

## 2. Notions fondamentales

### 2.2 – Énergie

#### 2.2.3 – Grandeurs physiques et propriétés

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

Victor Aveline, M.ing.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Grandeurs physiques représentatives et leurs unités
- Principales propriétés des combustibles
- Conclusion

# Question

- Sommes-nous capables de mesurer l'énergie?
  - Oui, mais seulement directement
  - Oui, mais seulement indirectement
  - Non, car il n'y a pas d'unité SI de base pour l'énergie
  - Non, c'est un concept
  - Aucune de ces réponses



ENR2020

# Question

- Oui, mais seulement directement - **Faux**; l'énergie est un concept, et elle ne peut être mesurée qu'indirectement.
- Oui, mais seulement indirectement - **Vrai**; on peut en mesurer les effets (particulièrement le travail effectué à l'aide de cette énergie), mais l'énergie elle-même est un concept, et ne peut être mesurée ou comptée.
- Non, car il n'y a pas d'unité SI de base pour l'énergie - **Faux**; même s'il n'y a pas d'unité SI de base (longueur, masse, temps, courant électrique, température, quantité de matière, intensité lumineuse) pour l'énergie, il y a une unité SI pour l'énergie, et de nombreuses autres unités non-SI mais d'usage courant.
- Non, c'est un concept - **Faux**; même si l'énergie est un concept, on peut la mesurer indirectement.
- Aucune de ces réponses - **Faux**; une des réponses, "Oui, mais seulement indirectement", est exacte.

# Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Grandeurs physiques représentatives et leurs unités
- Principales propriétés des combustibles
- Conclusion

# Introduction et objectifs

- Tant que l'on demeure dans le concept, il est difficile de réaliser quoi que ce soit de tangible.
- Il faut associer des grandeurs physiques aux différentes manifestations de l'énergie.

# Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
  - Comment quantifier l'énergie?
  - Quelles sont les grandeurs associées à l'énergie?

# Plan de la présentation

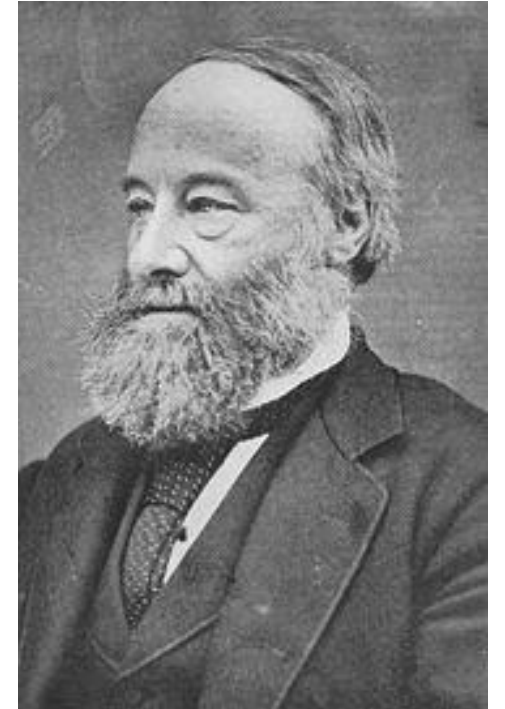
- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Grandeurs physiques représentatives et leurs unités***
- Principales propriétés des combustibles
- Conclusion



# Les grandeurs physiques et leurs unités

## Quelles sont les unités d'énergie et de puissance?

- Le **joule** (James Prescott Joule) : symbole J
  - Une force (de 1 newton) est égale à une masse (de 1kg) multipliée par une accélération (de 1 m/s<sup>2</sup>)
  - Un joule est égal à une force de 1 newton appliquée sur un mètre.  $1\text{J} = 1\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
  - Né de l'équivalence travail-chaleur



# Les grandeurs physiques et leurs unités

## Quelles sont les unités d'énergie et de puissance?

– Le BTU (British Thermal Unit) :

- 1 BTU est l'énergie qu'il faut fournir à une livre d'eau pour la faire augmenter de 1°F à la pression atmosphérique.
- Elle diffère en fonction de la température (0,5 %).
  - Au Canada,  $\text{BTU}_{60\text{oF}}$  (1054,68 J);
  - Aux USA,  $\text{BTU}_{59\text{oF}}$  (1054,804 J) ;
  - En Europe,  $\text{BTU}_{\text{IT}}$  (1055,055 J).



# Les grandeurs physiques et leurs unités

## Quelles sont les unités d'énergie et de puissance?

### – L'électronvolt : symbole eV

- Désigne l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel d'un volt.
- $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Notez le  $10^{-19}$
- $1 \text{ eV}$  = l'énergie résiduelle d'un adolescent moyen dans une classe de science : c'est très peu d'énergie. C'est le genre d'humour des profs qui ont eu le malheur de m'enseigner...
- S'il faut des milliards de milliards d'eV pour équivaloir à un joule, ce joule est-il une quantité d'énergie appréciable?

# Les grandeurs physiques et leurs unités

## Quelles sont les unités d'énergie et de puissance?

- Le kilowattheure (ou kilowatt-heure) : symbole kWh
  - Le kWh est utilisé pour exprimer des énergies électriques à l'échelle « humaine », l'électronvolt est utilisé pour exprimer des énergies très faibles rencontrées en physique des particules.
  - Le MWh, le GWh et le TWh sont employés pour quantifier les très grandes quantités d'énergie électrique.

# Les grandeurs physiques et leurs unités

## Quelles sont les unités d'énergie et de puissance?

- La tonne équivalent pétrole: symbole Tep (ou Toe)
  - La tep est employée en économie pour des analyses macroscopiques des flux et des réserves d'énergies.
  - Toutes les sources (biomasse, fossiles, éolienne, géothermique, solaire, etc.) sont converties dans cette unité afin de pouvoir comparer ces mêmes sources entre elles à l'échelle d'un territoire, d'un pays, d'un continent ou de la planète.

# Les grandeurs physiques et leurs unités

## Quelles sont les unités d'énergie et de puissance?

– La calorie : symbole cal (ou kcal)

- Historiquement associée à la théorie du calorique.
- Au 21<sup>e</sup> siècle, elle est toujours employée, mais davantage en médecine et en nutrition.
- Strictement, il y a 4,1868 J dans une calorie (IT). Mais, il y a 4,184 J dans une calorie thermochimique...

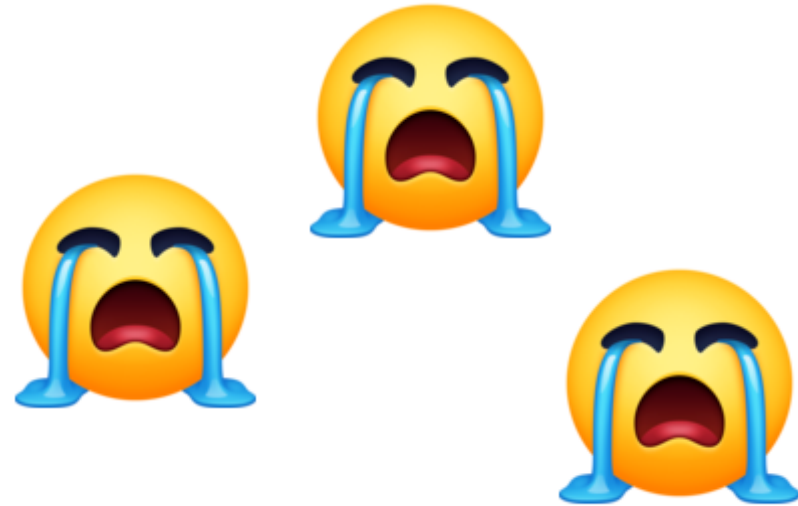


# Les grandeurs physiques et leurs unités

## Quelles sont les unités d'énergie et de puissance?

– Il existe plusieurs autres unités spécialisées:

- Board of trade
- Cheval vapeur heure ou HP hour
- Erg
- Foot pound
- Hartree
- Kilogram-force mètre
- Litre atmosphere
- ... et bien davantage comme le therm ou la thermie.



# Les grandeurs physiques et leurs unités

## Quelles sont les unités d'énergie et de puissance?

- Le watt (James Watt) : symbole W
  - Un watt est égal à un joule délivré ou emmagasiné en l'espace de 1 seconde. C'est une unité dite de puissance, un taux de transfert d'énergie, une capacité à transmettre de l'énergie dans une période de temps donnée.
  - La puissance c'est, par analogie avec le débit massique d'un fluide, le débit de l'énergie.

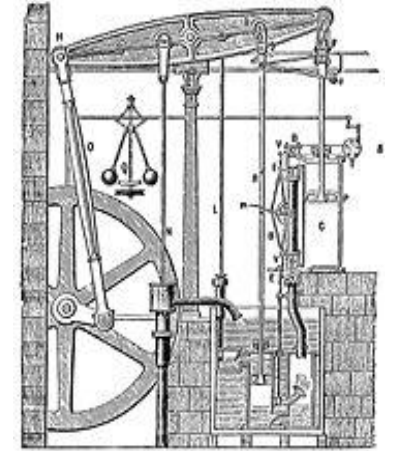




# Les grandeurs physiques et leurs unités

## Quelles sont les unités d'énergie et de puissance?

- Le cheval-vapeur: symbole ch
  - Utilisation à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle du cheval-vapeur, une unité de puissance pour comparer les machines avec la puissance du cheval.
  - Définition par le SI :  $1 \text{ ch} = 735,5 \text{ W}$  ; par le système IP :  $1 \text{ hp (horsepower)} = 746 \text{ W}$
  - Ne pas confondre avec le cheval fiscal, symbole CV



*Boulton & Watt  
Source : Wikipédia*

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Grandeurs physiques représentatives et leurs unités
- ***Principales propriétés des combustibles***
- Conclusion

# Principales propriétés des combustibles

## La capacité thermique massique

- Ou chaleur spécifique ou chaleur massique : symbole  $c_x$  à  $x$  constant ( $c_p$  ou  $c_v$ ) - Unité : J/(kg K)
- Sans dépendre de la masse, on définit la capacité thermique ou capacité calorifique : symbole  $C_x$  à  $x$  constant ( $C_p$  ou  $C_v$ ) - Unité : J/K
- Concept introduit par Joseph Black dans sa théorie du calorique
- Reflète la capacité unitaire d'un matériau à accumuler de l'énergie thermique quand sa température augmente.
- Relation de Mayer pour les gaz parfaits

$$C_p - C_v = n R$$

# Principales propriétés des combustibles

## Le pouvoir calorifique ou chaleur de combustion

- C'est l'énergie dégagée sous forme de chaleur par la réaction de combustion par le dioxygène d'une certaine quantité de combustible. Le combustible peut être un élément chimique pur ou un composé.
- Unités : J/kg ; J/L ; BTU/lb ; J/mol ; Wh/kg ; J/m<sup>3</sup> ; cal/kg
- Cette énergie comprend ce que l'on appelle la chaleur sensible, mais aussi la chaleur dite latente (dans ce cas celle de vaporisation de l'eau contenue dans la réaction de combustion).

# Principales propriétés des combustibles

## Le pouvoir calorifique ou chaleur de combustion

- Mais est-il possible d'exploiter l'énergie qui a été utilisée pour faire évaporer l'eau générée par la combustion?
- Oui: dans une chaudière à condensation, on récupère la chaleur qui a été captée par l'eau en s'évaporant en la faisant condenser **avant** de rejeter les gaz de combustion à l'atmosphère).
- Il existe donc deux définitions du pouvoir calorifique, lesquelles ?

# Principales propriétés des combustibles

## Le pouvoir calorifique supérieur (PCS)

- C'est toute l'énergie thermique produite par la combustion d'un kilogramme de combustible.
- Tient compte de l'énergie sensible ET de l'énergie latente de vaporisation présente au terme de la combustion (le plus généralement).
- Concept surtout utilisé en Amérique du Nord

# Principales propriétés des combustibles

## Le pouvoir calorifique inférieur (PCI)

- C'est l'énergie thermique produite par la combustion d'un kilogramme de combustible sans la portion qui est requise pour évaporer l'eau.
- Tient compte de l'énergie sensible MAIS PAS de l'énergie latente.
- Il est toujours inférieur au PCS lorsque la combustion entraîne l'évaporation de l'eau.
- Définition surtout utilisée en Europe

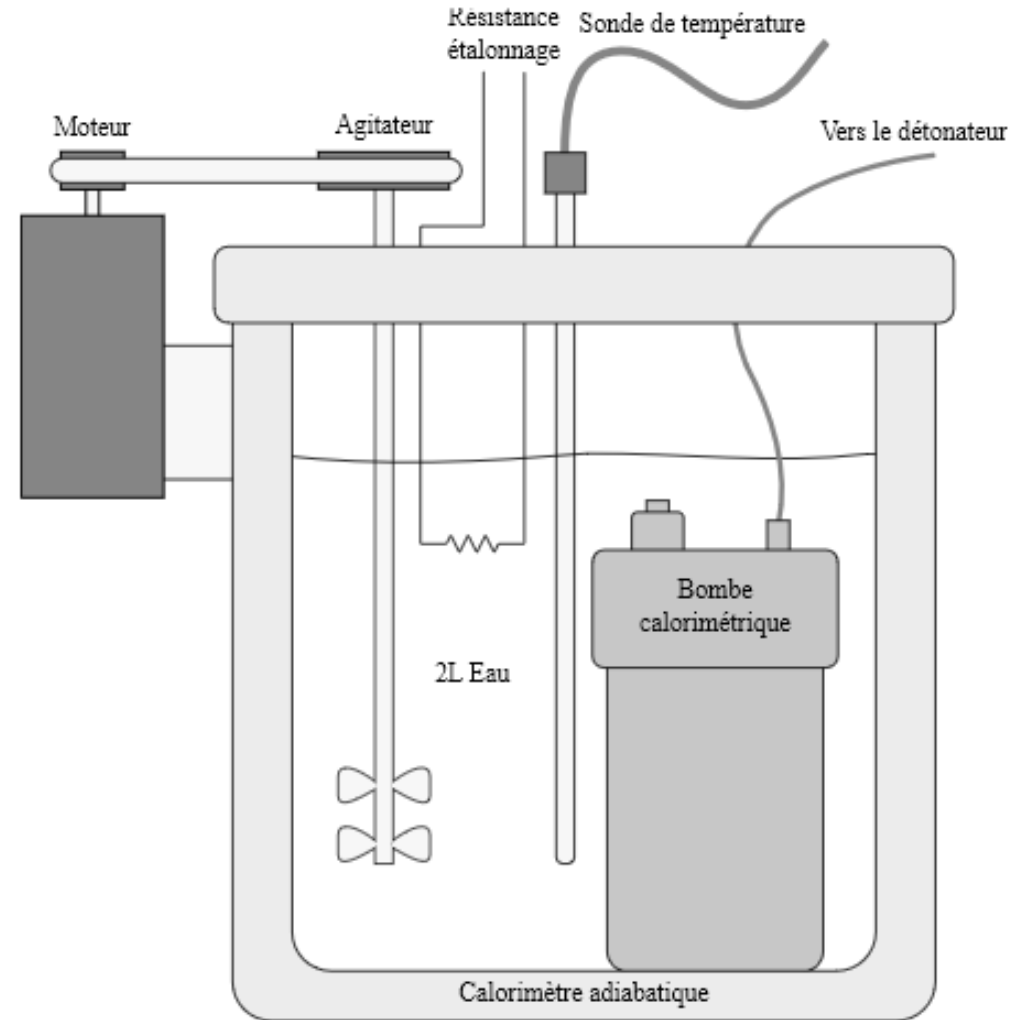
# Principales propriétés des combustibles

## Mesure du pouvoir calorifique

- Mesures à l'aide d'une bombe calorimétrique, en laboratoire
- On y mesure le PCS pour en déduire par la suite le PCI
- Étalonnage avec une quantité connue d'énergie

Exemple d'un protocole de mesure :

<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche20-calcul-pci-010367.pdf>



Source : [http://glace.recherche.usherbrooke.ca/wp-content/uploads/2013/11/CPH316\\_calorimetrie20180118.pdf](http://glace.recherche.usherbrooke.ca/wp-content/uploads/2013/11/CPH316_calorimetrie20180118.pdf)



# Principales propriétés des combustibles

## Mesure du pouvoir calorifique

- Différence entre un calorimètre et une bombe calorimétrique
  - <https://fr.wikipedia.org/wiki/Calorim%C3%A8tre>

**Ces notions (PCS, PCI) sont cruciales lorsque l'on travaille en ER car il faut connaître les PCI ou le PCS d'un combustible fossile lorsqu'il s'agit de le remplacer par une autre source !**

# Principales propriétés des combustibles

## Quelques pouvoirs calorifiques typiques (source AIE, 2005)

### Charbon .....

Tableau A3.5 • Gamme des pouvoirs calorifiques par type de houille

Houille	PCS (tel qu'utilisé) MJ/kg	PCI (tel qu'utilisé) MJ/kg	Teneur en carbone (tel qu'utilisé) kg/t	Teneur en humidité (telle qu'utilisée) %	Teneur en carbone (dmmf)* kg/t
Anthracite	29,65 - 30,35	28,95 - 30,35	778 - 782	10 - 12	920 - 980
Charbon à coke	27,80 - 30,80	26,60 - 29,80	674 - 771	7 - 9	845 - 920
Autre bitumeux	23,85 - 26,75	22,60 - 25,50	590 - 657	13 - 18	810 - 845

Autour de 20-30 MJ/kg environ 0,5 X celui du pétrole

# Principales propriétés des combustibles

## Quelques pouvoirs calorifiques typiques (source AIE, 2005)

### Cokes .....

Tableau A3.6 • Pouvoirs calorifiques par type de coke

Type de coke	PCS (tel qu'utilisé) MJ/kg	PCI (tel qu'utilisé) MJ/kg	Teneur en carbone (tel qu'utilisé) kg/t	Teneur en humidité (telle qu'utilisée) %	Teneur en carbone (dmmf)* kg/t
Coke métallurgique	27,90	27,45	820	8 - 12	965 - 970
Coke de gaz	28,35	27,91	853	1 - 2	856
Semicoke	26,30	25,40	710	15	900
Coke de pétrole	30,5 - 35,8	30,0 - 35,3	875	1 - 2	890

Autour de 20-30 MJ/kg environ 0,5 X celui du pétrole

\*dmmf : produit sec exempt de matières minérales.

# Principales propriétés des combustibles

## Quelques pouvoirs calorifiques typiques (source AIE, 2005)

### Produits pétroliers .....

**Tableau A3.8** • Pouvoirs calorifiques typiques de certains produits pétroliers

Produit	Densité kg/m <sup>3</sup>	Litres par tonne	Pouvoir calorifique supérieur (GJ/t)	Pouvoir calorifique inférieur (GJ/t) <sup>(1)</sup>
Éthane	366,3	2730	51,90	47,51
Propane	507,6	1970	50,32	46,33
Butane	572,7	1746	49,51	45,72
GPL <sup>(2)</sup>	522,2	1915	50,08	46,15
Naphte	690,6	1448	47,73	45,34

Autour de 45-50  
MJ/kg , produits  
raffinés du pétrole

# Principales propriétés des combustibles

## Quelques pouvoirs calorifiques typiques (source AIE, 2005)

Essence aviation	716,8	1395	47,40	45,03
Essence moteur <sup>(3)</sup>	740,7	1350	47,10	44,75
Carburéacteur type kérosène	802,6	1246	46,23	43,92
Pétrole lampant	802,6	1246	46,23	43,92
Gazole/carburant diesel	843,9	1185	45,66	43,38
Fuel oil à faible teneur en soufre	925,1	1081	44,40	42,18
Fuel oil à haute teneur en soufre	963,4	1038	43,76	41,57

Autour de 40-45 MJ/kg

- (1) Pour le naphte et les huiles plus lourdes, le pouvoir calorifique inférieur est estimé à 95 % du pouvoir calorifique supérieur.
- (2) Hypothèse d'un mélange de 70 % de propane et de 30 % de butane par masse.
- (3) Une moyenne pour les essences moteur à indice d'octane compris entre 91 et 95.

# Principales propriétés des combustibles

## Quelques pouvoirs calorifiques typiques (source AIE, 2005)

### Gaz naturel .....

Le méthane présente un pouvoir calorifique supérieur de 55,52 MJ/kg (37,652 MJ/m<sup>3</sup>) et un pouvoir calorifique inférieur de 50,03 MJ/kg (33,939 MJ/m<sup>3</sup>). Cependant, le gaz naturel tel que fourni contient des gaz autres que le méthane (normalement de l'éthane et du propane). Comme les gaz plus lourds augmentent le pouvoir calorifique par mètre cube, le pouvoir calorifique supérieur peut varier assez largement, à savoir de 37,5 à 40,5 MJ/m<sup>3</sup>.

NOTE: Le PCI du gaz naturel est selon l'AIE égal à 0,9 PCS.

Méthane, autour de 50 MJ/kg ce qui est très élevé.

Mais le gaz dit « naturel » est un produit que l'on retrouve dans la nature!

Ainsi, son PCI est très variable, tout celui des différentes sources de base en pétrole

	En :	Mètre cube standard	Mètre cube normal
De :		multiplier par :	
Mètre cube standard*		1	0,948
Mètre cube normal**		1,055	1

\*1 Scm mesuré à 15°C et 760 mmHg.

\*\*1 Ncm mesuré à 0°C et 760 mmHg.

# Principales propriétés des combustibles

## Quelques pouvoirs calorifiques typiques (source AIE, 2005)

**Tableau A3.9** • Facteurs de conversion de la masse ou du volume en chaleur (pouvoir calorifique supérieur)

En :	GNL		GAZ							
			Norvège		Pays-Bas		Russie		Algérie	
	MJ	Btu	MJ	Btu	MJ	Btu	MJ	Btu	MJ	Btu
De :	multiplier par :									
Mètre cube*	40,00	37912	42,51	40290	35,40	33550	37,83	35855	39,17	37125
Kilo-gramme	54,40	51560	52,62	49870	45,19	45.19	42830	54,42	20,56	47920

\* à 15 °C.

# Principales propriétés des combustibles

## Quelques pouvoirs calorifiques typiques (source AIE, 2005)

### Gaz naturel .....

Le méthane présente un pouvoir calorifique supérieur de 55,52 MJ/kg (37,652 MJ/m<sup>3</sup>) et un pouvoir calorifique inférieur de 50,03 MJ/kg (33,939 MJ/m<sup>3</sup>). Cependant, le gaz naturel tel que fourni contient des gaz autres que le méthane (normalement de l'éthane et du propane). Comme les gaz plus lourds augmentent le pouvoir calorifique par mètre cube, le pouvoir calorifique supérieur peut varier assez largement, à savoir de 37,5 à 40,5 MJ/m<sup>3</sup>.

	En :	Tonne de GNL	Mètre cube de GNL	Mètre cube standard*
De :	multiplier par :			
Tonne de GNL		1	0.948	1360
Mètre cube (m <sup>2</sup> ) de GNL		0.45	1	615
Mètre cube standard*		7,35*10 <sup>-4</sup>	1,626*10 <sup>-3</sup>	1

\*1 Scm = 40 MJ.



# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Grandeurs physiques représentatives et leurs unités
- Principales propriétés des combustibles
- ***Conclusion***

# Conclusion

- L'énergie possède une foule d'unités qui jalonnent l'histoire du développement de ce concept;
- Plusieurs de ces unités sont encore employées aujourd'hui dans des domaines spécifiques;
- Certaines unités portent le même nom mais n'ont pas nécessairement la même valeur;
- Plusieurs propriétés thermophysiques ont une importance prépondérante en analyse énergétique, notamment le pouvoir calorifique d'un combustible.

# Conclusion

- Les unités d'**énergie** les plus couramment employées en ingénierie énergétique sont:
  - Le joule (MJ, GJ, TJ, PJ)
  - Le Btu (MBtu, MMBtu), en Amérique du Nord
  - La tonne de réfrigération, en bâtiment
  - Le kWh (MWh, GWh, TWh), en électricité surtout
  - La tep (Mtep), ou son équivalent anglais, en macroanalyses

# Conclusion

- Les unités de ***puissance*** les plus couramment employées en ingénierie énergétique sont:
  - Le watt (W, kW, MW, GW, TW), en électricité
  - Le Btu/h (et ses dérivés), en Amérique du Nord
  - Le horse-power (HP), en Amérique surtout, mais aussi en motorisation

Il est à espérer que, avec la vitesse de transmission des informations, nous allons graduellement pouvoir réduire l'utilisation de certaines de ces unités. Mais, si vous faites carrière au 21<sup>e</sup> siècle au Canada, le therm, la tonne de réfrigération, le MMBtu et le HP sont là pour longtemps.

# Bibliographie/médiagraphie

- Site Connaissance des énergies, *Unités de l'énergie*, 2014.  
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/unites-de-l-energie>  
(site certifié avec un comité d'expert, tenu par une fondation financé par le groupe Alcen, se veut neutre sur la question énergétique)
- <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/memento-energie-Artru1.xml>
- Pages Wikipédia



**Merci de votre attention !**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions

