule en fonction de la vitesse). La proportionnalité est utilisable aussi dans les changements d'unité et dans les pourcentages.
 - un exemple intégré aux objectifs d'apprentissages des SVT, de la physique-chimie et de l'EPS. Le sujet concerne la relation entre la production de mouvement par le muscle et l'utilisation d'énergie : approche de l'énergie par la notion de travail mécanique et de transfert thermique. La présentation est déclinée en terme de démarche, de disciplines concernées, d'objectifs disciplinaires et transversaux, de planification, de traces écrites et d'évaluation.
- Certaines activités peuvent être réalisées sous forme d'**évaluations**. Ces évaluations peuvent être de nature disciplinaire, notamment quand l'activité correspond à une entrée privilégiée d'un programme d'une discipline. Elles peuvent aussi conjuguer plusieurs disciplines quand elles répondent à une problématique plus large et gagnent alors à être conçues en intégrant réellement plusieurs disciplines, par exemple les activités associant l'EPS, les mathématiques, les SVT et la physique-chimie sous forme d'évaluations : *comment fournir une énergie adaptée aux besoins quotidiens de nos organes ?*
Les évaluations ne se traduisent pas nécessairement par une note chiffrée mais peuvent traduire un niveau de compétence atteint, en lien avec le socle commun de connaissances et de compétences.

ANNEXES

ANNEXE 1 : L'ÉNERGIE SE CONSERVE

Les termes *production d'énergie*, *consommation d'énergie*, *pertes d'énergie* sont usuellement employés. En réalité, la propriété la plus remarquable que possède l'énergie, et qui justifie l'importance donnée à ce concept, est celle de sa **conservation**.

En 1850 est énoncé le principe de conservation de l'énergie : **l'énergie d'un système isolé reste constante au cours du temps**. Un énoncé équivalent est : si un système non isolé reçoit ou perd de l'énergie, un autre système en fournit ou en reçoit : ce qui est « perdu » par l'un, est « gagné » par l'autre. La création spontanée d'énergie n'existe pas.

Ce que nous appelons production ou consommation d'énergie correspond en fait à un transfert d'énergie, le transfert considéré comme « utile », d'un système vers un autre (une réelle difficulté reste la définition du (des) système(s) impliqués).

La vie courante nous en fournit de nombreux exemples :

- Le Soleil provoque l'évaporation de l'eau des océans :
le Soleil perd de l'énergie interne ou énergie nucléaire. De l'énergie est transférée sous forme de (ou « par ») rayonnement du Soleil à l'eau. L'eau voit son énergie interne augmenter, ce qui se traduit par une augmentation de sa température de surface et une évaporation de l'eau.
- Pour se déplacer, travailler, faire du sport, l'être humain utilise ses muscles, sources du mouvement et de son autonomie :
*les muscles sont le siège de transformations chimiques entre nutriments et dioxygène apportés par le sang. Les produits de ces transformations sont renvoyés dans la circulation sanguine.
L'énergie chimique libérée au cours de ces transformations est convertie d'une part en énergie mécanique des muscles (déformation) transférée aux os et en énergie interne (échauffement des muscles) transférée à tout le corps.*
- De l'eau est stockée dans un barrage ; l'eau retenue, après l'ouverture des vannes, actionnera des turbines et les rotors des alternateurs de la centrale hydroélectrique :
*pour les turbines Pelton, l'eau perd de l'énergie potentielle de pesanteur et acquiert de l'énergie cinétique lors de la chute : dans cette étape, l'eau, en première approximation, n'a pas perdu d'énergie.
De l'énergie est ensuite transférée sous forme de (ou « par ») travail de l'eau (qui perd alors de l'énergie cinétique) à la turbine et au rotor de l'alternateur (qui acquièrent de l'énergie cinétique).*
- Sous l'action du rayonnement solaire, les plantes vertes, grâce à leur pigment chlorophyllien, convertissent le dioxyde de carbone (de l'air ou dissous dans l'eau) et

l'eau en composés organiques nutritifs (essentiellement sous forme de glucides), c'est la photosynthèse :

le Soleil perd de l'énergie interne ou énergie nucléaire. De l'énergie est transférée sous forme de (ou « par ») rayonnement du Soleil à la plante. Cette dernière voit son énergie interne (énergie chimique) augmenter.

- Pour faire avancer une automobile, le carburant subit une combustion avec le dioxygène de l'air. Les gaz formés actionnent un piston (qui lui-même entraîne l'arbre des roues) :

lors de la combustion, le système gaz-carburant voit son énergie interne (énergie chimique) diminuer au profit du système gaz formés. Ce dernier perd une partie de son énergie interne en la transférant sous forme de (ou « par ») travail au piston qui acquiert de l'énergie cinétique et sous forme de (ou « par ») chaleur à l'air ambiant.

- La batterie d'une automobile permet le fonctionnement des phares même à l'arrêt du véhicule :

*à l'arrêt du véhicule, la batterie voit son énergie interne (énergie chimique) diminuer. De l'énergie est transférée aux phares sous forme de (ou « par ») travail électrique (ou énergie électrique).
Remarque : l'énergie reçue par les phares est transférée immédiatement par rayonnement et par chaleur à l'air ambiant.*

En résumé de l'énergie peut être transférée d'un système à un (d') autre(s) par différents modes : travail, chaleur (transfert thermique), rayonnement.

Toute l'énergie transférée à un système n'est pas de fait utilisable. Le **rendement** peut être défini comme le rapport de l'énergie « utilisable » à l'énergie reçue par le système.

Dire que le rendement d'une centrale nucléaire est de l'ordre de 33 % correspond au fait que, sur 100 unités d'énergie apportées par réaction nucléaire, 33 unités sont transférées sous forme de (ou « par ») énergie électrique. Le reste est transféré sous forme de (ou « par ») chaleur à l'environnement, parfois réutilisé, pour un chauffage urbain par exemple.

Les premières machines à vapeur fonctionnant au charbon avaient une efficacité faible (de l'ordre de 7%) ; les moteurs à essence ont un rendement d'environ 25% ; les turbines à vapeur moderne fonctionnant au charbon ont des rendements de l'ordre de 30 à 40%.

Les questions de stockage et de transport d'énergie sont directement liées au problème de la transformation de l'énergie.

Comme on l'a déjà vu, le Soleil, les aliments, les piles, l'eau d'un barrage.... sont des **réservoirs** d'énergie : ils peuvent transférer une partie de leur énergie à un autre système. Une lampe, une turbine, un alternateur, un moteur... ne peuvent que **convertir** l'énergie qu'ils reçoivent, ils n'en stockent pas dans leur usage « normal ».

Avant la révolution industrielle, les seuls moyens d'amener de l'énergie sur un lieu donné étaient d'y transporter les matériaux de chauffage (bois) ou les aliments servant à nourrir les Hommes ou le bétail. Aujourd'hui, comme nous l'avons vu précédemment, nous disposons d'un nombre important de moyens de stocker et de transporter l'énergie.

Cependant, in fine, après différents transferts et conversions, presque toute l'énergie prise à une source se retrouve dans l'environnement, ce qui contribue à son échauffement. Il faut

souligner que toutes les formes d'énergie ne sont pas équivalentes : la "chaleur" correspond à une dégradation de l'énergie (transfert désordonné de l'énergie, problème de rendement, irréversibilité de cette évolution énergétique).

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le concept d'énergie et le principe de sa conservation sont des concepts scientifiques relativement récents.

Au milieu du 19^e siècle, les relations entre des phénomènes mécaniques, magnétiques, chimiques, lumineux... commencent à être perçues comme des transformations. On sent confusément que "quelque chose" se conserve quantitativement tout en changeant qualitativement.

Des scientifiques, en particulier Carnot [(1796-1832) : "réflexions sur la puissance motrice du feu" (1824)], Joule [(1818-1889) : loi de "l'effet Joule" (1841), détermination de l'équivalent mécanique de la calorie (1840-1843)], Mayer [(1814-1878) : détermination de l'équivalent de la calorie (1845)] et Helmholtz [(1821-1894) : définition de l'énergie électrostatique (1847)], mais aussi Watt (1736-1819), W. Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907), Clausius (1822-1888) et Boltzmann (1844-1906) apportèrent une contribution majeure à la mise au point de ce concept.

Une révolution en 1905 : Einstein, pour rendre cohérente la théorie de l'espace et du temps qu'il vient de fonder, formule l'équivalence entre masse et énergie. À chaque particule de masse m est associée une énergie E donnée par la célèbre relation $E = m \cdot c^2$, c étant la célérité de la lumière dans le vide. Ceci implique que de l'énergie peut être obtenue à partir de la masse comme dans les centrales nucléaires. Si un système au repos de masse M a son énergie modifiée de ΔE , sa masse l'est aussi de ΔM avec $\Delta E = \Delta M \cdot c^2$; inobservable pour les réactions chimiques, ce phénomène est fondamental pour les réactions nucléaires (dans une centrale nucléaire, la transformation de 1 kg d'uranium naturel correspond à 100 000 kWh et à une diminution de masse de 4 mg).

ANNEXE 2 : HARMONISATION DU VOCABULAIRE, LES UNITÉS, ORDRES DE GRANDEUR

HARMONISATION DU VOCABULAIRE

Différentes (res)sources et différentes formes d'énergie peuvent être définies :

<i>(Res)sources d'énergie</i>	<i>Formes d'énergie de la (res) source subissant une variation et s'accompagnant d'un transfert</i>	<i>Exemples d'utilisation de cette énergie libérée par la (res)source et transférée</i>
combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz) et dioxygène de l'air	énergie chimique (contribution à l'énergie interne) <i>parfois appelée énergie « fossile »</i>	- transport : avions, automobiles, moto, gros navires - centrales thermiques « classiques » de production d'électricité - chauffage domestique
aliments et dioxygène	énergie chimique (contribution à l'énergie interne)	- effort musculaire - transport et sport : marche, vélo, skate, patinette
vent	énergie mécanique (énergie cinétique) <i>parfois appelée dans ce cas énergie « éolienne » le vent est en fait d'origine énergétique solaire</i>	- éoliennes : la rotation de la turbine de l'éolienne entraîne une génératrice électrique - éoliennes de pompage - bateau à voile, moulin à vent, char à voile
vagues, houles (ondulation de la surface des eaux sous l'action du vent)	énergie mécanique (cinétique, potentielle)	- houlo-générateurs électriques (technologies en pleine évolution, des produits commerciaux commencent à être mis en service)
Soleil	énergie de la photosphère (ayant pour origine l'énergie libérée par les réactions nucléaires au cœur de l'étoile) <i>parfois appelée énergie « solaire » voire « énergie lumineuse »</i>	- générateurs électriques photovoltaïques (photopiles, cellules photovoltaïques) - chaudière solaire (capteurs thermiques pour chauffer de l'eau) - centrales solaires thermodynamiques (le soleil chauffe à haute température de l'eau qui se transforme en vapeur et entraîne une turbine associée à une génératrice électrique) : existe déjà et en plein développement.
marée	énergie mécanique (cinétique, potentielle) due à l'action gravitationnelle de la Lune et du	- usine marémotrice (usine de la Rance en France, la plus grande du monde)

	Soleil sur les eaux océaniques <i>parfois appelée énergie « marémotrice »</i>	- hydroliennes (en cours de développement et d'installation) - anciens moulins à marée
eau (barrage, fleuve, lacs)	Énergie mécanique (potentielle et cinétique) <i>parfois appelée dans ce cas énergie « hydraulique » voire par extension « hydroélectrique »</i>	- centrale hydroélectrique (alternateurs) - moulins, forges...
biomasse et dioxygène de l'air	énergie chimique (contribution à l'énergie interne) <i>la biomasse est en fait d'origine énergétique solaire.</i>	- chauffage à bois, résidus de la biomasse - production d'électricité dans des centrales thermiques brûlant de la biomasse. - cogénération : le moyen le plus efficace de bien exploiter ces ressources précieuses est de produire simultanément chaleur et électricité
déchets (ménagers, industrie du bois...) et dioxygène de l'air	énergie chimique (contribution à l'énergie interne)	Cf. : biomasse. On peut utiliser une méthanisation intermédiaire
géothermie	Énergie de l'intérieur de la Terre <i>parfois appelée « chaleur » voir le document « ordres de grandeur » à « la géothermie »</i>	selon les températures disponibles, on peut : - chauffer des habitations, des serres... (très utilisé, notamment en Ile de France) - faire de la vapeur et produire de l'électricité
- uranium, plutonium, thorium - deutérium, tritium, lithium	énergie nucléaire (énergie interne)	- bombe A - centrale nucléaire (fission de l'isotope 235, réacteur EPR) - surgénérateurs ou réacteurs à neutrons rapides (exploitation par fission de l'isotope 238 en quantité plus importante) : Superphénix - bombe H, recherches sur la fusion (tokamak, ITER)

La plus grande partie de l'énergie utilisée dans le monde provient des **combustibles fossiles** (pétrole, gaz, charbon, ...).

La notion d'**énergie primaire** est simple mais elle peut être ambiguë. Il s'agit d'une (res)source d'énergie disponible dans la nature : les combustibles fossiles bruts, le Soleil, le

vent, l'eau des fleuves... L'ambiguïté éventuelle se trouve dans les équivalences énergétiques où l'on applique parfois des rendements arbitraires de conversion, surtout dans le cas de l'électricité. En effet, la façon de transformer la ressource primaire en électricité, joue un rôle majeur dans la valeur énergétique finale (par opposition à primaire).

Nous avons l'habitude de parler des énergies fossiles, éoliennes, hydroélectriques ou issues de la biomasse. En fait, le Soleil est la (res)source qui a permis la production de ces combustibles fossiles ; il donne naissance au vent, autorise l'accumulation d'eau dans les barrages (via le cycle de l'eau), permet la production primaire de matière par les végétaux chlorophylliens.

Énergie lumineuse et énergie rayonnée :

Ce que l'on qualifie d'énergie lumineuse est une énergie transférée par rayonnement dans un spectre visible pour l'œil humain.

D'une façon plus générale, quelle que soit sa longueur d'onde, le rayonnement (électromagnétique) est considéré à ce niveau comme un mode de transfert de l'énergie dans le vide et dans les milieux transparents.

Les facilités de production et de transfert de l'énergie sous forme électrique (communément l'électricité) l'ont rendue indispensable à notre civilisation. **L'électricité** peut être produite grâce à un alternateur mis en mouvement par un entraînement purement mécanique (comme dans l'alternateur de bicyclette grâce à un galet), ou par un fluide (chute d'eau dans une centrale hydroélectrique, vapeur d'eau dans une centrale thermique, jet d'air dans une éolienne).

« L'électricité » peut aussi être produite dans une photopile (cellule photovoltaïque) par absorption du « rayonnement ».

Les espèces chimiques présentes dans une pile (électrochimique) subissent des transformations chimiques lorsque l'on ferme le circuit électrique : l'énergie d'origine chimique (énergie interne) ainsi rendue disponible est principalement transférée sous forme électrique vers les autres composants du circuit.

Si le circuit ne comporte que des lampes, l'énergie reçue par ces composants est transférée essentiellement à l'extérieur sous forme de (par) chaleur (transfert thermique) et de rayonnement.

Dans le domaine de la mécanique, le physicien définit les énergies cinétique, potentielle et mécanique.

L'énergie cinétique est celle liée au mouvement des corps : exemple d'un système en translation ou en rotation.

L'énergie potentielle est celle mise en œuvre lorsqu'un objet change d'altitude (énergie potentielle de pesanteur) ou de forme (énergie potentielle élastique). Elle peut être « libérée » lorsqu'il y a mise en mouvement ; elle se transforme alors en énergie cinétique (eau d'un barrage ; flèche libérée par un arc tendu). Lorsqu'un avion décolle, l'énergie chimique (énergie interne) perdue par le système combustible-dioxygène qu'il utilise est transférée à l'avion sous forme d'énergie potentielle (associée à l'élévation au-dessus du sol), d'énergie cinétique (liée à la vitesse de l'avion et des gaz éjectés), le reste est transféré à l'extérieur (notamment à l'air ambiant et aux gaz éjectés) sous forme de (par) chaleur.

L'énergie mécanique est la somme des énergies cinétique et potentielle.

L'énergie interne est l'énergie totale contenue par un système au repos. L'affirmation de son existence est un postulat. Elle correspond en fait à la somme de toutes les énergies cinétiques et des énergies potentielles.

Dans le domaine de la mécanique, les naturalistes parlent d' « énergie musculaire » :

Le muscle est un organe convertisseur d'énergie ; en effet, ses cellules sont le siège de réactions chimiques, principalement entre les nutriments et le dioxygène, ce qui libère de l'énergie. Cette énergie est transformée dans le muscle pour environ 20 % en énergie mécanique (contraction du muscle). Les 80 % restants conduisent à la modification de la température musculaire et corporelle.

L'énergie mécanique fournie par les muscles peut être transférée pour la mise en mouvement des os et l'exercice de forces pour produire le mouvement d'autres objets : c'est ce qui se passe, par exemple, lorsque les jambes mettent directement en mouvement les pédales du pédalier d'une bicyclette.

Travail et chaleur sont deux modes différents de transfert d'énergie et non des formes (de stockage) de l'énergie. Par abus de langage, quand un système reçoit de l'énergie sous forme de (par) chaleur, on dit qu'il reçoit de l'énergie thermique.

Les notions délicates **d'énergies renouvelables et non renouvelables** sont en lien avec l'échelle du temps.

À l'échelle d'une génération humaine, certaines (res)sources d'énergies se renouvellent (énergies solaire, éolienne, hydroélectrique, marémotrice, issue de la biomasse).

Tel n'est pas le cas pour les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) qui se sont formées très lentement ; les substances animales et végétales des organismes vivant alors à la surface de la Terre, notamment en milieu aquatique, se sont développées grâce à la présence du Soleil ; elles ont conduit au charbon, au pétrole et au gaz naturel après de très lents processus ; les combustibles fossiles peuvent donc être considérés comme de l'énergie solaire fossile.

La géothermie, liée à la température élevée du cœur terrestre, n'est en réalité pas renouvelable car la région de la Terre voisine du puits géothermique se refroidit très lentement.

Activités possibles avec les élèves à propos du vocabulaire

Ce vocabulaire peut susciter la réflexion et l'investigation à travers différents textes, photographies ou images, en assurant le lien entre les disciplines concernées :

Voir ou montrer les différentes utilisations de l'énergie en indiquant leur source.

Travailler la communication à travers la réalisation de documents multimédias (texte, image et son) pour une présentation intranet.

Aboutir à une situation de débat autour de l'énergie (cf. : « éducation au citoyen »).

LES UNITÉS

1) Unités d'énergie

Le joule (J)

Unité d'énergie, dans le système international d'unités (SI). Par exemple, une pierre de masse 1 kg initialement au repos qui tombe sur Terre d'une hauteur de 10 m dissipe au moment de son arrêt sur le sol une énergie d'environ 100 J.

Travail et « chaleur » s'expriment en joule.

Il est nécessaire que tous les professeurs utilisent le joule quelle que soit leur discipline, même si chaque discipline utilise d'autres unités dans des domaines spécifiques.

La calorie (cal)

Ancienne unité d'énergie ; son usage est remplacé par celui du joule. La calorie est définie comme l'énergie (d'origine thermique ou autre) nécessaire pour élever de 1 degré (de 14,5 °C à 15,5 °C) la température de 1 gramme (g) d'eau sous la pression constante de $1,013 \times 10^5$ pascals (Pa).

1 calorie correspond à environ 4,186 J.

Les informations sur les emballages alimentaires sont données en kcal et kJ (ATTENTION à la confusion fréquente entre calorie et kilocalorie).

Le kilowattheure (kWh)

Unité d'énergie utilisée en électricité. Par définition **1 kWh = 3 600 kJ**.

La tonne équivalent pétrole (tep)

Énergie fournie par la combustion d'une tonne de pétrole **1 tep ≈ 11 600 kWh**

Le baril

C'est une unité de volume réservée au pétrole : 1 baril vaut environ 159 litres de pétrole. Du point de vue énergétique, **un baril correspond à 1 600 kWh soit $5,76 \times 10^6$ J**.

Remarques : multiples et sous-multiples :

Les multiples de ces unités

Ils peuvent être obtenus en utilisant les préfixes ci-dessous :

préfixes	kilo	méga	giga	téra	péta	hexa
symbole	k	M	G	T	P	H
sens	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}

Exemples :

1 TWh (térawattheure) = 10^{12} wattheure soit 10^9 kWh

1 Mtep (méga tonne équivalent pétrole) = 10^6 tep soit environ 11,6 TWh.

1 kcal = 1 000 cal

Les sous-multiples

Ils peuvent être obtenus en utilisant les préfixes ci-dessous :

préfixes	milli	micro	nano	pico	femto	atto
symbole	m	μ	n	p	f	a
sens	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}

2) Unité de puissance

Le watt (W)

Unité de puissance dans le système international (SI). Un watt correspond à une énergie d'un joule fournie pendant une seconde ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$).

$$\text{puissance moyenne } p = \frac{\text{énergie}}{\text{durée}} = \frac{W}{t}$$

Le cheval-vapeur : 1 cv = 736 W

ORDRES DE GRANDEUR

Travail et chaleur

- Il faut 1 kJ pour élever de 1 m un corps de poids 1000 N (c'est-à-dire dont la masse est de 100 kg dans un champ de pesanteur de 10 N.kg^{-1} ou m.s^{-2} très voisin de celui qui règne à la surface de la Terre).
- Il faut 4,18 kJ pour augmenter de 1°C la température d'un litre d'eau (il s'agit d'une valeur moyenne entre 0°C et 100°C).
- Pour élever la température de 300 litres d'eau de 50°C, il faut lui apporter une énergie de 63 MJ ; si cette élévation de température se déroule pendant une nuit de 8 heures (28 800 secondes), la puissance moyenne correspondante est 2,18 kW.

La tonne équivalent pétrole (tep) : une référence

Pour comparer différentes sources d'énergie, l'usage est de comparer la quantité maximale d'énergie libérée (vers l'extérieur) par la combustion complète d'une quantité donnée de chacune d'elles. On considère qu'une tonne de pétrole fournit 42 milliards de joules (donc **1 tep = 42 GJ**), une tonne de charbon 29,3 milliards (soit 0,697 tep), une tonne de gaz naturel liquide 46 milliards (soit 1,096 tep).

La fission de 1 kg d'uranium 235 libérerait une énergie de $8,2 \times 10^{13} \text{ J}$, ce qui correspond à l'énergie produite par la combustion d'environ 3 000 tonnes de charbon soit environ 2 100 tep.

Consommation d'énergie

- La consommation mondiale d'énergie était de l'ordre de 12 Gtep en 2003.
- Selon l'Agence Internationale de l'Energie, la répartition des énergies est d'environ 80% pour les énergies fossiles (non renouvelables) avec approximativement 35% pour le pétrole, 25% pour le charbon et 20% pour le gaz naturel, 4 % pour le nucléaire et 16 % pour les énergies renouvelables (hydraulique, éolien, solaire, bois...).
- Pour ce qui concerne l'énergie électrique : les énergies fossiles représentent 66% ; le nucléaire et l'hydraulique, chacun 16% ; la part de l'énergie solaire et éolienne est estimée à 1,3%.
- La consommation française d'énergie était de l'ordre de 280 Mtep en 2004.
- Le pétrole est actuellement la principale source d'énergie dans les transports. En Europe, 98 % des transports fonctionnent à partir du pétrole (ce qui représente les deux tiers du pétrole consommé en Europe).

Les besoins du corps humain

- Selon les normes fournies par la FAO*, pour un adulte **sédentaire**, les besoins **énergétiques** quotidiens sont estimés à environ 11 300 kJ par jour (8 400 kJ pour une femme), ce qui correspond à une **puissance** de l'ordre de 100 W. Toutefois ils varient selon différents facteurs (âge, sexe, activité). Par exemple chez un enfant entre 1 et 3 ans, ils sont de l'ordre de 5 700 kJ et chez un sportif à l'entraînement ils sont de 14 000 kJ.
- La dépense énergétique est essentiellement couverte par les apports alimentaires en glucides (50 à 55 %) qui fournissent de l'énergie à court et à moyen terme et en lipides (30 à 35 %) qui fournissent de l'énergie à long terme. Bien que les protéines puissent aussi fournir de l'énergie, elles sont surtout des constituants essentiels des cellules ; chez les adultes, les recommandations FAO/OMS/UNU* sont au minimum de 0,8 g de protéines par kg et par j pour les femmes et de 0,85 g par kg et par j pour les hommes. L'apport énergétique nécessaire pour couvrir la dépense énergétique totale doit être réparti de façon

équilibrée tout au long de la journée. Par exemple pour un adolescent, il doit être de l'ordre de 25 % au petit déjeuner, 30 % au déjeuner, 15 % au goûter et 30 % au dîner.

- Un apport énergétique de 100 kJ peut être obtenu de différentes manières : 6 g de sucre ou 10 g de confiture ou 10 g de pain ou 30 g de pommes de terre ou 7 g de pâtes.

* Food an Agriculture Organization ; Organisation Mondiale de la Santé ; Université des Nations Unies.

Les risques naturels

- **La foudre** : un éclair peut dégager une très grande puissance (1000 GW), autant que mille tranches de centrale nucléaire, mais il dure peu de temps (de l'ordre de quelques microsecondes) et met en jeu ainsi beaucoup moins d'énergie. Ses caractéristiques extrêmement impulsionnelles et aléatoires font qu'il est quasiment inenvisageable de l'exploiter pour nos besoins énergétiques.

- **Les séismes** :

Un séisme est provoqué par une rupture des roches en profondeur qui se traduit par un glissement de deux compartiments le long d'un plan de faille.

La magnitude

On appelle magnitude d'un séisme le logarithme décimal de l'amplitude maximum mesurée en micromètres mesurée sur l'inscription (sismogramme) enregistrée par un sismographe étalon situé à une distance épacentrale de 100 kilomètres. Soit en tenant compte du fait que l'appareil n'est que rarement à 100 km de l'épicentre : $M = \lg (A / T) + f(\Delta)$

où A est l'amplitude (en microns), T la période (en secondes) et $f(\Delta)$ terme empirique compensant l'amortissement du signal sismique en fonction de la distance Δ .

(lg représente le logarithme décimal)

L'étude de nombreux séismes a permis d'établir une loi d'échelle entre la magnitude (d'énergie) d'un tremblement de terre, le déplacement sur la faille, la longueur de faille active et la durée de la rupture au foyer :

longueur de la faille activée (en km)	déplacement (en m)	magnitude (en M_w)	durée de la rupture (en s)
800	8	9	250
250	5	8	85
50	1	7	15
10	0,2	6	3
3	0,05	5	1
1	0,02	4	0,3

La magnitude d'un séisme reflète l'énergie libérée.

La valeur de l'énergie est multipliée par 32 lorsque la magnitude augmente d'une unité.

magnitude	énergie en joules
3	$1,99 \times 10^9$
4	$6,31 \times 10^{11}$
5	$1,99 \times 10^{12}$
6	$6,31 \times 10^{13}$
7	$1,99 \times 10^{15}$
8	$6,31 \times 10^{16}$
9	$1,99 \times 10^{18}$

Ces valeurs ne représentent pas l'énergie totale mise en jeu par un séisme mais seulement l'énergie libérée sous forme d'ondes sismiques. Au moment d'un séisme, une grande partie de l'énergie emmagasinée avant la rupture est convertie en énergie mécanique (déformation permanente) et transférée sous forme de chaleur. Le rapport entre l'énergie sismique libérée sous forme d'ondes élastiques et l'énergie totale libérée est mal connu. On l'estime à une valeur de l'ordre de 0,1. La valeur moyenne annuelle mise en jeu par les séismes est de l'ordre de 10^{18} à 10^{19} joules, soit de 1 400 à 2 800 milliards de kWh, ce qui correspond à la consommation annuelle d'énergie d'un pays comme la France.

Nombre moyen de séismes dans le monde chaque année :

magnitude	[8,9[[7,8[[6,7[[5,6[[4,5[]3,4[
nombre de séismes	2	20	100	3000	15 000	plus de 100 000

Le séisme de plus grande magnitude connue (9,5) est celui du Chili en 1960. Il correspond à une énergie libérée de $E = 5,6 \times 10^{17}$ joules (bombe atomique d'Hiroshima 20 kilotonnes $E = 10^{12}$ J).

Les énergies renouvelables

- **Le rayonnement solaire :** en plein soleil, à la surface de la Terre, un m^2 placé perpendiculairement aux rayons du soleil absorbe environ 1 kW. Donc pendant une heure, l'énergie absorbée atteint 1 kWh.
- **L'énergie éolienne**
L'Europe concentre l'essentiel du parc éolien mondial (69 %) au début de ce millénaire. La France est en retard par rapport à un engagement européen (production de 756 MW en 2005, pour un total mondial de 58 GW).

- **La géothermie**

On peut rapprocher la valeur moyenne annuelle d'énergie mise en jeu par les séismes de l'énergie thermique moyenne annuelle libérée par les éruptions volcaniques et estimée à quelques 10^{18} J. On reste dans le même ordre de grandeur mais cette énergie est faible si on la compare avec l'énergie annuelle correspondant au flux thermique, estimée à $1,3 \times 10^{21}$ J. C'est équivalent à la production simultanée de 42 000 centrales nucléaires type EDF.

Ce flux thermique, qui se traduit par une augmentation moyenne de 1°C tous les 30 mètres, correspond à une dissipation de l'énergie de l'intérieur de la Terre.

Cette énergie résulte des hautes températures atteintes lors de la phase d'accrétion planétaire, de la radioactivité des roches essentiellement celles du manteau terrestre qui représente plus des quatre cinquièmes du volume global de la Terre, de la croissance du noyau interne solide par rapport au noyau externe liquide (chaleur latente de cristallisation et énergie potentielle libérée par la chute du fer solide) et des frottements dus aux mouvements différentiels de ce dernier par rapport à la rotation terrestre (dynamo terrestre).

Trop de sources ne sont pas actuellement directement quantifiables dans ce bilan énergétique global ; il semble toutefois raisonnable d'avancer qu'au moins les trois quarts du flux thermique proviennent de la radioactivité des roches.

Les principaux éléments radioactifs que l'on trouve dans les roches sont :

noyau père	noyau fils stable	puissance thermique par unité de masse (W/kg)	demi-vie
uranium 238	plomb 206	$9,4 \times 10^{-5}$	$4,5 \times 10^{12}$ années
uranium 235	plomb 207	$5,7 \times 10^{-4}$	7×10^8 années
thorium 232	plomb 208	$2,7 \times 10^{-5}$	14×10^{12} années
potassium 40	argon 40	$2,8 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^{12}$ années

En moyenne, la puissance thermique de la Terre est de 50 kW / km². Mais le flux thermique est très inégalement réparti à la surface du globe. Il peut doubler dans certains contextes géologiques.

La géothermie est une source d'énergie non-polluante et renouvelable à condition de la prélever avec une intensité qui permet aux roches environnantes de ne pas se refroidir plus vite que la Terre ne les réchauffe.

Certaines formations géologiques du sous-sol recèlent naturellement des aquifères dont les eaux (liquide et/ou vapeur selon les conditions de température et de pression) sont le vecteur de transfert de l'énergie thermique. La géothermie très basse énergie exploite des réservoirs situés à moins de 100 mètres et dont les eaux ont une température inférieure à 30°C. On l'utilise pour le chauffage et/ou la climatisation, via une pompe à chaleur. La géothermie basse énergie s'appuie, elle, sur des aquifères à des températures comprises entre 30° C et 100°C. On l'exploite dans des réseaux de chaleur pour le chauffage urbain ou dans le cadre de procédés industriels, par exemple. La géothermie moyenne énergie et haute énergie (jusqu'à 250°C) est utilisée pour produire de l'électricité, au moyen de turbines à vapeur.

- **La biomasse**

La biomasse désigne au sens large l'ensemble de la matière vivante. L'homme utilise cette biomasse, ainsi que les animaux qui la consomment, sous la forme d'aliments, de fibres, de matériaux et d'énergie.

Depuis le premier choc pétrolier, ce concept s'applique aux produits organiques végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques.

Dans le domaine de l'énergie, le terme regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique.

L'énergie de la biomasse désigne donc de l'énergie solaire convertie par les plantes chlorophylliennes utilisées soit directement (bois de chauffage), soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant). Les combustibles fossiles constituent en quelque sorte de la biomasse fossile.

Le bois de feu est la plus ancienne source d'énergie. Les divers déchets ligneux constituent la "biomasse sèche" et sont également appelés "bois-énergie". En Basse Normandie, une chaudière à bois, de 2 mégawatts (2 MW) de puissance fonctionne en permanence du mois d'octobre au mois de mai et fournit 85 % des besoins de chauffage de 400 logements sociaux, du groupe scolaire maternel et primaire, du lycée professionnel et du gymnase.

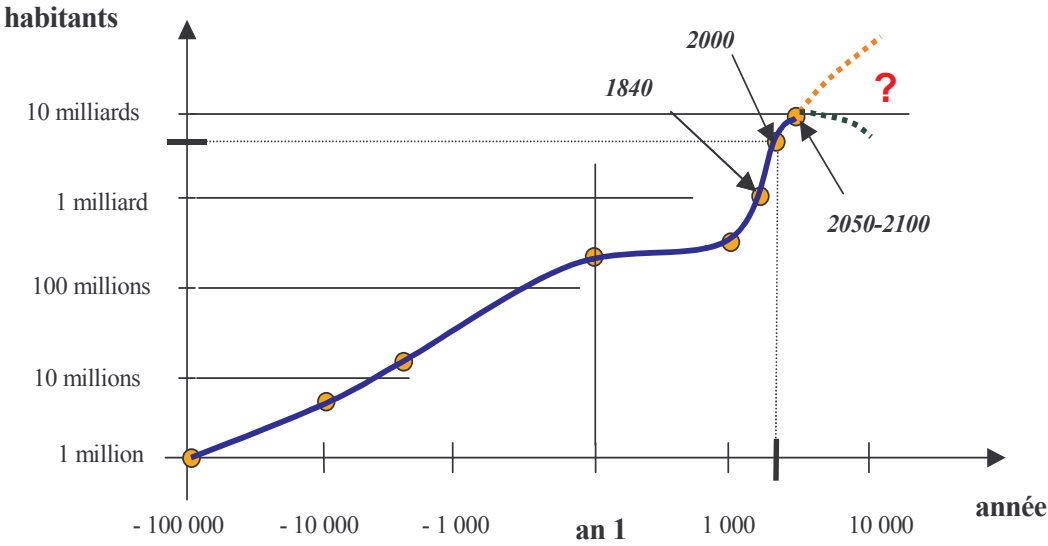
Les déchets organiques d'origine agricole (fumiers, lisiers...), agro-alimentaire ou urbaine (déchets verts, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères...) constituent la "biomasse humide", qui peut être transformée en énergie ou en engrais/amendement.

Les **centrales hydroélectriques** produisent environ 9 % de l'électricité en France, avec une puissance installée de 70 TW hydroélectriques (mais cette puissance ne produit pas en continu, cela dépend de l'approvisionnement en eau et du type de barrage).

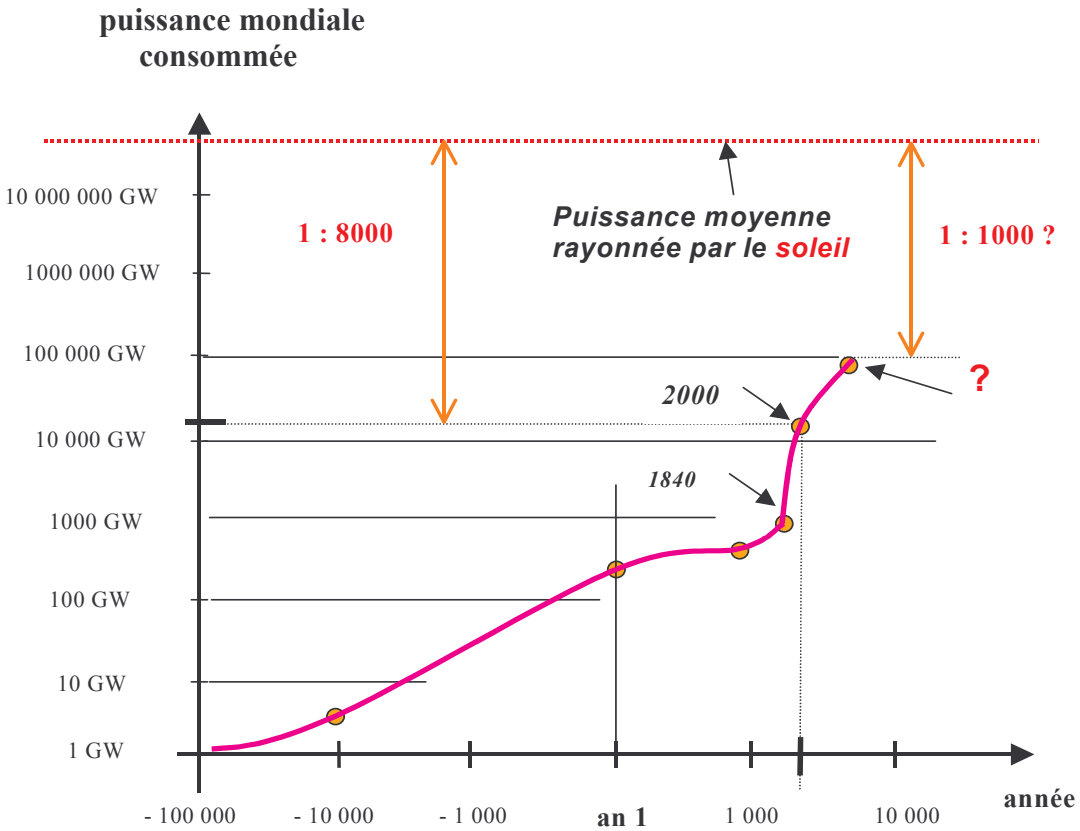
La chute de 100 mètres cubes d'eau tombant d'une hauteur de 3,6 mètres représente une ressource énergétique de 1 kilowattheure.

ANNEXE 3 : ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES EN COMPLÉMENT DE LA PRÉSENTATION GÉNÉRALE

document 1 : évolution de la population mondiale au cours du temps



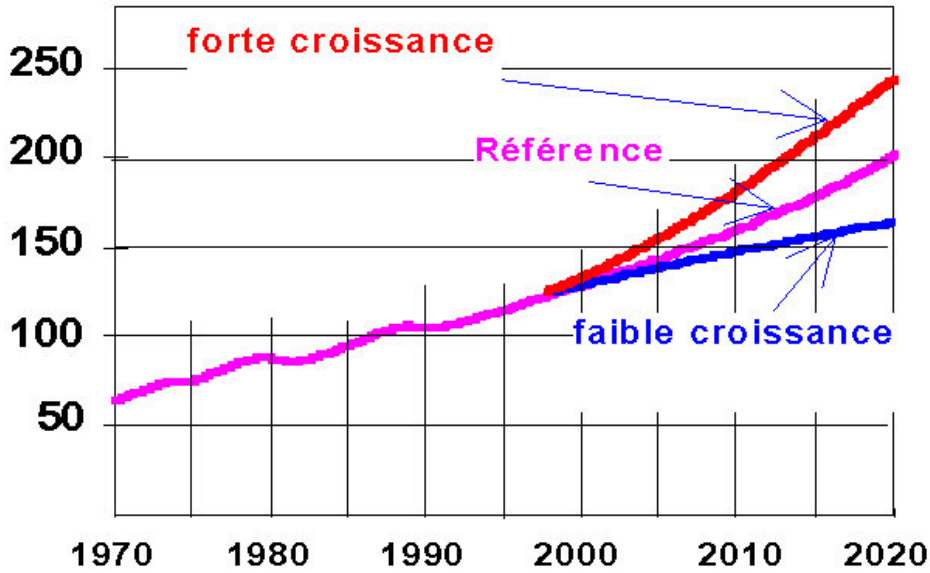
document 2 : puissance mondiale consommée au cours du temps



document 3 : consommation humaine mondiale d'énergie primaire entre 2000 et 2020
(plusieurs scénarii envisagés)

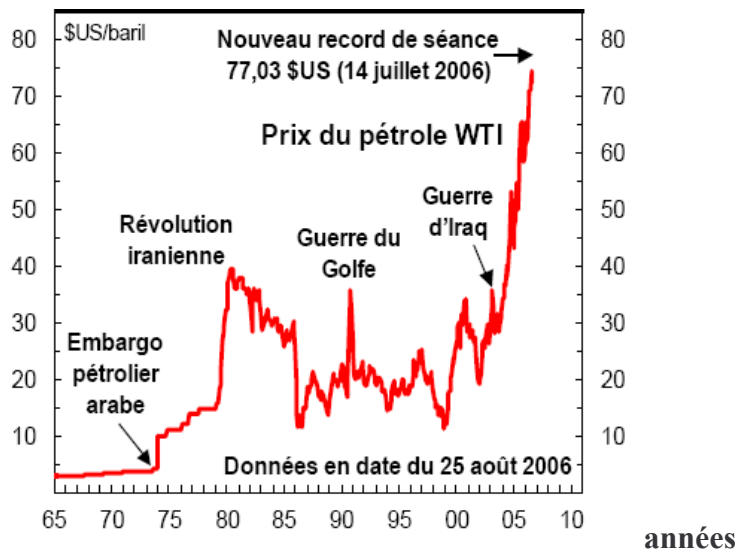
consommation humaine mondiale
d'énergie primaire

10^{12} kW.h



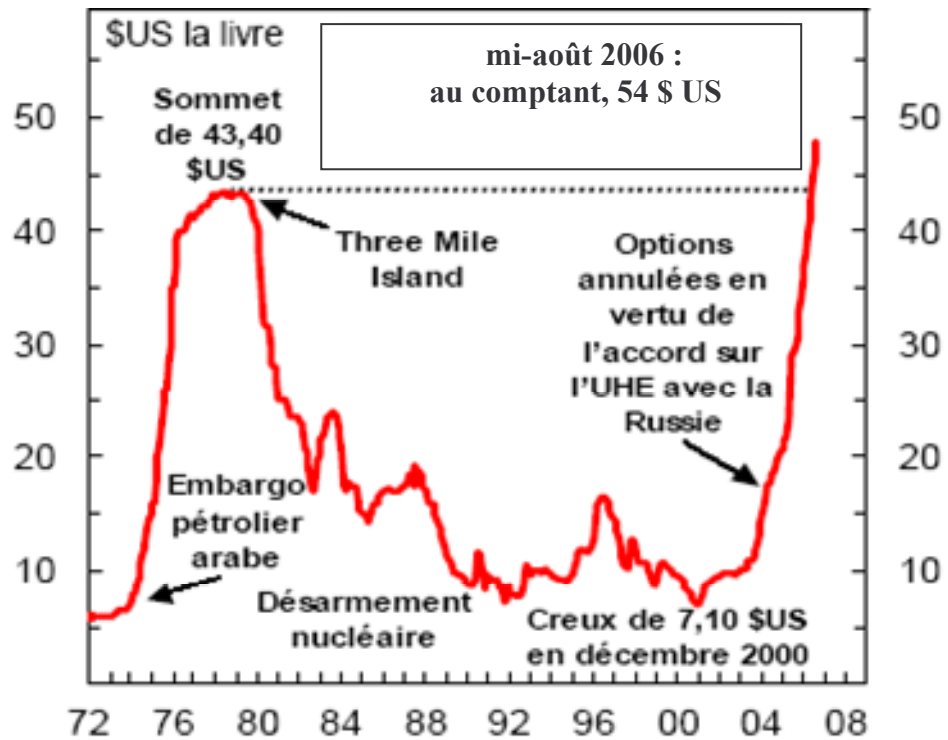
140×10^{12} kWh \approx 12 Gtep
(Gtep : voir annexe 2 sur les unités)

document 4 : coût du baril de pétrole en 1965 et 2005



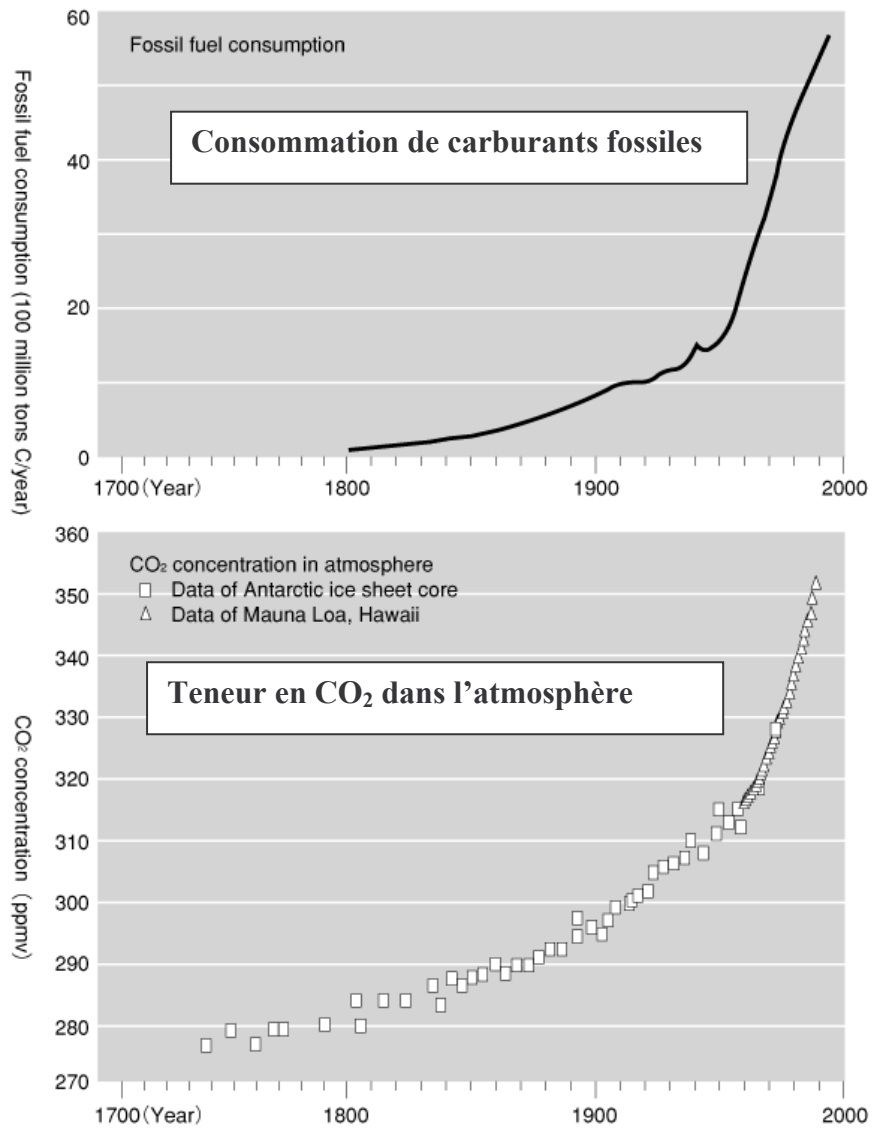
source banque Scotia

document 5 : cours de l'uranium entre 1972 et 2006

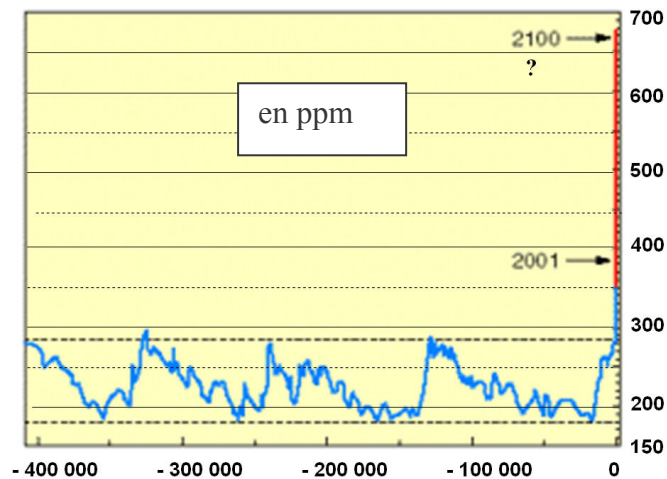


uranium : 10 \$/lb = 26 \$/kg
+ 76% en 2005
20 \$/lb = coût de référence EPR

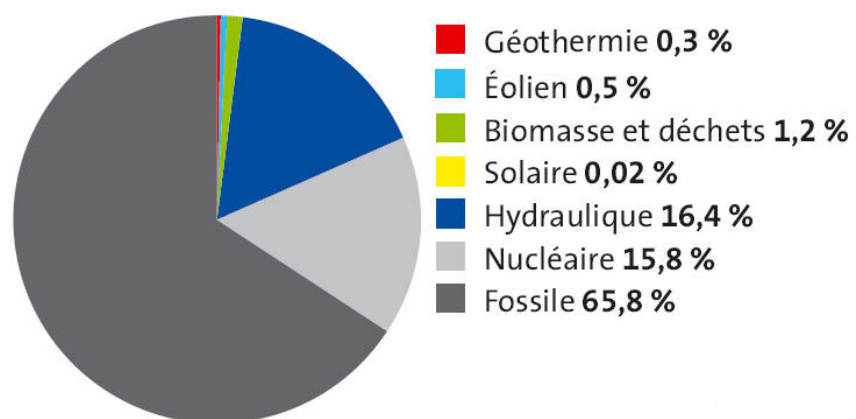
document 6 : comparaison de la consommation de carburants fossiles et de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère au cours derniers siècles



document 7 : concentration en CO₂ dans l'atmosphère au cours du temps



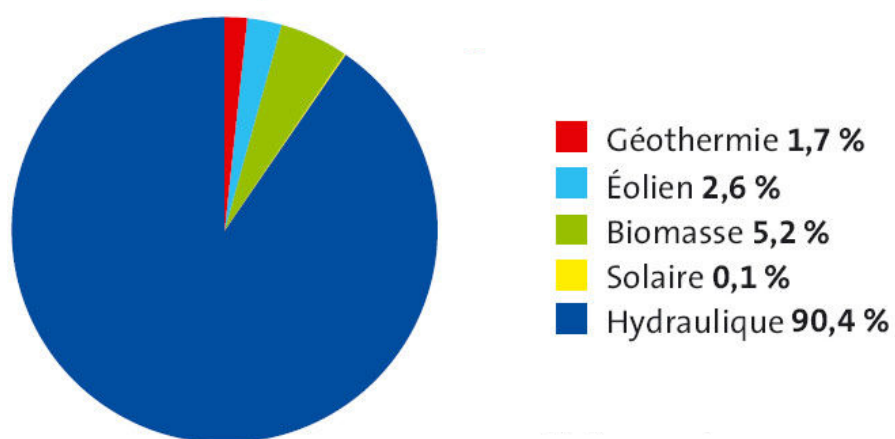
document 8 : production de l'électricité en 2004



17 390 TWh

document 9 : production de l'électricité d'origine renouvelable en 2004

3160 TWh



document 10 : les ressources renouvelables

Comme l'indique le schéma « *Les ressources renouvelables* » ci-après, toutes les activités énergétiques humaines représentent par an $E_h \approx 140 \times 10^{12}$ kWh, soit 12×10^9 tep (en incluant l'énergie renouvelable qui ne rentre pas dans les circuits commerciaux, estimée à 1×10^9 tep).

Par an, le Soleil délivre vers la Terre $12\,000 E_h$, mais 30 % sont réémis directement dans l'espace.

45 % de l'énergie transférée par rayonnement solaire à la Terre sont finalement retransférés par la Terre sous forme de rayonnement à l'atmosphère puis à l'espace, ce qui correspond à $6\,000 E_h$.

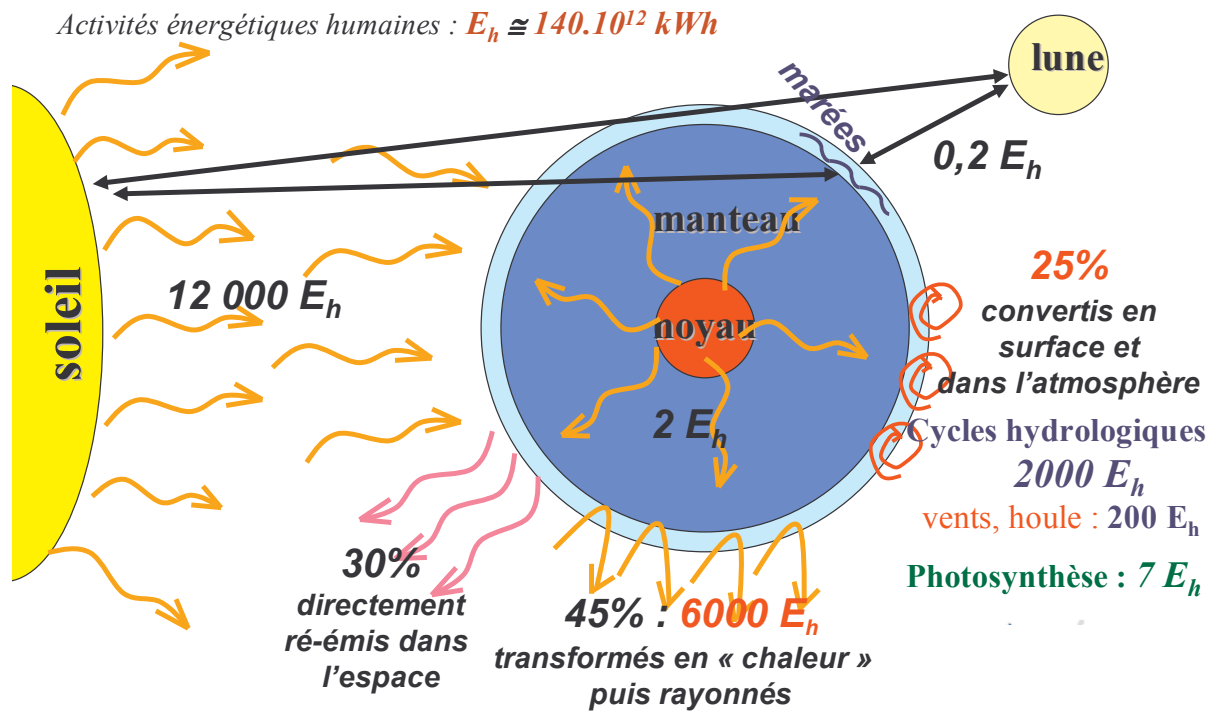
25 % de l'énergie transférée par rayonnement solaire à la Terre est convertie en surface et dans l'atmosphère dans les cycles hydrologiques ($\approx 2\,000 E_h$), le vent et la houle ($\approx 200 E_h$) et lors de la photosynthèse ($\approx 7 E_h$).

Le noyau terrestre produit environ $2 E_h$ par an ; la géothermie exploite cette ressource.

Les interactions Terre-Lune-Soleil (marées) correspondent environ à $0,2 E_h$.

Les ressources renouvelables

(chiffres annuels)



ANNEXE 4 : DE L'IMPORTANCE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Durant, le XX^{ème} siècle, une prise de conscience planétaire s'est progressivement développée :

- nos ressources sont limitées, notamment celles en énergie ;
- nous perturbons notre environnement.

Les sociétés humaines se sont développées grâce aux innovations techniques qui ont permis l'utilisation des ressources énergétiques, leur transformation et leur transfert. Nous vivons dans des **sociétés de plus en plus énergivores** (ou énergétivores) : la demande énergétique moyenne dans le monde augmente de plus de 2% par an ; si aucune mesure n'est prise, en trente ans, la consommation mondiale d'énergie primaire pourrait doubler, celle de l'électricité pourrait tripler. Cette situation mondiale présente de **fortes disparités entre les pays du Nord et ceux du Sud** : 80% des consommations sont le fait de 20% de la population mondiale que représentent les pays du Nord. L'augmentation de la consommation devrait se poursuivre du fait du développement des pays du Sud et de la croissance démographique.

Selon l'Agence internationale de l'énergie, **les sources d'énergies non renouvelables** (fossiles) représentent aujourd'hui 79 % des consommations (pétrole 34%, charbon 25%, gaz naturel 20%), le nucléaire 4,5%, les sources d'énergies renouvelables (hydraulique, éolien, solaire, bois...) 16,5%. Pour ce qui concerne « l'énergie électrique », les sources d'énergies fossiles représentent (en énergie finale) 66% ; le nucléaire et l'hydraulique, chacun 16% ; la part du solaire et de l'éolien est estimée à 1,3%. Au rythme actuel de la consommation et sans changements des technologies ou des choix politiques, un scénario prévoit l'épuisement de certaines sources d'énergies fossiles à échéance d'environ 40 ans pour le pétrole, 70 ans pour le gaz naturel, 135 ans pour le charbon, 50 ans pour l'uranium (sur la base des filières actuelles et de prochaine génération : EPR). Un autre scénario prévoit une augmentation considérable des prix et le vrai problème ne serait pas le nombre d'années restantes mais le risque de crise économique grave bien avant cette échéance.

L'inégalité de la consommation et de l'accès aux sources d'énergie, l'augmentation du coût des « énergies fossiles » tout particulièrement des hydrocarbures sont des facteurs de tensions économiques et politiques qui conduisent à la **recherche d'alternatives aux « énergies fossiles »**. Cette réflexion sur des sources d'énergies de substitution et les politiques énergétiques est d'autant plus urgente que se développe une prise de conscience du **couplage entre énergie et changement climatique**. En effet, la combustion des pétroles, charbons, gaz naturels produit de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone qui sont des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique. L'enjeu du changement climatique et l'épuisement progressif des sources d'énergies fossiles influenceront sur nos modes de production et de consommation d'énergie.

D'un point de vue géographique, il faut maintenant compléter les habituelles cartes de ressources fossiles par des cartes concernant les **ressources renouvelables** : ressources d'ensoleillements annuels ou saisonniers, ressources éoliennes, houlomotrices (houle), hydrauliques (courants océaniques), thermiques océaniques, géothermiques...

Les ressources renouvelables représentent près de 10 000 fois l'ensemble des besoins actuels et ont la capacité à satisfaire l'ensemble de nos besoins et tout particulièrement ceux des plus pauvres. Mais, les exploiter nécessite de veiller à l'impact environnemental et de s'adapter à des formes d'énergie généralement peu concentrées et souvent intermittentes, avec la

nécessité de surmonter des difficultés qui sont d'ordre technologique, organisationnel, sociologique...

Une civilisation fondée sur l'exploitation irraisonnée des ressources renouvelables comporterait, elle aussi des risques. Par exemple :

- la récupération massive de l'énergie des courants marins thermiques comme le Gulf Stream pourrait contribuer à les ralentir et à perturber leur rôle de régulation climatique.
- la construction des barrages hydroélectriques en zone de forêt primaire (zones tropicales) conduit à la formation de lacs artificiels qui entraînent la fermentation de la végétation engloutie. Il en résulte des dégagements de gaz à effet de serre qui peuvent être bien supérieurs (sur un cycle de vie de 100 ans) à ce qu'aurait produit la combustion de carburants fossiles pour produire la même quantité d'électricité, sans compter d'ailleurs la destruction des puits de carbone que constituait cette biomasse.
- l'exploitation du bois de feu, a priori source d'énergie renouvelable, conduit parfois (surtout dans les pays pauvres) à un épuisement des réserves. Pour que le bois soit une source d'énergie renouvelable, il faut se charger de gérer son renouvellement (replanter et entretenir).

L'exploitation des ressources renouvelables doit faire l'objet d'études environnementales afin de réduire leur impact.

Il convient aussi de prendre conscience de la **vulnérabilité d'une civilisation exploitant trop d'énergie**. Par exemple, les réseaux d'énergie (gazoducs, oléoducs, lignes électriques) constituent un élément de grande vulnérabilité de la civilisation occidentale, par exemple en cas de panne importante, de conflits, de problèmes climatiques...

Prenons l'exemple du réseau électrique : la production massive d'électricité, comme c'est le cas aujourd'hui dans les pays riches, s'accompagne d'un réseau de transport constitué essentiellement de lignes aériennes non protégées. Ce système, constitué des organes de production, de transport et de consommation, constitue un système instable, notamment parce qu'il y a très peu de moyens de stockage et qu'il est nécessaire d'ajuster en temps réel la production à la demande. Tout ceci fonctionne grâce à une planification soignée (prévisions météorologiques, des activités, etc...) et à un contrôle en temps réel des centrales de production, notamment celles qui ont le plus de souplesse.

L'accès aux matières premières énergétiques inégalement distribuées à la surface de la planète constitue un autre élément de vulnérabilité pour la civilisation toute entière. Nombre de conflits trouvent leur origine dans l'exploitation de ressources naturelles, notamment énergétiques. L'échéance prochaine de leur épuisement risque d'aggraver les tensions.

C'est pourquoi, il faut absolument prendre en compte, dès maintenant, le peu d'éléments que nous avons à notre disposition, pour **nous adapter** à tout ce qui pourra survenir et ne plus faire des raisonnements économiques à trop court terme.

Ainsi, en matière de survie de notre civilisation, la priorité maximale doit être donnée alors à la sobriété énergétique et au recyclage. Ensuite, seulement, les ressources renouvelables peuvent contribuer à un réel développement durable, à condition de les diversifier, de les décentraliser et, lors de l'existence préalable de réseaux (pays riches) de rendre possible l'ilotage des consommateurs grâce à des moyens de stockage décentralisés associés eux-mêmes à une production décentralisée des formes d'énergie indispensables. Dans ce contexte, il apparaît que l'électricité coûte cher, notamment à l'environnement. Elle doit sans doute être réservée aux usages où elle est réellement indispensable comme le traitement de l'information, l'éclairage, la production de travail mécanique... mais sans doute beaucoup moins pour le chauffage de l'eau ou des locaux.

Pour un réel développement durable de notre civilisation, nous devons désormais effectuer des **écobilans** de toutes nos activités. L'écobilan consiste en une démarche quantitative et la plus exhaustive possible dans le recueil des données (énergie, matières premières, eau, rejets...) pour évaluer les impacts d'un objet, d'une usine, d'un mode de transport, d'un comportement sociologique... sur leur cycle de vie complet : de la fabrication au recyclage en passant par la « vie active ».

Par exemple, en production d'énergie d'origine renouvelable, on ne consomme pas de matières premières non renouvelables (fossiles, uranium) mais on consomme de l'énergie pour fabriquer le système de conversion (éolienne, générateur photovoltaïque...) voire le système de stockage associé, pour les installer et pour assurer la maintenance ; on en consomme encore pour démanteler en fin de vie et recycler les matières premières. Il est donc nécessaire que de tels systèmes remboursent au minimum la facture énergétique globale durant leur vie. C'est heureusement quasiment toujours le cas aujourd'hui, mais des progrès restent à faire par exemple dans le cas des générateurs photovoltaïques, surtout s'ils sont associés à des accumulateurs électrochimiques.

Les citoyens de la planète doivent prendre **conscience de leur impact environnemental et de la solidarité** qui les lie devant la fragilité de leur écosystème. La nécessaire révolution de civilisation, en ce qui concerne le domaine énergétique réside plus dans les changements de nos comportements individuels et collectifs. Les solutions se trouvent beaucoup plus dans les domaines de la sociologie et de la politique que dans la science et la technologie qui ne sont qu'au service des deux premières.

Les problèmes posés ci-dessus ouvrent **diverses pistes de réflexion avec les élèves** en fonction des programmes et des niveaux, par exemple :

- la place des différentes sources d'énergies dans la consommation mondiale et celle des Etats, la localisation des ressources, la notion de réserves ;
- la dépendance à l'égard des sources d'énergies non renouvelables et les contraintes pesant sur la production permettant de montrer en quoi « l'énergie est un produit stratégique » ;
- les liens entre croissance de la consommation et le développement à l'échelle planétaire, le couplage entre énergie et climat ;
- les politiques énergétiques (diversification des sources d'énergie en fonction des contraintes géographiques et des choix politiques des États) ;
- les nouvelles filières énergétiques, la question de l'énergie nucléaire.

Toutes ces analyses doivent être conduites en tenant compte des différentes échelles. Par exemple, l'échelle planétaire permet de présenter la répartition des ressources, les disparités de la consommation, les changements globaux liés aux problèmes énergétiques ; la question des politiques énergétiques doit être abordée à l'échelle de chaque territoire car elle dépend fortement de la géographie (ressources, contraintes) et des choix politiques de chaque État.

ANNEXE 5 : CARTES DE RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES RENOUVELABLES

A titre d'exemples, **quelques cartes des ressources énergétiques** à différents niveaux (France, Europe, Monde) sont consultables auprès des sites de Météo France et de la NASA (pour le vent, l'ensoleillement et la houle), du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM pour la géothermie), de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER pour les courants de marée ou continus, la température des eaux de surface des mers ou pour l'écart de température entre eaux de surface et eaux de profondeur) .

1- Ressources solaires

L'énergie rayonnée (transférée par rayonnement) en provenance du soleil, quantifiée annuellement, ou mensuellement, est celle cumulée captée par une surface plane, généralement d'orientation fixe (horizontale ou inclinée). Elle est donnée en kWh/m². Cette énergie peut être absorbée au niveau de capteurs thermiques ; elle sera restituée sous forme de (par) transfert thermique ou chaleur par exemple en eau chaude (avec des rendements compris entre 50 et 70%). Elle peut aussi être cédée à des capteurs photovoltaïques (avec des rendements commerciaux de l'ordre de 5 à 20% selon les technologies) et transférée par (en) électricité. Météo France peut être une bonne source d'information en la matière, par exemple pour :

- la carte mondiale de l'ensoleillement moyen annuel solaire ;
- les cartes françaises d'ensoleillement mensuel et annuel.

2- Ressources éoliennes

La façon la plus élémentaire de caractériser la ressource énergétique éolienne est de donner les vitesses moyennes annuelles des vents à une hauteur donnée (généralement 50 m). Par exemple, une moyenne annuelle de 6 m/s correspond, avec des aérogénérateurs standard, à une production annuelle en équivalent pleine puissance de 2000 heures. Ainsi, une éolienne de 2 MW produirait dans ces conditions 4 millions de kWh. Ici également, Météo France peut être une bonne source d'information.

3- Ressources houlomotrices (à l'état de recherche)

La houle résulte de l'action du vent sur les surfaces marines. Les ressources sont très importantes et de nombreuses solutions de conversion sont en développement, dont certaines sont très proches de la maturité industrielle. La ressource s'exprime en kW par mètre de front de vague, ce qui permet d'évaluer la puissance moyenne annuelle, mais les fortes variations d'amplitude entre calme plat et tempête et la diversité actuelle des systèmes de récupération, font qu'il n'existe pas encore de relation simple pour convertir les kW/m en énergie annuelle utilisable. Météo France peut être une bonne source d'information sur la houle.

4- Ressources des courants océaniques (énergie hydraulienne)

Les courants océaniques continus sont dus aux différences de densité-salinité et/ou de température. Ils ont en général des vitesses assez faibles, mis à part en certains lieux privilégiés (Gulf Stream au large des côtes de Floride). Leur exploitation énergétique reste encore marginale, contrairement aux courants de marée (alternatifs au rythme des marées). La production d'électricité à partir de l'énergie hydraulienne est encore au stade de l'étude ou de l'expérimentation ; des entreprises travaillent sur des prototypes de turbines en Grande-Bretagne, en France, au Canada et en Norvège notamment ; des tests de matériels sont effectués actuellement au Congo.

Des cartes sont disponibles sur le site de l'IFREMER.

5- Ressources thermiques océaniques (à l'état de recherche)

Les océans et les mers constituent un immense capteur du rayonnement solaire qui stocke et transfère de gigantesques quantités de « chaleur », contribuant ainsi significativement aux équilibres thermiques de la planète. On peut envisager d'exploiter une part (la plus faible possible pour minimiser l'impact) de ce gisement d'énergie dans les zones où il existe des écarts de température suffisamment élevés pour envisager de faire fonctionner des machines thermodynamiques au meilleur coût. C'est dans les zones équatoriales et tropicales que l'on trouve des gradients de température suffisants. La ressource brute de l'énergie solaire captée annuellement par les océans est énorme, mais seule une infime partie est accessible et il n'est pas question de puiser massivement dans ce cycle naturel au rôle crucial dans la stabilité climatique.

Des cartes donnant la différence de température entre les eaux de surface et celles à 1 000 m de profondeur (Energie thermique des mers) exploitable avec des machines thermodynamiques (OTEC = Ocean Thermal Energy Converters) sont disponibles sur le site de l'IFREMER.

6- Ressources géothermiques

Certaines zones de la croûte terrestre permettent d'accéder à des nappes aquifères à température élevée (plus de 60°C) sans forer à des profondeurs excessives (moins de 2 000 m). Cette « chaleur » peut être aisément exploitée pour du chauffage de locaux industriels ou encore pour de la « production » d'électricité si les températures sont suffisamment élevées (plus de 200°C). Des travaux de recherche sont également menés pour exploiter des zones rocheuses sèches à haute température en les fracturant et en y injectant de l'eau qui se réchauffe à leur contact et devient exploitable. Le BRGM (Bureau de Recherche Géologique Minière) est une source d'information précieuse. Des exemples de carte des ressources géothermiques en Europe y sont accessibles.

Une vingtaine de pays produisent de l'électricité à partir de l'énergie géothermique, notamment les USA, les Philippines, le Mexique, l'Italie, l'Islande, la Nouvelle-Zélande. La seule centrale géothermique française est située en Guadeloupe.

ANNEXE 6 : STOCKAGE D'ÉNERGIE

D'après un texte de Bernard MULTON - ENS Cachan

1- Besoins de stockage d'énergie

- Les applications dans les transports (véhicules) et dans les objets portables, nécessitent d'embarquer de l'énergie sauf dans des cas particuliers (ferroviaire : systèmes caténaire et pantographe ou site propre : captation par le sol voire par induction, par exemple projet Serpentine à Lausanne).

Dans le domaine des transports, les carburants liquides (essence, kérosène...) satisfont très bien les besoins, car ils permettent d'assurer un stockage d'énergie particulièrement efficace en terme de masse et de coût (réservoir peu cher et léger). Leur remplacement par d'autres moyens est actuellement difficilement envisageable.

Quant aux applications portables électriques, elles exploitent des accumulateurs électrochimiques rechargeables (appelés communément batteries) ou des piles électrochimiques (non rechargeables, d'ailleurs très coûteuses pour l'environnement).

Ce premier exemple met en évidence l'existence de deux catégories de systèmes de stockage selon qu'ils sont ou non réversibles (la combustion de carburant n'est pas réversible). Il faut cependant souligner que le problème de la réversibilité est plus compliqué qu'il n'y paraît. En effet, on pourrait très bien imaginer que le groupe de propulsion d'un véhicule permette de resynthétiser du carburant durant les phases de freinage ! Cela est théoriquement possible, mais reste très difficile (complexité, encombrement, masse, coût...).

- Mais il existe d'autres raisons pour lesquelles un stockage réversible d'énergie peut être avantageux.

* Par exemple lorsque la disponibilité de la ressource énergétique n'est pas adaptable au besoin de consommation. C'est le cas de l'eau chaude solaire que l'on va accumuler dans un « cumulus » ou de l'électricité photovoltaïque en site isolé pour laquelle on utilise un accumulateur électrochimique (il n'y a pas de soleil la nuit, lorsque l'on a besoin d'éclairage). La tarification de vente d'électricité, qui a conduit à la recharge des chauffe-eau en heures creuses, est l'une des façons de différer la consommation d'électricité produite par des centrales nucléaires peu adaptables.

* Pour le chauffage des bâtiments, dans les régions où les variations saisonnières sont importantes (zones tempérées et voisinage des pôles), on peut envisager du chauffage solaire incluant un stockage saisonnier d'énergie qui sera restituée par transfert thermique ou chaleur. Les capteurs thermiques absorbent alors l'énergie rayonnée en été pour l'accumuler, via des échangeurs, dans un grand accumulateur de « chaleur » (réservoir d'eau, aquifère, sol...). En hiver, cette énergie est puisée dans la réserve, via les échangeurs, pour chauffer les locaux. De tels systèmes existent déjà et ont fait l'objet de diverses réalisations en Europe.

* En particulier dans le domaine électrique, lorsque la puissance ou débit d'énergie (aussi bien celle produite que celle consommée) subit de fortes fluctuations d'amplitude, on a souvent de mauvais bilans énergétiques. En effet, les variations brutales d'énergie (puissances instantanées maximales ou « puissances crêtes » importantes par rapport à la puissance moyenne) conduisent à des pertes accrues et à des surdimensionnements coûteux des

systèmes de conversion. Un dispositif de stockage intermédiaire permet de mieux gérer l'énergie et de réduire les effets néfastes des pics de consommation ou de production.

Prenons le cas d'un tramway électrique ou d'un métro dont les pointes de consommation (démarrages et freinages récupératifs) peuvent être dix fois supérieures à la puissance moyenne. L'adjonction de moyens de stockage adaptés à des transferts rapides permet d'améliorer le bilan énergétique global, en réduisant les pertes notamment dans la ligne électrique de transport.

* Toujours dans le domaine des transports, le moteur thermique (à combustion interne, essence ou diesel) d'une automobile est généralement très surdimensionné en puissance maximale pour permettre de satisfaire des performances d'accélération, de franchissement de côtes, etc. Dans les usages normaux (vitesse constante et modérée), le moteur est très sous-utilisé et travaille loin de sa puissance maximale, avec un rendement médiocre. À cette puissance, un plus petit moteur aura un meilleur rendement et consommera donc moins de carburant. Le surdimensionnement conduit finalement à un gaspillage énergétique. Il y a deux solutions à ce problème : accepter une puissance plus faible et des performances moindres, en accélération notamment, ou hybrider la chaîne de traction en associant au moteur thermique un moteur électrique (réversible) et un accumulateur (électrique). La partie électrique vient alors assister le moteur thermique durant les demandes de puissance importante et permet également de récupérer l'énergie de freinage, ce que n'autorisait pas le moteur thermique non réversible (comme nous l'avons dit précédemment, il ne fabrique pas de carburant durant les phases de frein moteur !). C'est le principe de base des automobiles hybrides, dont la Toyota Prius® est actuellement la plus aboutie et la plus connue des versions commercialisées à grande échelle. La consommation de carburant peut être réduite de façon significative, surtout en cycle urbain.

* Enfin, lorsque l'énergie provient d'un réseau (électricité, gaz), un dispositif de stockage permet de s'affranchir des risques de ruptures d'approvisionnement. Il assure ainsi une autonomie temporaire.

2- Sous quelles formes stocker l'énergie ?

L'énergie peut être stockée sous diverses formes et le choix va dépendre des contraintes générales (usages, masse, coût, durée de vie, notamment en cyclage, c'est-à-dire en fonctionnement cyclé de charges, décharges...) ainsi que des performances des convertisseurs qui doivent la transformer.

Les besoins sont très variés : lumière, chaleur, froid, énergie mécanique (robots ménagers, automobiles, industrie...), etc. Pour les satisfaire, on part d'une ressource énergétique (voir document général sur l'énergie) et on la transforme pour un usage final. Entre la ressource et l'usage final, l'énergie va subir des transformations ou conversions, un transfert (elle sera alors considérée comme un vecteur énergétique), des stockages éventuels...

Les formes sous lesquelles l'énergie peut être stockée sont nombreuses, et le choix résulte d'une complexe équation technico-économique. Citons quelques unes de ces formes :

- les carburants (l'énergie que nous considérons ici est celle des liaisons chimiques qui peuvent être rompues et permettre des transformations, avec formation de nouvelles liaisons chimiques, dont la plus courante est la combustion qui s'accompagne d'un transfert d'énergie par chaleur et par rayonnement)

- le bois, les huiles d'origine biologique sont des exemples de sources renouvelables mais la réversibilité du stockage ne se produit pas aux échelles de temps qui nous intéressent dans les usages courants
- les carburants liquides (fossiles ou biocarburants) qui nécessitent également trop de temps pour être synthétisés dans les applications habituelles et permettre un stockage réversible
- l'hydrogène, en fait le dihydrogène (qui « n'existe pas » à « l'état naturel » sur la Terre ; il est obtenu à partir de l'eau, d'hydrocarbures...); il peut être « brûlé », notamment dans des moteurs à combustion interne. Mais il peut aussi faire l'objet de transformations réversibles ou quasi-réversibles (le passage dans une pile à combustible et l'électrolyse -transformation inverse- donne cependant lieu à des pertes énergétiques non négligeables). Mais le plus difficile est de stocker le dihydrogène. Dans un réservoir haute pression, la masse du réservoir est bien supérieure à celle du carburant et l'énergie nécessaire à la compression est élevée. La liquéfaction pose encore d'autres problèmes. Il existe d'autres voies, mais dans tous les cas, le stockage du dihydrogène est difficile et coûteux. Toutes ces raisons font qu'il ne pénètre pas plus rapidement dans le secteur automobile...

- l'énergie interne liée à l'agitation microscopique des entités chimiques (incorrectement communément appelée « chaleur ») est sans doute la forme d'énergie la plus facile à obtenir et à accumuler. L'énergie reçue par transfert thermique (chaleur) peut être stockée dans un liquide ou dans un solide, voire dans des matériaux qui peuvent changer d'état physique. Si l'on doit changer de température pour satisfaire un besoin particulier, les échangeurs (abaissement de la température) et les pompes à chaleur (élévation de la température) peuvent faire office de convertisseurs d'énergie. Le rendement des pompes à chaleur est soumis au principe de Carnot. La pompe à chaleur nécessite un apport d'énergie mécanique et la transformation s'accompagne d'une variation des températures.

Les spécialistes des domaines considèrent que, moyennant une isolation convenable et un volume disponible éventuellement important, la « chaleur » ou le « froid » peuvent être stockés aisément dans des matériaux peu coûteux (eau, argile,...).

- l'énergie mécanique potentielle : nous baignons dans le champ gravitationnel de la Terre. Ainsi, si l'on éloigne du centre de la Terre un objet qui possède une masse, on accroît son énergie potentielle. Si on le libère, il « tombe » sous l'effet de la force de gravitation (poids) et restitue l'énergie emmagasinée.

Ce principe est exploité dans les centrales de pompage-turbinage ou de stockage hydraulique gravitaire dans lesquelles de l'eau est transférée entre deux bassins haut et bas reliés par des canalisations. Le bon rendement des pompes-turbines (réversibles) et des machines électriques (parfaitement réversibles), associé aux faibles fuites et à une évaporation négligeable, conduisent à un stockage très efficace, le plus utilisé au monde pour l'électricité.

L'énergie potentielle (de pesanteur) accumulée par une masse M située à une hauteur h de l'endroit où elle peut retourner sous l'effet de la gravité (intensité du champ de pesanteur ou accélération de la pesanteur $g \cong 9,81 \text{ m/s}^2$ à la surface de la Terre) vaut : $E_{pp} = M.g.h$.

(Les ressorts, utilisés notamment dans les montres mécaniques, constituent une autre variante de stockage d'énergie mécanique potentielle dite élastique, exploitant les forces de cohésion interne de la matière.)

- l'énergie cinétique : lorsqu'un objet de masse M se déplace linéairement à une vitesse v , il emmagasine une énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2} M.v^2$. S'il est en rotation continue (de préférence

autour de son centre de gravité) à une vitesse angulaire Ω (en radians par seconde, $\Omega = 2.\pi.f$ où f est la fréquence de rotation en tours par seconde), l'énergie cinétique stockée vaut alors : $E_c = \frac{1}{2}.J.\Omega^2$ où J est le moment d'inertie de l'objet (lié à la masse et à la forme de l'objet en rotation). On utilise ce principe dans les accumulateurs inertiels (volants d'inertie). Ce principe est exploité depuis très longtemps, par exemple, dans les tours de potier, dans les machines à coudre à pédale et dans les moteurs à explosion pour lisser la rotation à basse vitesse (la puissance générée par les pistons d'un moteur thermique est très pulsante, c'est pourquoi il existe une vitesse de ralenti minimale, sinon le moteur vibre excessivement et cale).

- stockage électrochimique : des réactions d'oxydo-réduction réversibles permettent d'accumuler de l'énergie chimique puis de la restituer par transfert électrique avec un assez bon rendement. Des charges ou décharges trop rapides (à puissance excessive) conduisent néanmoins à des pertes importantes. À l'opposé, au repos, un accumulateur subit une autodécharge relativement lente (de l'ordre du mois à l'année). De nombreuses technologies d'accumulateurs électrochimiques cohabitent. Les plus fréquemment rencontrées sont de types plomb-acide (diverses variantes technologiques, dont celle des batteries de démarrage des automobiles), nickel-cadmium (Ni-Cd), souvent utilisées dans l'outillage électroportatif et lithium (diverses variantes), la plus performante, fréquemment exploitée dans les téléphones mobiles et les ordinateurs portables.

- stockage électrique direct : De l'énergie électromagnétique peut être stockée dans des condensateurs (voire dans des super condensateurs plus performants encore, moyens envisagés pour les applications de grande puissance) et dans des inductances (bobines, énergie magnétique), de préférence supraconductrices pour stocker l'énergie sur des durées suffisantes (les supraconducteurs sont des conducteurs fonctionnant à très basse température avec une résistance voisine de zéro donc de très faibles pertes par effet Joule).

- gaz comprimé : on peut comprimer de l'air dans des bouteilles ou dans des réservoirs géologiques (air comprimé en caverne) à partir d'énergie mécanique (elle-même éventuellement issue d'une source électrique) puis faire la transformation inverse. Le rendement est généralement assez médiocre, mais des solutions permettent de l'améliorer avec un fluide intermédiaire (huile par exemple), un moteur-compresseur hydraulique comprime alors l'air via le fluide.

3- Caractéristiques et performances du stockage

Caractéristiques physiques :

L'énergie stockée et celle réellement exploitable (toujours inférieure à celle stockée) sont différentes. La différence entre énergie stockée et exploitable est liée à diverses limitations pratiques, notamment la profondeur maximale de décharge. Ainsi, il ne faut pas confondre capacité de stockage (donnée « commerciale ») et énergie stockée réellement exploitable. La capacité énergétique d'un accumulateur est bien entendu la caractéristique la plus dimensionnante.

La puissance maximale en charge ou en décharge (ou débit maximal d'énergie) est physiquement limitée et représente également un élément dimensionnant qui compte dans le coût, l'encombrement, etc...

Le rapport entre énergie exploitable et puissance maximale est le temps minimal de charge ou de décharge, appelé parfois constante de temps de l'accumulateur.

La recharge d'un réservoir d'essence à la pompe représente une puissance de plusieurs mégawatts (50 litres d'essence représentent une énergie de 600 kWh (2 160 MJ), un remplissage en 5 minutes (= 300 s) correspond à une puissance équivalente de 7,2 MW). En imaginant que nous disposions de voitures tout électriques avec des accumulateurs suffisamment performants pour accepter une telle puissance de recharge, il serait difficilement envisageable de faire l'opération chez soi, en effet les puissances électriques disponibles au niveau domestique sont de l'ordre de 10 kW, 700 fois moins...

L'énergie massique : capacité énergétique par unité de masse.

Les carburants liquides permettent d'atteindre environ 10 kWh/kg, tandis que les meilleurs accumulateurs électrochimiques (au lithium) atteignent péniblement 150 Wh/kg. Un supercondensateur permet de stocker environ 5 Wh/kg.

Le rendement énergétique : il doit être défini, non pas en un point de fonctionnement particulier, mais sur un cycle complet et représentatif de l'application, car le rendement varie considérablement en fonction de nombreux paramètres.

La connaissance de l'état de charge énergétique : il est important de pouvoir connaître en tout instant l'énergie réellement disponible. Toutes les technologies ne se prêtent pas aussi facilement à la mesure de cette grandeur, notamment les batteries électrochimiques...

Caractéristiques économiques :

Les coûts d'investissement (en euros par kilowatt heure ou par joule) :

Pour le stockage de l'électricité : 200 €/kWh pour des batteries au plomb-acide performantes à quelques 10 000 €/kWh pour des dispositifs à haute puissance (ou faible constante de temps) et longue durée de vie en cyclage (grand nombre de cycles de charge-décharge).

La durée de vie en nombre de cycles de charge-décharge, car elle permet de déterminer le coût sur cycle de vie, à travers le nombre nécessaire de remplacements.

Les accumulateurs électrochimiques supportent un nombre maximal de cycles relativement faible de quelques centaines à quelques milliers selon les technologies et les sollicitations. En général, plus grande est la profondeur de décharge à chaque cycle, plus faible est le nombre de cycles supporté.

[Cela dépend des technologies, pour faire simple, voici quelques « recettes d'usage » :

- les batteries nickel-cadmium (et dans une moindre mesure les nickel métal hydrures NiMH) nécessitent d'être déchargées complètement pour profiter de leur pleine capacité (ce phénomène était appelé familièrement "effet mémoire"). Mais elles subissent alors un vieillissement en cyclage accéléré selon la "loi" précédemment énoncée. On doit alors choisir entre disposer de batteries à capacité handicapée ou de batteries que l'on use rapidement !

Pour les conserver longtemps, si elles ne servent pas, il faut les décharger.

Cette technologie n'est aujourd'hui quasiment plus utilisée dans les téléphones mobiles, mais reste très courante dans l'outillage électroportatif, les jouets...

- les batteries au lithium n'ont pas ce problème, on peut les recharger à partir de n'importe quel état de charge et profiter de leur pleine capacité énergétique. Et, selon la « loi » précédente, le nombre de cycles de charges-décharges supporté est d'autant plus faible que les décharges sont profondes.
- quant aux batteries au plomb-acide (celles de démarrages des voitures, ou des systèmes photovoltaïques en site isolé), il ne faut pas les conserver déchargées trop longtemps sous peine de sulfatation irréversible et de destruction.]

Caractéristiques environnementales :

Si le stockage coûte souvent cher économiquement, il coûte également cher à l'environnement (matières premières, énergie de fabrication et de recyclage, produits dangereux, etc.).

Le dimensionnement d'un système énergétique incluant un stockage nécessite une optimisation de l'ensemble des éléments sur un cycle de vie complet (éco-conception) afin de minimiser la dépense environnementale et d'obtenir un gain réel par rapport aux systèmes d'ancienne génération.

Une remarque : L'électricité ne se stocke pas aisément **directement** mais elle peut se convertir en d'autres formes elles-mêmes stockables (potentielle, cinétique, chimique, magnétique...). Grâce à de bons rendements de conversion, à l'occasion d'une double transformation, on peut donc la restituer. L'affirmation non explicitée « l'électricité ne se stocke pas » est donc erronée.

L'électricité est massivement produite, transportée et utilisée en courant alternatif. L'arrivée, dans les années 1980, d'une électronique de puissance très performante, économique et dont les puissances traitées sont maintenant quasi illimitées, a permis de réaliser des conversions aisées de l'énergie électrique vers d'autres formes et donc a contribué à faciliter le stockage de l'énergie issue de l'électricité quelles que soient la fréquence et la tension.

ANNEXE 7 : QUELQUES RESSOURCES BIBLIOGRAPHIQUES ET MUSÉOGRAPHIQUES

ÉLÉMENTS DE BIBLIOGRAPHIE

Documents papier :

- Dictionnaire de physique : JP. SARMANT chez Hachette
- Unités et grandeurs – symboles et normalisation – AFNOR chez Nathan
- L'Énergie et sa maîtrise (mars 2004 - 165 pages) : Le CRDP du Languedoc Roussillon
- Les énergies : pratiques disciplinaires et transversales au collège – Reims : CRDP/Troyes : CDDP, 2001 – réf. 510 10B01
- Un guide d'initiation sur les énergies du futur : Marek WALISIEWICZ, CAMPUSPRESS France, coll. Focus sciences, 2003
- Histoire, état des lieux et perspectives : Jean-Christian LHOMME, DELACHAUX et NIESTLE, coll. Beautés de la nature, 2001
- Énergie, un défi planétaire : Benjamin DESSUS, Belin, coll. Débats, 1999
- Les énergies renouvelables Ouvrage collectif, CRDP de l'académie de Grenoble, 2000
- Atlas des énergies, pour un monde vivable : Marek WALISIEWICZ, CAMPUSPRESS France, coll. Focus sciences, 2003
- tout savoir (ou presque) sur l'énergie : André DELALANDE - PYC livres
- La saga de l'énergie Claude BIENVENU : Explorus, la cité des sciences et de l'industrie
- "enseigner l'énergie au collège, une gageure?" BUP N° 856 - p.1105, Juillet/Aout/Septembre 2003 par Groupe RIVAL
- L'Énergie : Jean Louis BOBIN - collection Dominos
- L'énergie : Christian NGO - Dunod, collection Univers Sciences
- Les innovations qui vont changer notre vie : Eric De RIEDMATTEN. Edition : L'Archipel

Cédéroms :

- Les énergies renouvelables - Comment ça marche ? CRDP de l'académie de Grenoble, 2000
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) : les problématiques de l'énergie et de l'environnement (RIP du 20/04/2003)

Sites :

ENS Lyon : http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/actualite_des_labos/dossiers/themes-convergence/

ENS Cachan :

[http://www.mecatronique.bretagne.ens-](http://www.mecatronique.bretagne.ens-cachan.fr/DocPedagogiques/Energie_et_developpement_durable_ENSCachan2006.pdf)

[cachan.fr/DocPedagogiques/Energie_et_developpement_durable_ENSCachan2006.pdf](http://www.mecatronique.bretagne.ens-cachan.fr/DocPedagogiques/Energie_et_developpement_durable_ENSCachan2006.pdf)

[http://arnica.bretagne.ens-](http://arnica.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/EnergiesRenouv/CiteEspace_Energie_18mai02_Multon.pdf)

[cachan.fr/pdf/mecatronique/EnergiesRenouv/CiteEspace_Energie_18mai02_Multon.pdf](http://arnica.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/EnergiesRenouv/CiteEspace_Energie_18mai02_Multon.pdf)

conférence grand public à la cité de l'espace à Toulouse en 2002

<http://www.cea.fr/fr/jeunes/Animation/LesEnergies.htm> : document qui utilise un langage simple

<http://www.industrie.gouv.fr/energie/sommaire.htm>

http://arnica.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/Stockage_ECRIN_Avr2003.pdf
un document sur le stockage de l'énergie électrique rédigé dans le cadre du débat national sur les énergies

http://www.mecatronique.bretagne.ens-cachan.fr/DocPedagogiques/M2R_Ener_2006.pdf
http://www.mecatronique.bretagne.ens-cachan.fr/DocPedagogiques/M2R_Eolien_2006.pdf
(document de niveau master plus difficile, avec de très belles photographies)

<http://www.science-decision.net/> à la rubrique « énergie »
<http://www.caes.cnrs.fr/Publications/CAESMagazine/CAESMag-72/Controverse.pdf>
très accessible écrit pour le journal du comité d'entreprise du **CNRS** (CAES)
et quelques autres

Ministère de l'Industrie : http://www.industrie.gouv.fr/index_portail.php

Les différentes ressources d'énergie en France : http://www.edf.fr/index.php4?coe_i_id=206

Les Energies : données du site « Sciences et décisions » :
<http://www.science-decision.net/cgi-bin/topic.php?topic=ENP>

Fondation Nicolas Hulot : les énergies :
http://www.fnh.org/francais/doc/en_ligne/energie/intro.htm

Rapports nationaux :

Rapport d'activité 2005 de la Commission de régulation de l'énergie
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/064000059/index.shtml>

Recommandations pour un développement durable des biocarburants en France
DOUAUD André, GRUSON Jean-François
Commission interministérielle véhicules propres et économes
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/064000081/index.shtml>

"Définition et implications du concept de voiture propre"
CABAL Christian, GATIGNOL Claude
Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/064000105/index.shtml>

PISTES ET RESSOURCES DES MUSÉES

De nombreux musées peuvent constituer des ressources locales.

Les possibilités offertes par celui du musée des Arts et Métiers de Paris ne constitue qu'exemple.

Le correspondant est monsieur Y. ROUSSEL, professeur relais de sciences physiques et chimiques.

Ressources existantes :

Dossiers de l'enseignant

- " Les pionniers des transports "

<http://www.arts-et-metiers.net/magic.php?P=183&ID=35&lang=fra&flash=f&s1=&s2=>

Le " petit journal " correspondant (<http://www.arts-et-metiers.net/pdf/DEPJ-transports.pdf>) décrit en une dizaine de pages l'évolution des transports en relation avec les différents modes d'utilisation de l'énergie.

- " L'âge industriel 1 : l'ère du charbon " et " L'âge industriel 2 : électricité, pétrole et chimie " correspondent aux programmes actuels d'histoire et géographie de seconde et première. Le texte des " petits journaux " analyse la révolution industrielle en relation avec l'innovation technique, et fait une part importante aux transformations de l'usage de l'énergie.

URL des pages de présentation et adresses pour télécharger les " petits journaux " associés :

- <http://www.arts-et-metiers.net/magic.php?P=183&ID=41&lang=fra&flash=f&s1=&s2=>
- <http://www.arts-et-metiers.net/magic.php?P=183&ID=95&lang=fra&flash=f&s1=&s2=>
- <http://www.arts-et-metiers.net/pdf/DEPJ-age-ind1.pdf>
- <http://www.arts-et-metiers.net/pdf/DEPJ-age-ind2.pdf>

Liste des vidéos en ligne du domaine Energie (A consulter sur <http://www.arts-et-metiers.net/magic.php?P=191&lang=fra&flash=f>)

- Machine de Marly, 1684
- La machine à vapeur de Watt, 1780
- Roue en dessous type Poncelet, 1828
- Turbine hydraulique de Fourneyron, 1832
- Pile de Volta, 1799
- Dynamo de Gramme, 1871
- Moteur Lenoir, 1860
- Moteur De Dion, 1895

Dossiers documentaires.

Dossiers objets :

- Dynamo de Gramme. - 2001. - Ill. ; In-4. - Bibliogr.
- Eolienne "N54/1000kw". - 2001. - Schémas ; In-4. - Bibliogr.
- Les Marmites de Papin. - 2003. - Ill. ; In-4. - Bibliogr.
- Machine à vapeur de Corliss. - 2002. - Ill. ; In-4. - Bibliogr.
- Machine à vapeur de Scott. - 2000. - Ill. ; In-4. - Bibliogr.
- Machine à vapeur de Watt. - 2001. - Ill. ; In-4. - Bibliogr.
- Machine à vapeur du bateau Le Sphinx. - 2002. - Ill. ; In-4. - Bibliogr.

Dossiers thématiques :

Les dossiers documentaires thématiques sont des dossiers enrichis à partir du dépouillement des périodiques reçus au centre de documentation du Musée. Une série de dossiers a été constituée sur les différentes formes d'énergies et leur usage : moulins à eau, vapeur, électricité, éclairage, physique nucléaire, gaz, pétrole, énergie solaire, géothermie...