

10. Conversion d'énergie au cours d'une combustion

Mise en situation

La maîtrise de la conversion de l'énergie a toujours été un facteur crucial pour le développement de l'humanité et est intimement liée à l'idée de progrès. Depuis la maîtrise du « feu », qui n'est autre que la maîtrise de la transformation de l'énergie chimique contenue dans les combustibles vers une énergie thermique, en passant par la maîtrise du « vent » (conversion d'une énergie mécanique) jusqu'à la maîtrise des énergies chimiques contenues dans les combustibles fossiles aux XIX et XXe siècles qui a amené la révolution industrielle par la conversion en énergie électrique.

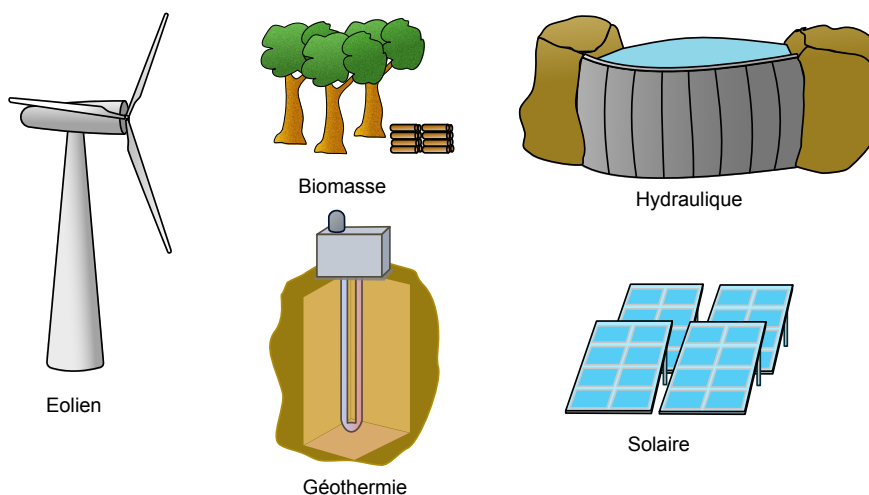
Malheureusement, cette soif croissante en énergie s'est aussi accompagnée d'une transformation profonde de notre environnement, avec un changement climatique qu'il n'est plus possible de nier alors que des scientifiques de renom, comme le prix Nobel de chimie Paul Josef Crutzen, annoncent que nous sommes même entrés dans une nouvelle ère géologique : l'anthropocène !

Il devient donc urgent de contrôler la façon dont nous transformons l'énergie, de choisir des ressources d'énergies qui ont un impact minime sur notre environnement, de réfléchir au stockage de l'énergie et d'être pleinement informé des enjeux qui impactent désormais l'ensemble de l'humanité.

Ressources énergétiques

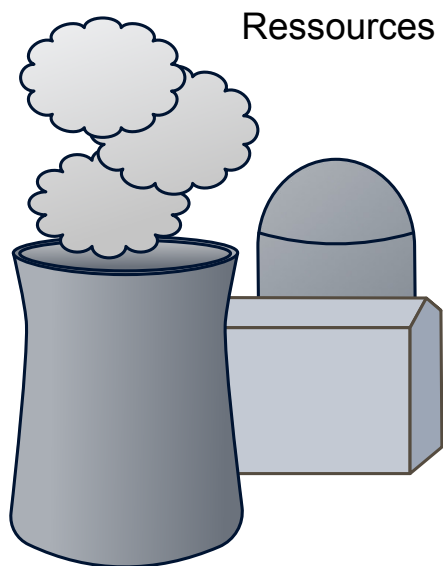
Les ressources énergétiques sont les ressources de base dont l'énergie va être transformé pour une utilisation humaine. On distingue deux types de ressources : **renouvelables** et **non renouvelables**.

Ressources énergétiques renouvelables



Les ressources renouvelables sont celles qui ne vont pas s'épuiser à l'échelle humaine. Il va de soi que l'on ne peut pas parler à l'échelle de l'univers puisque nous savons que le Soleil va épuiser ses ressources énergétiques internes dans environ cinq milliards d'années et qu'il ne fournira donc plus d'énergie rayonnante à la Terre. Mais dans cinq milliards d'années l'humanité aura disparue depuis longtemps ou se sera transformée en autre chose !

Parmi les ressources énergétiques renouvelables on peut donc classer l'énergie mécanique du vent ou de l'eau, l'énergie thermique du sous-sol (géothermie), l'énergie rayonnante du Soleil ou l'énergie chimique contenue dans la biomasse des organismes vivants. Toutes ces énergies peuvent être transformées en énergie utilisable et transportable par l'homme, comme l'énergie électrique ou thermique. On considère que ces ressources se renouvellent suffisamment rapidement pour être « inépuisables ».



Ressources énergétiques non renouvelables

Combustibles fossiles :

Charbon
Gaz naturel
Pétrole

Combustible fissile :

Uranium 235

Les ressources énergétiques **non renouvelables ne se renouvellent pas, ou très lentement**, à l'échelle humaine. On y inclut les **combustibles fossiles** (charbon, gaz naturel, pétrole) et les **combustibles fissiles** (uranium 235) qui sont tous convertis en énergie thermique (avant d'être à nouveau convertis en énergie électrique dans les centrales thermiques ou nucléaires).

Très largement majoritaires dans notre utilisation de ressources énergétiques, ces ressources non renouvelables s'épuisent rapidement. On consomme plusieurs milliards de tonnes de pétrole par an, par exemple, alors qu'il a fallu des millions d'années pour que celui-ci se forme.

L'estimation des réserves mondiales restantes est délicate car les variations de consommation sont importantes. La crise économique mondiale de 2008 a fortement fait baisser la consommation de combustibles fossiles, alors que les guerres la font très fortement augmenter. On découvre peu de nouveaux gisements, mais avec l'augmentation des prix l'exploitation de certaines ressources, comme les sables bitumineux ou les gaz de schiste, deviennent rentables. Sans que ces chiffres ne soient gravés dans le marbre, voici les estimations en 2017 :

Ressource	Durée des réserves
Pétrole	40 ans
Gaz	57 ans
Charbon	150 ans
Uranium	80 ans

Ces chiffres supposent une consommation identique à celle de l'année 2010.

Enjeux énergétiques pour notre avenir

A long terme, l'avenir de notre utilisation énergétique passe donc par la maîtrise des énergies renouvelables et par l'optimisation de leur transformation. Il est toutefois possible d'améliorer l'utilisation que nous avons de ces ressources énergétiques en prenant en compte certaines problématiques essentielles : le transport, le stockage, le coût et l'impact sur l'environnement.

Les ressources, surtout fossiles et fissiles, ne sont pas réparties uniformément sur la planète. En dehors de la gestion des tensions géopolitiques liées à ces ressources, il faut penser que leur transport utilise lui-même de l'énergie et n'est pas toujours rentable. D'autre part, certaines ressources sont facilement stockables, comme le pétrole, alors que certaines formes d'énergie ne peuvent pas être stockées à long terme, comme l'énergie électrique.

Le coût d'exploitation de certaines ressources énergétiques est parfois plus important que le coût de cette énergie sous forme transformée. C'est alors un choix de société et politique que de savoir si l'on subventionne ces ressources énergétiques qui peuvent avoir l'avantage d'un impact réduit sur le changement climatique.

Enfin, l'exploitation de certaines ressources énergétiques pose de graves problèmes environnementaux ou sanitaires, comme l'exploitation des gaz de schiste, des sables bitumineux ou le traitement des déchets radioactifs dues à la transformation des énergies fissiles.

Énergie chimique

L'énergie chimique est liée à la formation ou à la rupture de liaison covalentes. Toute réaction chimique va donc mettre en jeu cette énergie chimique en l'absorbant ou en la libérant. Comme **il faut apporter de l'énergie pour rompre des liaisons covalentes**, certaines réactions chimiques vont « consommer » plus d'énergie externe (généralement thermique) qu'elles n'en libèrent, et inversement.

L'énergie chimique est contenue dans des **réservoirs** que l'on peut exploiter pour la **transformer** en une autre forme. Ces réservoirs peuvent être naturels, comme le pétrole, le gaz naturel ou la biomasse, ou avoir été créés par l'homme, comme les piles ou les accumulateurs. Cette énergie chimique peut alors être transformée naturellement ou de façon provoquée dans des dispositifs permettant de la **recupérer sous une autre forme** : thermique, électrique, rayonnante... on parle alors de **convertisseur d'énergie**.

Ainsi le corps humain est un convertisseur d'énergie qui consomme des aliments afin de transformer leur énergie chimique en énergie mécanique qui fera fonctionner ses muscles. Si ces aliments sont des végétaux, ils ont eux-mêmes transformé l'énergie rayonnante du Soleil en énergie chimique. Les batteries accumulateurs sont également des convertisseurs d'énergie qui transforment l'énergie électrique en énergie chimique pour la stocker avant de faire l'opération inverse lorsqu'on a besoin d'énergie électrique.

Combustion des alcanes et des alcools

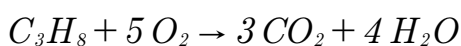
Les alcanes et les alcools sont très prisés pour **l'énergie qu'ils libèrent** lors d'une réaction chimique nommée **combustion**. Cette réaction fait intervenir un **combustible**, ici un alcane ou un alcool, et un **comburant**, généralement le dioxygène présent dans l'air.

Dans le cas des alcanes et des alcools, qui ne contiennent que des atomes de carbone, d'hydrogène et de d'oxygène (pour les alcools), **les produits d'une combustion complète** (si le dioxygène est en excès) seront le **dioxyde de carbone** et de la **vapeur d'eau**.

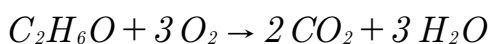
Le bilan d'une combustion d'alcane ou d'alcool peut donc s'écrire sous la forme :



Combustion du propane :



Combustion de l'éthanol :



Ces deux exemples nous permettent de constater que, par exemple, une mole de propane va donner, par combustion, trois moles de dioxyde de carbone. Ce qui explique le **très fort impact de ces combustions sur l'augmentation de la concentration de ce gaz à effet de serre** dans notre atmosphère terrestre.

Réaliser **ces combustions nécessite un apport d'énergie pour casser les liaisons entre atomes**. Ces réactions ne sont donc pas spontanées et **on doit apporter cette énergie** (avec une allumette enflammée par exemple) pour que la combustion démarre.

Mais **la formation de nouvelles liaisons**, dans les produits de la réaction, **libère aussi de l'énergie**. Or les réactions de **combustions libèrent plus d'énergie qu'elles n'en consomment**, d'où leur intérêt pour se chauffer, cuire nos aliments ou faire avancer nos voitures.

Bilan d'une réaction de combustion

Nous avons vu que l'humanité utilise majoritairement les ressources d'énergie fossiles pour la transformer en d'autres énergies nécessaires à notre civilisation actuelle : mécanique, thermique, électrique...

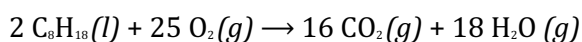
Cela se fait principalement avec la réaction de combustion, que vous l'avez déjà étudiée au collège. Cette réaction met en jeu un combustible et un comburant, généralement le dioxygène O_2 .

Les ressources d'énergie fossiles sont des **espèces organiques** qui contiennent principalement des atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Dans ce cas, **la combustion complète** de ces espèce **ne produit que de l'eau et dioxyde de carbone**. L'équation-bilan de ces réactions est donc très simple.

Exemple de la combustion complète de l'octane (essence) :

Déterminer la masse de dioxyde de carbone produit par la combustion d'un litre d'octane.

On commence par écrire l'équation-bilan de réaction :



On peut en dresser un tableau d'avancement :

	$2 \text{C}_8\text{H}_{18}(l) + 25 \text{O}_2(g) \rightarrow 16 \text{CO}_2(g) + 18 \text{H}_2\text{O}(g)$			
Etat initial	n	excès	0	0
Etat intermédiaire	n - 2x	excès	16 x	18 x
Etat final	n - 2 x _{max}	excès	16 x _{max}	18 x _{max}

La densité de l'octane étant de 703 kg.m⁻³, sa masse volumique ρ est donc de 0,703 kg.L⁻¹ (car il y a 1000 L dans 1 m³).

Avec les masses molaires atomiques du carbone (12 g.mol⁻¹), de l'oxygène (16 g.mol⁻¹) et de l'hydrogène (1 g.mol⁻¹), il est possible de calculer la masse molaire de l'octane (114 g.mol⁻¹) et celle du dioxyde de carbone (44 g.mol⁻¹).

Un litre d'octane correspond à une masse de 0,703 kg soit 703 g. Donc à une quantité de matière n = 6,17 mol (n = m/M)

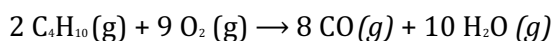
Donc à l'état final x_{max} = n/2 = 3,09 mol.

la masse de dioxyde de carbone obtenue est donc m = 16 × 3,09 × 44 = 2 175 g (car m = n × M).

La combustion d'un litre d'octane produit donc plus de 2 kg de dioxyde de carbone !

Lorsque le dioxygène n'est pas présent en quantité suffisante, la réaction devient incomplète et produit alors d'autres composés, comme le carbone (la suie) ou le monoxyde de carbone CO qui est un gaz mortel. Il faudra alors écrire des équations-bilan de réaction pour chaque espèce carbonée produite car il s'agit de réactions distinctes qui ont lieu en même temps que la réaction de combustion principale.

Par exemple, pour la combustion incomplète du butane (C₄H₁₀) formant du monoxyde de carbone on pourra écrire :



La combustion est une réaction qui convertit l'énergie chimique en énergie thermique en grande quantité. Voyons maintenant comment calculer précisément l'énergie libérée.

Aspect énergétique

Si nous souhaitons faire bouillir de l'eau avec un réchaud à alcool lors d'une soirée camping au bord de la mer, il peut être intéressant d'essayer de prévoir quelle quantité d'alcool il faudra brûler pour obtenir exactement la quantité de chaleur nécessaire à cette ébullition.

Imaginons maintenant que vous n'aimiez pas votre thé brûlant et que vous ne voulez qu'augmenter la température de l'eau avec votre réchaud à alcool. Dans ce cas il va falloir calculer **la quantité de chaleur qu'il faut apporter à un corps de masse m pour le porter à la bonne température à l'aide de la relation suivante :**

$$Q = C \times m \times \Delta t$$

Unités :

- Q : quantité de chaleur absorbée (énergie) en Joule (J)
- m : masse du corps en kilogramme (kg)
- C : chaleur massique du corps en Joule par kilogramme par degré ($\text{J.kg}^{-1}.\text{°K}$)
- Δt : différence de température entre celle de départ et celle d'arrivée

Notes :

- La chaleur massique s'exprimait anciennement en calories (cal) qui représente la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température de 1 gramme d'eau de 1°C : 1 cal = 4,18 J
- Le degré exprimé est en degré kelvin, mais 1°K = 1°C, le seul changement vient de la base de l'échelle de température.

La chaleur massique est également appelée capacité thermique et dépend du corps étudié. Voici quelques exemples de capacités thermiques :

Solides	Capacité thermique ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Liquides	Capacité thermique ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Gaz	Capacité thermique ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Glace	2,1	Eau	4,18	Air (sec)	1,00
Or	0,13	Éthanol	2,46	Vapeur d'eau	1,85
Plomb	0,13	Huile	2,00	Dioxygène	0,92
Fer	0,47	Octane	1,39	Dihydrogène	14,3
Corps humain	3,47	Mercure	0,14	Diazote	1,04

Dans ce tableau nous voyons immédiatement que les métaux, bons conducteurs de chaleur, ont besoin de très peu d'énergie pour voir leur température s'élever d'un degré, au contraire de l'eau, du corps humain ou du dihydrogène.

Exemple :

- 1) Quelle énergie est nécessaire pour élever la température d'un litre l'eau liquide de 20 à 40 °C ?
- 2) Quelle masse de fonte (alliage de fer et de carbone) ($C = 0,47 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) à 100°C faut-il plonger dans l'eau à 20°C pour lui faire atteindre ces 40°C ?

1) Pour l'élévation de température de l'eau :

$$\Delta t = 40 - 20 = 20^{\circ}$$

1L d'eau à une masse de 1 kg

$$C_{\text{eau}} = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°K}$$

$$\text{donc } Q = C_{\text{eau}} \times m \times \Delta t = 4,18 \times 1 \times 20$$

$$\boxed{Q = 83,6 \text{ kJ}}$$

2) La fonte va perdre 60°C

sa capacité massique est $C_{\text{fonte}} = 0,47 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°K}$

On cherche la masse m donc :

$$m = \frac{Q}{C_{\text{fonte}} \times \Delta t} = \frac{83,6}{0,47 \times 60} \text{ donc } \boxed{m = 2,96 \text{ kg}}$$

Donc, près de 3 kg de fonte à 100°C vont passer à 40°C au contact de seulement un litre d'eau qui va passer de 20 à 40 °C. Vous devriez mieux comprendre pourquoi les pompiers utilisent principalement l'eau : non pas seulement pour étouffer les flammes mais pour absorber la chaleur des objets chauds et éviter que l'incendie ne se propage !

Énergie libérée lors d'une combustion

En parlant d'incendie, qui est une sorte de combustion, **l'énergie libérée par ce type de réaction est proportionnelle à la quantité de matière de combustible brûlé et s'exprime par la relation suivante :**

$$E_{\text{lib}} = n \times E_{\text{comb}}$$

Unités :

- E_{lib} : Energie libérée par la combustion en Joule (J)
- n : nombre de moles du combustible en moles (mol)
- E_{comb} : Energie molaire de combustion du combustible en Joule par mole (J.mol^{-1})

Pour calculer l'énergie libérée par une combustion il est donc nécessaire d'écrire l'équation bilan de la combustion, de faire le **bilan matière** de cette combustion pour **déterminer le nombre de moles du combustible** en fonction des informations disponibles (masse, volume, masse volumique, densité...) et ensuite d'effectuer le calcul d'énergie avec la formule précédente.

Énergie molaire de réaction

Les ordres de grandeurs des énergies thermiques molaires sont 100 à 1000 fois plus grandes que celles des changements d'état à cause des liaisons qu'il faut rompre.

L'énergie molaire de réaction chimique est la différence entre l'énergie de dissociation, nécessaire pour casser les liaisons, et l'énergie de formation, nécessaire pour former les nouvelles liaisons.

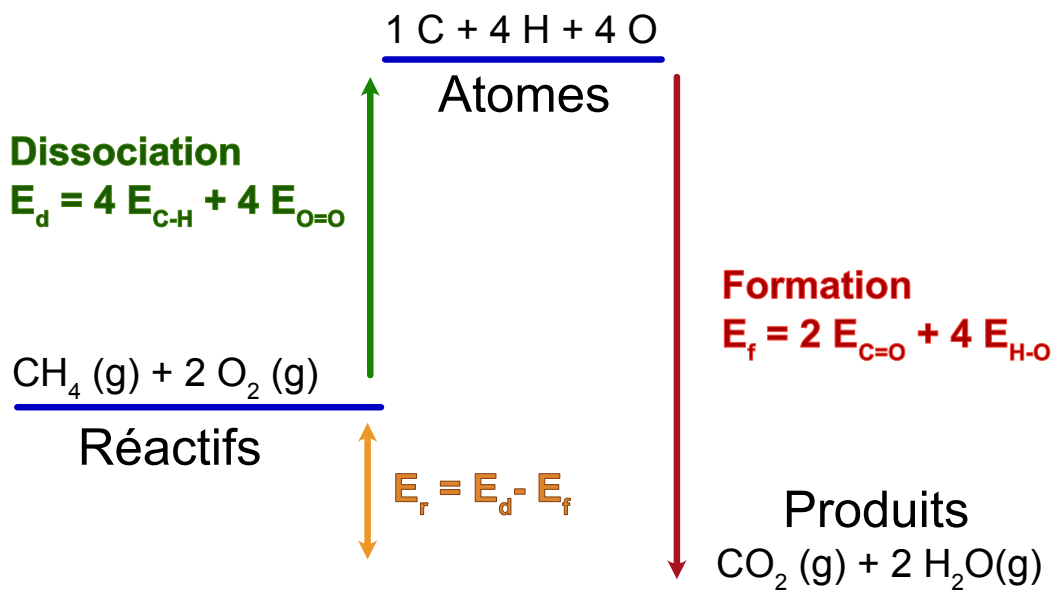
Chaque liaison possède une énergie moyenne de liaison :

Reference: Huheey, pps. A-21 to A-34; T.L. Cottrell, "The Strengths of Chemical Bonds," 2nd ed., Butterworths, London, 1958; B. deB. Darwent, "National Standard Reference Data Series," National Bureau of Standards, No. 31, Washington, DC, 1970; S.W. Benson, J. Chem. Educ., 42, 502 (1965).

Type de liaison	Énergie moyenne de liaison (kJ.mol ⁻¹)
H-H	432
H-C	411
H-O	459
H-N	386
C-C	346
C=C	602
C≡C	835
C-N	305
C=N	615
C-O	358
C=O (CO ₂)	799
N-N	167
O-O	142
O=O	494

A partir de ces énergies moyennes de liaisons, il est possible de calculer l'énergie de réaction. Pour cela il faut écrire l'équation bilan de réaction et compter les liaisons détruites et les liaisons formées. Il est intéressant de faire cela sous la forme d'un diagramme d'énergie pour ne rien oublier.

Exemple de la combustion du méthane :



A partir du tableau précédent on peut calculer l'énergie molaire de réaction :

$$E_r = (4 \times 411 + 2 \times 494) - (2 \times 799 + 4 \times 459) = 802 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

Pouvoir Calorifique

Pour les combustibles, on calcul souvent le pouvoir calorifique, qui est l'énergie libérée par la combustion d'un kilogramme de combustible.

Pour déterminer sa valeur on peut effectuer les étapes suivantes :

- 1) Écrire l'équation-bilan de réaction
- 2) Déterminer le nombre de moles de combustible par kilogramme
- 3) Avec un diagramme d'énergie, calculer l'énergie molaire de réaction
- 4) En déduire l'énergie libérée par la réaction avec $E_{lib} = n \times E_{comb}$

Expérimentalement

Pour déterminer expérimentalement ces énergies molaires de combustion, on va utiliser une combustion pour chauffer une quantité connue d'eau dans un récipient dont on connaît les propriétés (par exemple une canette en aluminium). En étudiant l'élévation de température de l'eau on sait quelle énergie a été dégagée et on peut en déduire l'énergie libérée (en oubliant pas les éventuels changements d'état associés, comme de la cire de bougie qui fond par exemple).