

Université Joseph Fourier, Grenoble - 2015/2016
L2 PHY236 et GEL23b - option Énergétique

Johann Collot - collot@in2p3.fr

Monique Giroud - monique.giroud@ujf-grenoble.fr

Stéphane Grenier - stephane.grenier@grenoble.cnrs.fr

Hervé Guillou - herve.guillou@ujf-grenoble.fr

Guillaume Laurent - guillaume.laurent@neel.cnrs.fr

I. Énergie : Définitions & Principes

Approche thermodynamique (Introduction Sommaire)

2. Définitions

Un système physique possède de l'énergie s'il peut fournir du travail (un mouvement), du rayonnement ou de la chaleur.

L'énergie est une observable physique scalaire (un nombre), additive, qui est exprimée en J (Joules).

L'énergie est en apparence multiforme, mais fondamentalement il n'existe que deux types d'énergie :

- l'énergie cinétique qui est liée au mouvement des corps (laquelle n'est définie en principe que dans un référentiel inertiel, c-à-d en mouvement uniforme) ;
- l'énergie potentielle d'interaction entre les corps qui constituent le système étudié et - si le système n'est pas isolé - entre le système et le milieu extérieur.

Ne pas confondre énergie et puissance. La puissance est la quantité d'énergie produite (ou dissipée) par un système par unité de temps. La puissance d'un système isolé est par définition nulle alors que son énergie peut être très grande : exemple le système solaire !

$$\text{Puissance } P = \Delta E / \Delta t \text{ en W (Watts)}$$

3. Les différentes formes apparentes de l'énergie

L'énergie de masse : certainement le plus célèbre des concepts physiques !

Elle est égale à l'énergie interne totale (somme de toutes les énergies quelles qu'en soient leurs natures) d'un corps observé au repos. Il s'agit là de l'énergie interne absolue du corps en question. La masse de ce corps est alors définie comme étant :

$$m = \frac{E_{tot}^{repos}}{c^2}$$

où $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ = vitesse de la lumière dans le vide (référence système SI)

Cette forme d'énergie « stockée » dans un corps n'est pas fondamentale, dans la mesure où il s'agit de la somme de toutes les énergies détenues par ce corps et qu'en ce qui concerne les constituants élémentaires de la matière (protons, neutrons, électrons ...), on peut l'exprimer comme une somme d'énergies cinétiques et d'interaction. On ne peut en utiliser qu'une toute petite partie.

L'énergie de masse est colossale : une masse de 1 μg de matière totalement convertie en énergie produirait 25 kWh = $25 \times 3600 \text{ kJ} = 90 \text{ MJ}$

(180 fois l'énergie cinétique d'une voiture de 1 tonne roulant à 120 km/h)

4. Différentes formes apparentes de l'énergie

Énergie mécanique : somme de l'énergie cinétique + l'énergie potentielle d'un système.

Énergie de vibration ou d'oscillation : somme énergie cinétique + énergie potentielle (énergie mécanique) d'un oscillateur libre, observée dans son centre de masse.

Exemples : masse accrochée à un ressort , ou une molécule diatomique assimilée à un oscillateur parfait.

Énergie thermique ou chaleur : somme des énergies cinétiques et des énergies de vibration des constituants microscopiques d'un fluide ou d'un solide mesurées dans leur référentiel propre (au repos). C'est une **énergie désordonnée** qui correspond à l'agitation thermique des atomes, des molécules et des électrons libres de la matière.

Énergie de liaison : énergie potentielle d'interaction qui assure la liaison d'un corps. Cette énergie est négative : elle diminue l'énergie interne du corps en question, car pour briser un corps, il faut apporter de l'énergie. Exemples : 2 aimants collés l'un à l'autre ; extraction d'une sonde spatiale de la pesanteur de notre planète.

Puisqu'elle diminue l'énergie interne, l'énergie de liaison abaisse l'énergie de masse de ce corps. Plus un système est lié, plus sa masse est faible : cf énergie nucléaire.

5. Différentes formes apparentes de l'énergie

Énergie chimique : énergie libérée lorsque des molécules plus liées se forment :
exemple de la combustion du carbone : $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{environ } 240 \text{ kJ/mole}$

Énergie de rayonnement : somme des énergies cinétiques portées par des radiations (ondes électromagnétiques, rayonnement du corps noir, émissions radioactives ...) sachant que les radiations sont constituées de particules en mouvement (photons, électrons, noyaux d'hélium ...).

Énergie solaire : énergie du rayonnement électromagnétique émis par le Soleil, reçue sur la planète Terre.

Valeur moyenne 340 J/s/m^2 pour l'ensemble de la sphère terrestre à l'entrée de son atmosphère.

Valeur maximale = constante solaire 1348 J/s/m^2 à l'entrée de l'atmosphère

Énergies gravitationnelles, électriques, électrostatiques, magnétiques :
sont des formes particulières d'énergies potentielles d'interaction.

Énergies des courants marins et des vents : énergies cinétiques des courants et des vents qui circulent. Leur circulation est induite par des différences de températures à la surface de la Terre : effet indirect du rayonnement solaire.

6. Premier principe : Principe de conservation de l'énergie

L'énergie interne absolue (énergie totale) d'un système isolé (fermé et sans interaction avec le milieu extérieur) se conserve au cours du temps.

Une formulation équivalente dit que sur un cycle (le système revenant au même état initial), la variation d'énergie interne d'un système est strictement nulle.

Principe énoncé pour la première fois en 1845 par Jules Robert Mayer. Une formulation plus mathématique lui a été donnée par Hermann Ludwig von Helmholtz en 1847. On pense que Sadi Carnot est mort du choléra alors qu'il était sur cette piste.

C'est un principe **très fondamental** dont l'établissement a nécessité des travaux remarquables (cf expériences de Joule pour démontrer l'équivalence travail - chaleur), et dont la portée dépasse largement la thermodynamique (cf découverte du neutrino).

En physique moderne, ce principe est une conséquence du fait que le temps est homogène (**invariance des lois physiques par translation dans le temps - théorème de Noether 1918**) de même que la conservation de la quantité de mouvement traduit l'invariance par translation dans l'espace.

*Seule réserve : l'application du premier principe à **notre Univers tout entier** pose problème en relativité générale, car on ne sait pas évaluer son énergie totale.*

7. Premier principe : Principe de conservation de l'énergie

**D'une façon générale, l'énergie d'un système ne peut être ni créée ni détruite.
On ne peut que la transformer en d'autres formes ou l'échanger avec l'extérieur.**

En considérant que notre planète est un système fermé, il est trop simpliste de parler de gaspillage de l'énergie. Il vaudrait mieux dire que nous transformons beaucoup trop d'énergie *noble* - pouvant donner lieu à un travail utile - en énergie *dégradée*, c'est-à-dire en **chaleur à « basse température », impropre à toute utilisation aisée.**

L'énergie potentielle de pesanteur contenue dans un réservoir d'eau peut être convertie en énergie cinétique dans une chute, puis en énergie électrique par une turbine. Le stockage hydrologique de l'eau dans le réservoir est l'un des effets du rayonnement solaire (évaporation et condensation).

En réalisant la combustion du charbon ($C + O_2 \rightarrow CO_2$), on produit de la chaleur transportée par de la vapeur d'eau qui est ensuite turbinée pour fournir de l'électricité. Mais hélas, cette électricité est transformée en chaleur par effet Joule ou par d'autres effets dispersifs (frottements ...). Relâchée dans notre atmosphère, cette chaleur voit sa température décroître. Elle devient alors pratiquement inutilisable.

8. Deuxième principe : principe de Sadi Carnot

S'il n'y avait pas de phénomènes irréversibles, le premier principe serait suffisant pour rendre compte de tous les phénomènes naturels. Mais dans la nature, on observe que **certaines transformations ne se font que dans un sens** : spontanément (sans action externe) la chaleur passe d'un corps chaud à un corps froid et jamais l'inverse ; abandonnés à eux-mêmes deux volumes de gaz purs différents mis en communication se mélangent irréversiblement ...

Ce constat a donné lieu à l'énoncé d'un principe, exprimé par Sadi Carnot pour la première fois en 1824 dans « *Réflexion sur la puissance motrice du feu* » que nous donnerons ici dans deux formulations équivalentes :

- énoncé de **Clausius** : Le passage de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud n'a jamais lieu spontanément ou n'a jamais lieu sans compensation.

- énoncé de **Lord Kelvin** : Un système qui décrit un cycle (*retour cyclique à son état initial*) et qui n'est en contact qu'avec une seule source de chaleur, ne peut pas fournir de travail.

9. Deuxième principe : principe de Sadi Carnot

Par convention, dans un bilan d'énergie, une contribution énergétique est comptée :
positivement si le système gagne cette énergie
négativement s'il la cède.

Dans toute la suite, les énergies sont exprimées en valeurs algébriques.

Un exemple – très simple – régi par le second énoncé est l'expérience du brassage de l'eau de Joule. Un calorimètre qui contient de l'eau à une température T_0 en équilibre thermique avec l'atmosphère supposée isotherme, **reçoit un travail par le brassage de son eau**. Après le brassage, on attend le retour à l'état initial du calorimètre donc à la température T_0 , l'eau étant en contact avec une seule source de chaleur, l'atmosphère.

Le calorimètre décrit un cycle, le premier principe stipule que : **$\Delta Q + \Delta W = 0$**

En revanche, l'énoncé de Lord Kelvin dit que le calorimètre ne peut que recevoir du travail, c'est-à-dire : **$\Delta W > 0$**

ceci – combiné avec le premier principe – donne également : **$\Delta Q < 0$**
donc le calorimètre **cède de la chaleur à l'atmosphère**.

10-a. Machines thermiques dithermes idéales (réversibles)

Théorème de Carnot

Machine thermique ditherme = machine qui **produit du travail** en échangeant de la **chaleur** entre une source chaude SC à température T_c et une source froide SF à $T_f < T_c$

Pendant les différentes étapes d'un cycle il y aura successivement des gains et des pertes de chaleur, et idem pour le travail. On construit différents types de cycles selon l'application visée (moteur, frigo, pompe à chaleur, compresseur, liquéfacteur,.....)

On note :

Q_c = chaleur fournie par la source chaude à la machine

Q_f = chaleur cédée par la machine à la source froide

Pour tout cycle produisant du travail :

$W + Q_c + Q_f = 0$ (1er principe appliqué à un cycle fermé)

$Q_c > 0$, $Q_f < 0$ (2ème principe , la chaleur circulant ici du chaud vers le froid)

Pour une machine thermique, on veut $W < 0$ donc $|Q_c| > |Q_f|$

Théorème de Carnot : toutes les machines thermiques dithermes réversibles (idéales) fonctionnant entre deux températures données T_c et T_f ont le même rendement, et ce rendement ne dépend que des températures des 2 sources.

10-b. Machines thermiques dithermes idéales (réversibles)

Rendement de Carnot

Carnot a évalué le rendement maximal d'un cycle de machine ditherme, en tenant un raisonnement en 3 étapes:

- on doit éviter les échanges de chaleur irréversibles : le rendement sera maximal si le cycle est réversible

-> compression isotherme à T_f -> passage **adiabatique** (sans échange de chaleur avec l'extérieur) à T_c

-> détente isotherme à T_c -> retour adiabatique à l'état initial.

- les échanges dW et dQ dépendent de la température
- le rendement final dépend uniquement des températures

Rendement d'une machine réversible idéale : $\eta = \left| \frac{W}{Q_c} \right| = \frac{T_c - T_f}{T_c}$ températures en K
(voir TD)

On ne peut pas récupérer plus de travail à partir de cette quantité de chaleur.

Conséquence : une centrale électrique thermique ou un moteur thermique doit fonctionner avec le plus grand écart technologiquement possible entre T_c et T_f .

*NB: on peut avoir un rendement meilleur que celui de Carnot dans une transformation si la source **n'est pas** une source de **chaleur** (exemple : énergie mécanique <--> électricité)*

II. Réfrigérateur ditherme idéal et pompe à chaleur (PAC)

Cet appareil marche selon le **cycle inverse de la machine thermique idéale de Carnot**. Ce **réfrigérateur** prélève une quantité Q_f positive de chaleur de la source froide et cède une quantité Q_c négative à la source chaude en recevant un travail W positif. On a alors :

$$W > 0, Q_c < 0, Q_f > 0 \text{ et } |Q_c| > |Q_f|$$

$$W + Q_f + Q_c = 0$$

Efficacité énergétique :

$$\epsilon = \left| \frac{Q_f}{W} \right| = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad \begin{array}{l} \text{températures} \\ \text{en K} \end{array}$$

Pour un réfrigérateur qui fonctionne entre 20°C et 5°C , cette efficacité est de 18,5 (il faut fournir 18,5 fois moins de travail que la chaleur extraite à la source froide !), Elle n'est plus que de 6,7 pour un congélateur fonctionnant à -18°C et elle descend à 1,5% pour une source froide placée à la température de l'hélium liquide : 4,2 K

Une **pompe à chaleur** marche comme un réfrigérateur, mais le produit de la machine est la chaleur Q_c délivrée à la source chaude. Efficacité énergétique : $\epsilon = \left| \frac{Q_c}{W} \right| = \frac{T_c}{T_c - T_f}$

Pour 1000 W électriques disponibles et une PAC fonctionnant entre 20°C et 10°C , on peut alors disposer d'une puissance maximale théorique de chauffage de 29 kW !

12. Rendement des machines réelles irréversibles

Le rendement ou l'efficacité énergétique de machines thermiques réelles dithermes – nécessairement irréversibles – sont **toujours** inférieurs aux valeurs théoriques données par le théorème de Carnot.

Cycle thermodynamique quelconque : **relations de Clausius**

Second principe -> **impossible** de réaliser un cycle tel que : $\frac{dQ_f}{T_f} - \frac{dQ_c}{T_c} > 0$

Généralisation :

on ne le démontrera pas (programme Phy. Stat. M1) mais

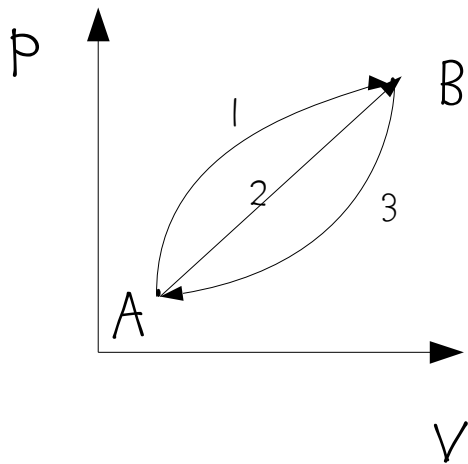
Pour n'importe quel cycle réversible $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ \oint = intégrale le long du cycle

Pour n'importe quel cycle irréversible $\oint \frac{dQ}{T} < 0$

Ne pas oublier :

dans un cycle, le système (la machine) **revient exactement dans son état initial**

13. Entropie et second principe



Dans ce diagramme Pression-Volume, on considère 3 transformations réversibles. On peut alors écrire :

$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_A^B \frac{dQ_1}{T} + \int_B^A \frac{dQ_3}{T} = 0$$

$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_A^B \frac{dQ_2}{T} + \int_B^A \frac{dQ_3}{T} = 0$$

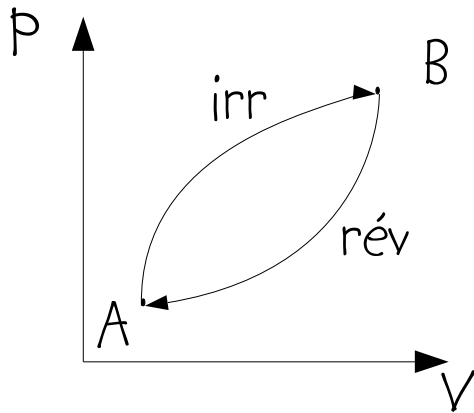
D'où : $\int_A^B \frac{dQ_2}{T} = \int_A^B \frac{dQ_1}{T}$: cette intégrale ne dépend pas du chemin suivi

$\frac{dQ_{rev}}{T}$ est donc une différentielle totale, notée $dS = \frac{dQ_{rev}}{T}$

$S(B) - S(A) = \int_A^B \frac{dQ_{rev}}{T}$ Cette fonction **S** introduite par Clausius en 1865 s'appelle l'**entropie**.

Elle ne dépend que des variables d'états du système, lesquelles ne sont définies qu'à l'équilibre thermodynamique. Elle est définie à une constante arbitraire près, mais seule sa variation importe.

14. Entropie et second principe



Si **(irr)** est une transformation irréversible et **(rév)** une transformation réversible, on peut écrire :

$$\oint \frac{dQ}{T} < 0 \quad \text{soit :} \quad \int_A^B \frac{dQ_{irr}}{T} + \int_B^A \frac{dQ_{rev}}{T} < 0$$

qui conduit à :

$$\int_A^B \frac{dQ_{irr}}{T} < S(B) - S(A) = \Delta S$$

Pour un système **thermiquement isolé** (en **évolution adiabatique**), dQ est constamment nulle, son évolution ne peut se faire qu'à **entropie croissante** (ou constante si la transformation est réversible). Il en est de même si le système est complètement isolé (aucun échange énergétique).

Pour un système isolé : $\Delta S \geq 0$

Cette formulation est équivalente aux énoncés précédents du second principe.

Si on inclut l'extérieur du système dans le bilan entropique, alors :

toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation de l'entropie totale = entropie du système + du milieu extérieur .

15. Corollaires et enseignements

Notre Univers (isolé) évolue **irréversiblement** vers un état de plus grande entropie. L'entropie et le second principe permettent de définir le sens du temps (la flèche du temps). De deux états d'équilibre différents du même système isolé, on pourra toujours trouver - par leurs entropies - celui qui est le plus récent.

Un système isolé qui atteint son maximum d'entropie ne pourra plus évoluer librement.

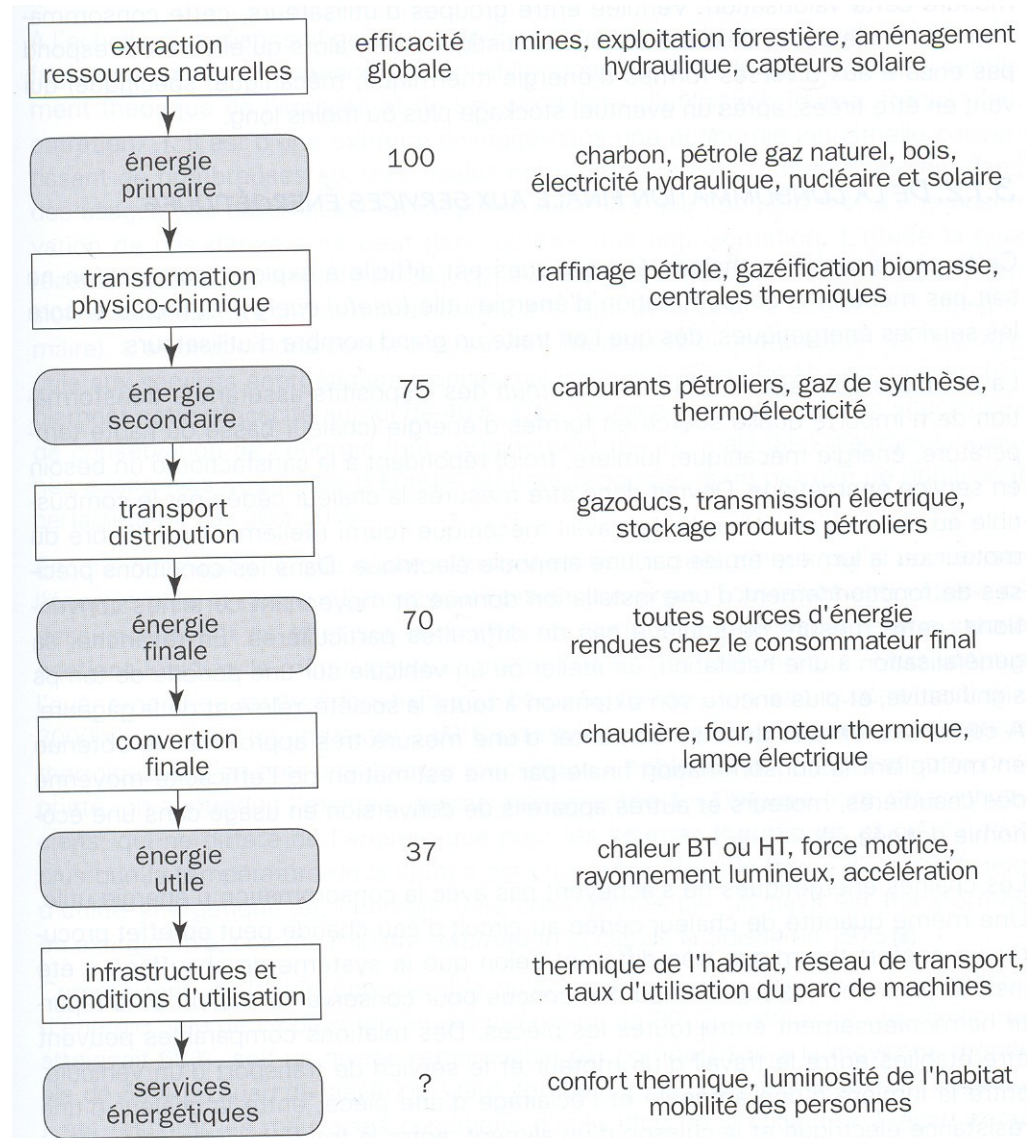
La dégradation d'énergie (plutôt que le gaspillage) à laquelle nous nous livrons sur Terre - par tous nos agissements - fait inexorablement croître l'entropie de la planète, mais nous ne savons pas où se situe le maximum !

Les vrais usages **durables** de notre énergie primaire devraient être isentropiques (entropie constante) ce qui est évidemment impossible, car ils devraient être adiabatiques (sans échange de chaleur) et réversibles.

Pour le moins, ces usages doivent essayer de minimiser les rejets de chaleur ainsi que les phénomènes dispersifs sources d'irréversibilité.

16. Sources et consommation d'énergie :
sources d'énergie primaires,
ordres de grandeur,
rendements

17. De la consommation primaire à la consommation finale :



En moyenne, 60% de l'énergie **primaire** est consommée avant son utilisation !

Source: Jean-Marie Martin-Amouroux dans l'Énergie de demain (EDP Sciences)

18. Les énergies primaires actuelles :

Les énergies fossiles : charbon, pétrole, gaz

En 2010, elles représentaient 81,1 % de la consommation mondiale commerciale en énergie primaire.

Le charbon :

Dans le charbon on distingue :

anthracite (95% de C), houille (70-90% de C), lignite (50% de C), tourbe (peu de C).

Le charbon s'est formé à l'époque du Carbonifère (-345 à -290 millions d'années) à partir des végétaux engloutis par les océans.

En 2010, le charbon représentait 27,3% de la consommation d'énergie primaire mondiale commerciale, en hausse relative progressive.

Le charbon est principalement utilisé pour la production d'électricité (centrales thermiques) et pour le chauffage individuel et collectif. Son usage est croissant en particulier dans les pays émergents.

Combustion : $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{environ } 240 \text{ kJ/mole} .$

19. Les énergies primaires actuelles :

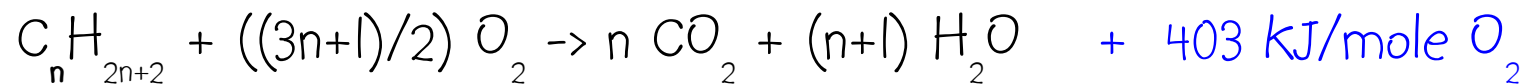
Le pétrole :

Le pétrole s'est formé à partir du plancton déposé au fond des océans qui s'est mélangé aux sédiments. C'est un processus complexe, lent, au rendement faible qui a abouti à des composés ne contenant que du carbone et de l'hydrogène : le pétrole brut .

En 2010, le pétrole représentait 32,4% de la consommation d'énergie primaire mondiale commerciale soit 4,1 Gt de pétrole/an (1 baril de pétrole = 159 litres)

Le raffinage permet de séparer les composés carbonés : (C₁-C₄) les gaz (C₁=méthane), (C₅-C₇) le naphte, (C₆-C₁₂) l'essence, (C₁₂-C₁₅) le kérosène, (C₁₄-C₁₇) le gazole ...

La combustion du pétrole se fait selon la réaction :



Le pétrole est utilisé pour la production d'électricité (centrales thermiques), le **chauffage** collectif et individuel, pour les **transports**, et en **chimie** (plastiques, infrastructures routières, composés organiques - cf avis de Mendeleiev..)

20. Les énergies primaires actuelles :

Le gaz naturel :

C'est essentiellement du **méthane**. Il s'est formé en même temps que le pétrole. Dans un gisement de pétrole, on trouve en général d'abord une nappe de gaz, puis une nappe de pétrole (contenu dans la porosité des roches) et enfin de l'eau chaude.

On en trouve également - en moindre quantité - dans le charbon, dissout dans le pétrole, dans des gisements biogéniques et en plus grandes quantités dans les schistes.

En 2010, le gaz naturel représentait 21,4 % de la consommation d'énergie primaire mondiale commerciale.

La combustion du gaz se fait selon la réaction $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
+ 403 kJ par mole O_2

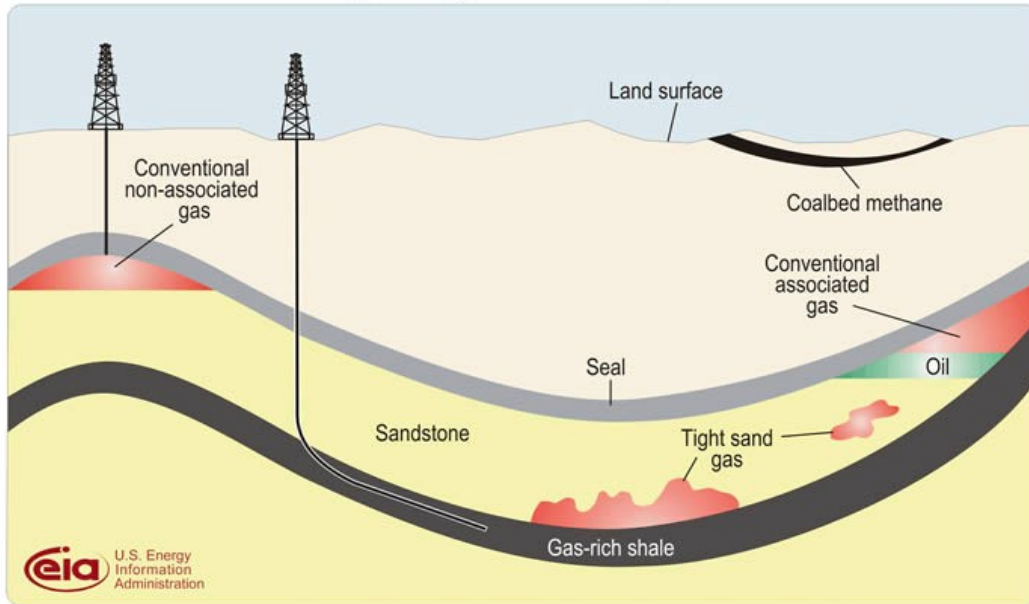
Il est principalement utilisé pour la production d'électricité et pour le chauffage individuel et collectif. Plus rarement dans les transports.

21. Gaz de schistes [en. Shale Gas]

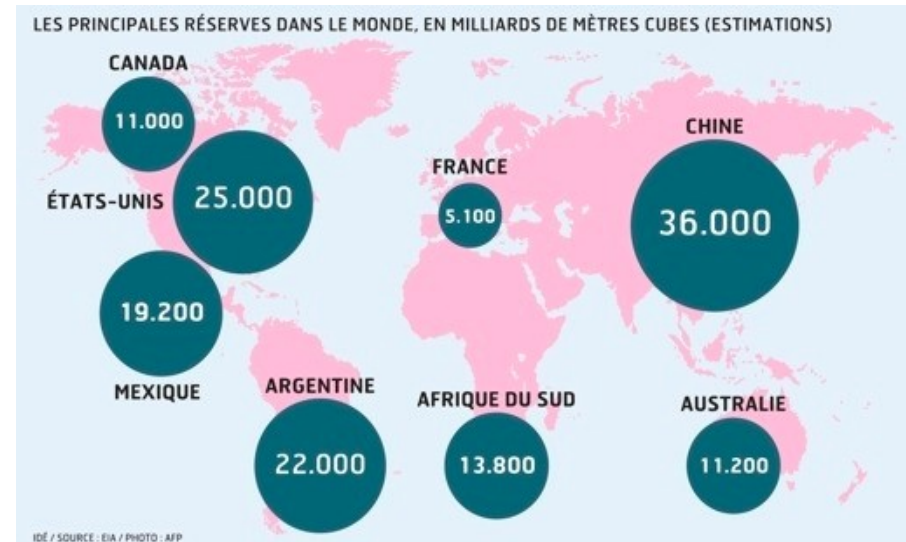
c'est un « gaz naturel » surtout CH₄ (jusqu'à heptane C₇H₁₆)

➔ Son réservoir fait sa particularité :
argiles sédimentaires

profondes (1-4 km) et **peu perméables**
Schematic geology of natural gas resources



➔ • Réserve mondiale : est. 100 à 200 ans de la consommation actuelle de gaz
• Réserves en France : est. 140 ans de la consommation française



➔ **Extraction difficile (10-15% recouvrable) : Perméabiliser** la roche mère

• « **Fracturation hydraulique** » [*hyd. fracturing* ou *fracking*]: Dislocation des couches pour augmenter le drainage + additifs (sable, biocide, lubrifiants, détergents) → pollutions.

• **Fuite de CH₄**

➔ • F.H. Interdite en France (2011) Vermont (USA) etc ...
• Soutien US gvt, moratoire levé en AdS, etc...

➔ R&D méthodes d'extraction

22. Les énergies primaires actuelles :

L'énergie nucléaire de fission :

C'est l'énergie libérée par la fission des noyaux d'uranium 235 :



1 tonne d' ${}^{235}\text{U}$ produit - en centrale électrique de type REP - 830 GW_e an .

L'uranium s'est formé dans des explosions d'étoiles au cours de la phase primitive de notre galaxie (il y a plus de 6 milliards d'années).

L'uranium 235 ne représente que 0,71% de l'uranium naturel d'où la nécessité de son enrichissement isotopique pour optimiser le fonctionnement des réacteurs.

Des réacteurs nucléaires naturels ont fonctionné sur terre il y a 2 milliards d'année à Oklo au Gabon.

En 2010, l'énergie nucléaire représentait 5,7% de la consommation énergétique primaire mondiale commerciale et 12,9 % de la production d'électricité.

L'énergie nucléaire civile est utilisée principalement pour la production d'électricité et plus rarement pour la propulsion de navires stratégiques.

23. Les énergies primaires actuelles :

Les énergies renouvelables en bref (nous y reviendrons en détails) :

Toutes sources confondues, elles représentaient 13,2 % du total de l'énergie primaire mondiale commerciale en 2010.

Soleil :

c'est un énorme réacteur nucléaire de fusion qui émet $3.85 \cdot 10^{26} \text{ W}$ dans l'Univers, sous la forme d'un rayonnement de corps noir porté à 5780 K.

En **moyenne** sur la sphère terrestre, cela correspond à une puissance de rayonnement reçue de 340 W/m^2 -> voir TD

Deux filières différentes selon les besoins pratiques :

- **photovoltaïque** : production d'électricité -> cf TP
- **solaire thermique** : production d'eau chaude -> cf TD ; four solaire
Quelques centrales solaires thermodynamiques produisent de l'électricité (Kramer Junction)

24. Les énergies primaires actuelles :

Énergie géothermique : c'est la chaleur provenant essentiellement (80%) de la radioactivité naturelle de l' ^{235}U , de l' ^{238}U , du ^{232}Th et du ^{40}K qui s'est accumulée dans l'écorce et le manteau terrestres depuis le début de son existence. On estime que $12,6 \cdot 10^{24} \text{ MJ}$ de chaleur sont stockés dans la Terre au-dessus d'une température de surface de 15°C .

Deux types de filières :

- géothermique basse température (sol tiède, sources superficielles) :
production de chaleur $49 \text{ TW}_t\text{h}$ en 2005
- géothermique haute température (sources thermales profondes) :
production d'électricité $57 \text{ TW}_e\text{h}$ en 2004

$$1 \text{ TW.h} = 10^{12} \text{ W.h} = 3,6 \cdot 10^{15} \text{ J} = 8600 \text{ tep}$$

Énergie éolienne : provient indirectement du rayonnement solaire qui réchauffe les masses d'air de l'atmosphère. L'énergie du vent est convertie en électricité dans des aérogénérateurs (les éoliennes) ou peut alimenter une pompe à eau.

25. Les énergies primaires actuelles :

Hydroélectricité : c'est l'énergie électrique qui provient de la chute d'une masse d'eau stockée dans un barrage. **Indirectement**, c'est de l'énergie solaire.

C'est la deuxième source d'énergie renouvelable commerciale : en moyenne mondiale, environ 16% de l'électricité en 2010 (de < 1% à > 99% selon les pays !).

Puissance : proportionnelle à la **hauteur** de la chute et à son **débit**

Barrage de Grandmaison : 1,8 GW ; le record \approx 10 GW en Chine

Une application importante en France : gestion des crêtes h et j de pointe.

Énergie des vagues et des marées :

C'est l'énergie électrique qui peut être produite par le mouvement des vagues ou la force des marées. Elle est encore très très faiblement exploitée dans le monde.

La première centrale marémotrice est en France, sur l'estuaire de la Rance :

240 MW_e et 0,5 Tw_eh/an (l'une des régions du monde avec les plus grandes marées)

26 Les énergies primaires actuelles :

Biomasse : énergie stockée dans la matière vivante par l'éclairement solaire. C'est donc indirectement de l'énergie solaire stockée.

Elle est la source principale d'énergie pour 3 milliards d'humains.

Elle est essentiellement diffusée **hors des circuits commerciaux**. On estime qu'elle représente **≈ 10 %** de la consommation mondiale de toute l'énergie primaire.

La réaction de photosynthèse peut s'écrire sous la forme simplifiée :

$n(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}) \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n + n \text{O}_2$; nous consommons ensuite ces hydrocarbonates.

Elle est utilisée pour l'alimentation (50 % de la biomasse consommée), dans l'industrie du bois, pour le chauffage et la production d'électricité et de gaz.

Énergie des déchets :

C'est l'énergie qui peut être récupérée par la fermentation ou l'incinération des déchets d'élevage, des déchets ménagers et des effluents industriels.

La fermentation conduit à la production de biogaz qui est un mélange de CO_2 , de CH_4 et de H_2S .

L'incinération est utilisée pour la production de chaleur et/ou d'électricité.

27. Unités, conventions & facteurs de conversion

$$1 \text{ kWh} = 10^3 \times 3600 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ calorie} = 4,186 \text{ J} \text{ (chaleur nécessaire pour élever de } 1^\circ\text{C } 1 \text{ g d'eau)}$$

$$1 \text{ baril de pétrole} = 159 \text{ l}$$

$$1 \text{ cheval-vapeur (ch)} = 736 \text{ W}$$

$$1 \text{ k calorie} = 1 \text{ Calorie} = 4,186 \text{ kJ} \text{ (cf diététique)}$$

1 tonne équivalent pétrole = chaleur dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole.

Cette quantité varie légèrement selon la provenance du pétrole et selon le mode opératoire de la combustion -> on arrondit : **1 tep = 10^{10} calories = 41,86 GJ**

Étant donné que le pétrole reste la première source d'énergie primaire, on exprime souvent les quantités d'énergie primaires – quelles que soient leurs natures –

en tep. **Facteurs de conversion :**

$$1 \text{ tonne de : essence} = 1,048 \text{ tep}$$

$$\text{charbon} = 0,697 \text{ tep}$$

$$\text{bois sec} = 0,25 \text{ tep}$$

$$\text{GPL} = 1,095 \text{ tep}$$

$$\text{gaz naturel liquide} = 1,096 \text{ tep}$$

$$\text{fioul} = 0,952 \text{ tep}$$

$$\text{déchets ménagers} = 0,17 \text{ tep}$$

$$1000 \text{ m}^3 \text{ de gaz naturel} = 0,857 \text{ tep}$$

$$1 \text{ MWh de : hydroélectricité, photovoltaïque ou éolien} = 0,0857 \text{ tep}$$

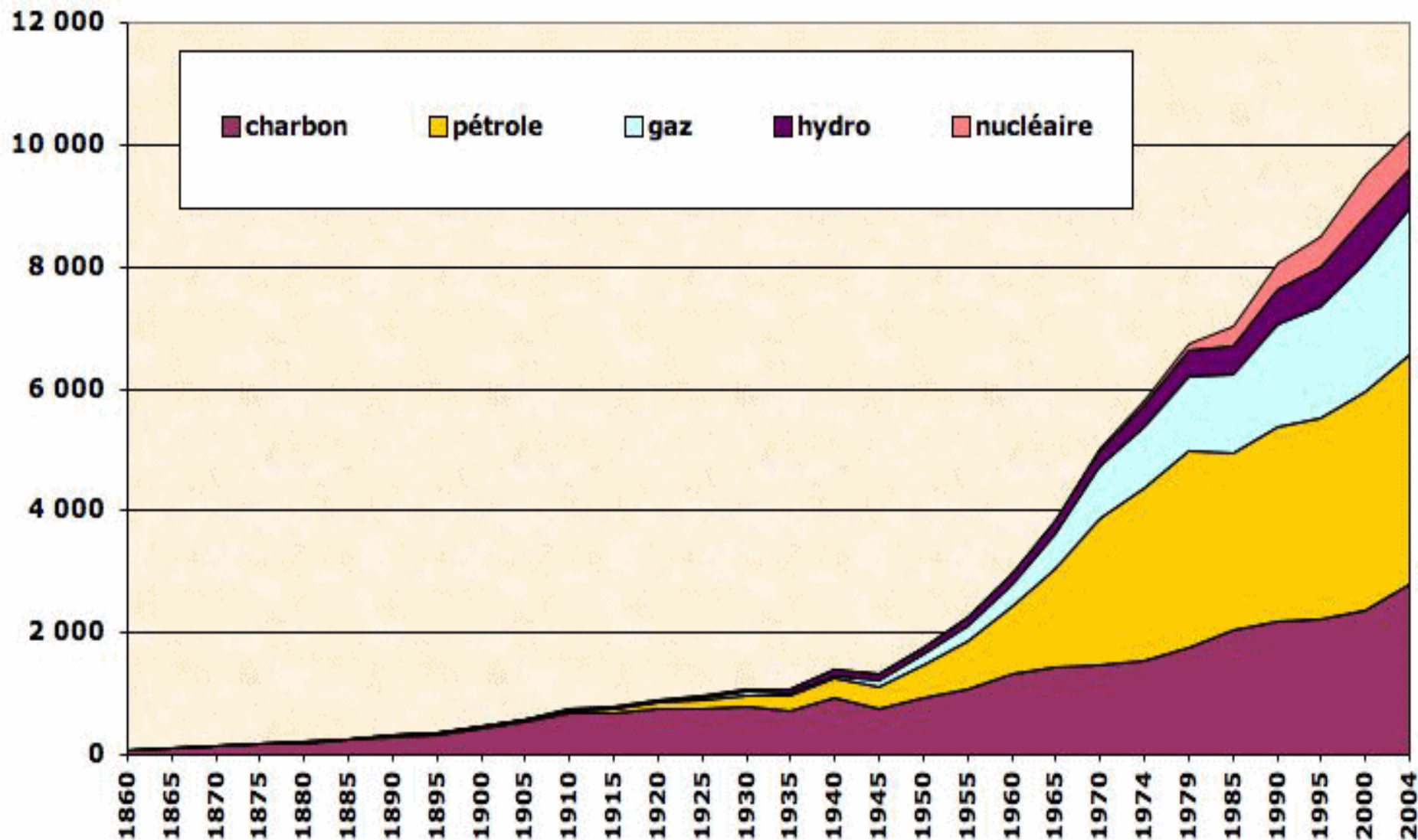
$$1 \text{ MWh d'électricité nucléaire} = 0,222 \text{ tep} ;$$

NB: la centrale ne convertit qu'un tiers de l'énergie nucléaire en électricité

28. Consommation d'énergie primaire :

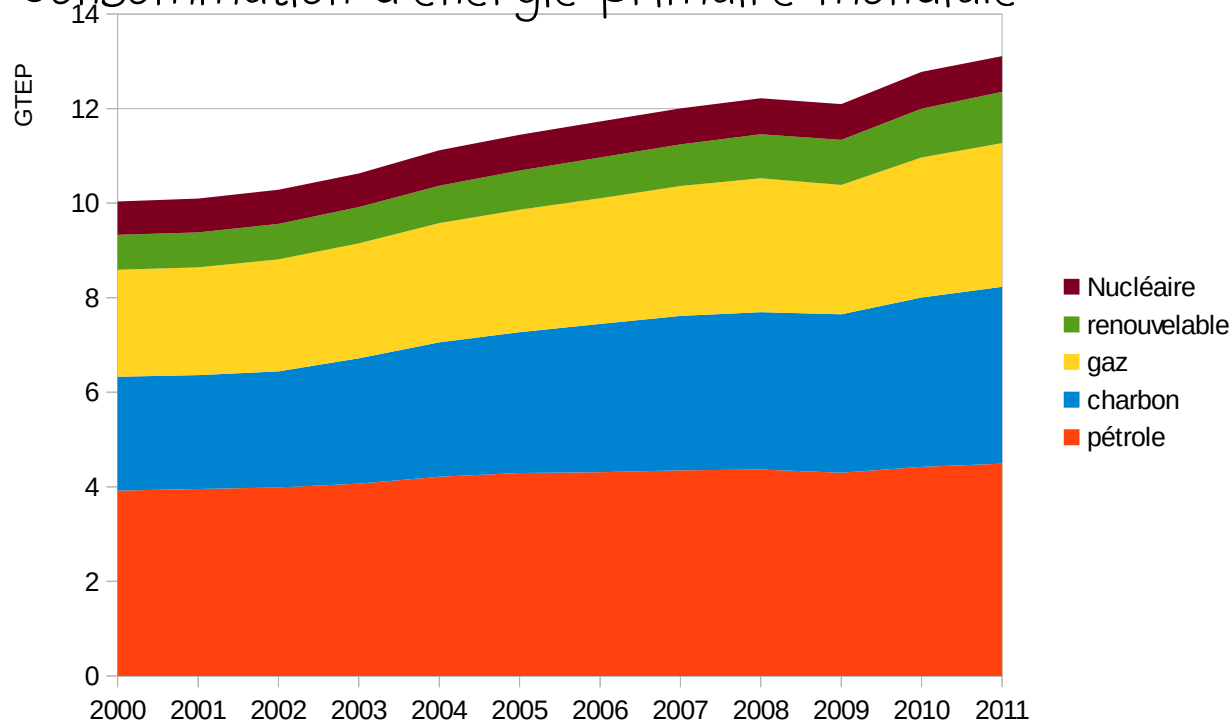
M tep

Source : Daniel Heuer LPSC Grenoble



29. Consommation d'énergie primaire :

Consommation d'énergie primaire mondiale



l'hydroélectricité constitue l'essentiel de l'énergie renouvelable commerciale. Les autres énergies renouvelables commerciales ne sont pas représentées car leurs parts sont encore très faibles. On estime cependant que la biomasse (non commerciale) ajoute une contribution d'environ 10% de plus au total commercial. Elle n'est pas représentée ici.

Consommation annuelle mondiale : 13,1 Gtep en 2011.

Consommation annuelle de la France : 272 Mtep en 2011 dont ~50% sont utilisés pour produire de l'électricité.

La consommation mondiale augmente d'environ 2,3% par an c-à-d 1,1 fois la consommation de la France.

30. Consommation d'énergie primaire :

Conso. d'énergie par habitant en 2012:

- USA : 8 tep/hab/an
- France : 4,25 tep/hab/an
- moyenne mondiale : 2 tep/hab/an
- pour les pays en voie de développement moins de 1 tep/hab/an

La consommation énergétique par habitant est corrélée au PIB/hab.

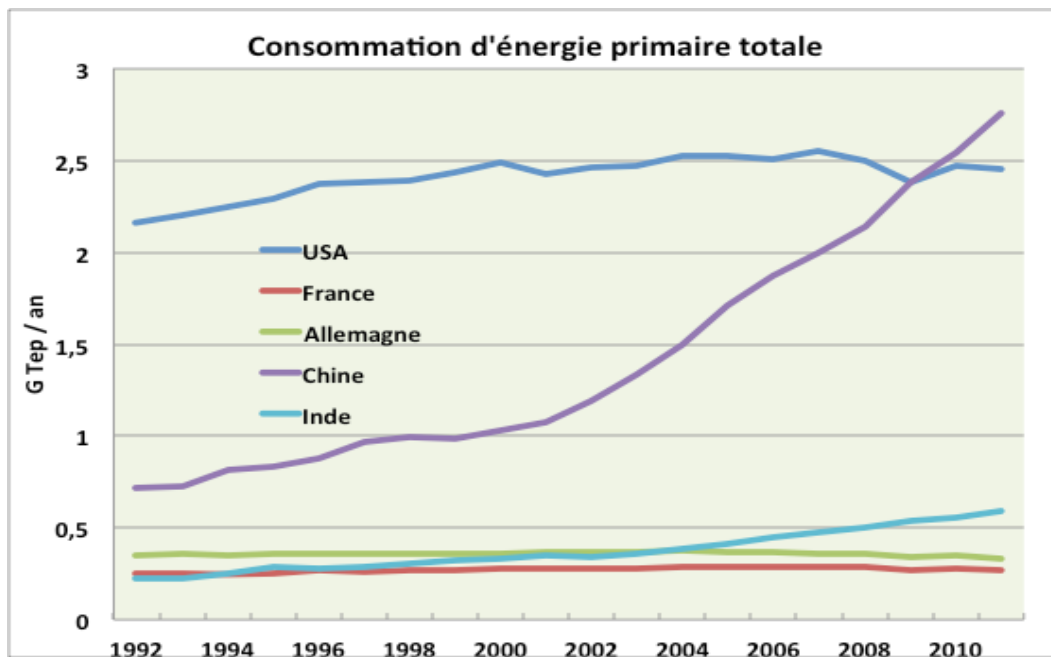
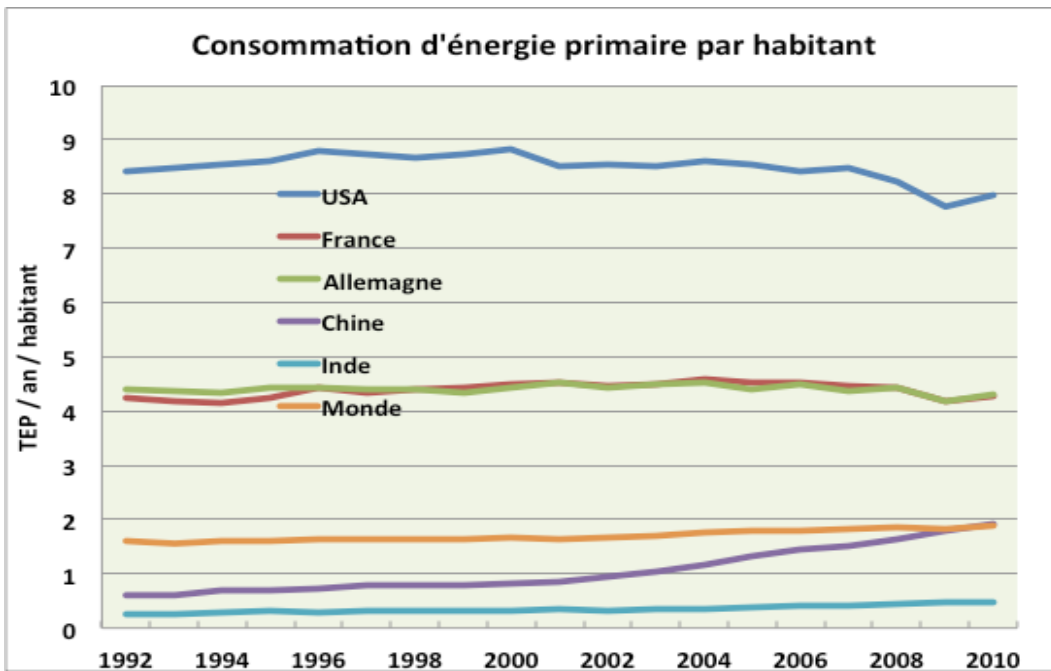
France en 2012:

- PIB 2032 G€ soit ≈ 31 k€/hab/an
- 4.25 tep/hab/an

La France consomme

0.14 tep pour chaque k€ produit

Dans les pays développés, la consommation énergétique est aussi corrélée à la densité de population (conso. + élevée si habitat dispersé)



31. Pour en savoir plus :

- Thermodynamique - G. Bruhat - Masson
- L'Énergie - Ressources, Technologies et environnement,
C. Ngô - UniverSciences Dunod
- L'Énergie de demain - Techniques, Environnement, Économie -
J.L. Bobin, E. Huffer, H. Nifenecker - EDP Sciences
- Energy ... beyond oil - F. Armstrong et K. Blundell - Oxford
- Energy , the Subtle Concept , J. Coopersmith - Oxford
- International Energy Agency : www.iea.org